

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**LUCIANA PAULA TESSARO MORELO**

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM ESCÓRIA GRANULADA  
DE ALTO-FORNO MOÍDA E COPRODUTO DO PROCESSO DE  
DESSULFURIZAÇÃO DE GASES DE COMBUSTÃO (FGD) EM SUBSTITUIÇÃO  
AO CIMENTO PORTLAND**

**VITÓRIA - ES**

**2023**

**LUCIANA PAULA TESSARO MORELO**

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM ESCÓRIA  
GRANULADA DE ALTO-FORNO MOÍDA E COPRODUTO DO PROCESSO DE  
DESSULFURIZAÇÃO DE GASES DE COMBUSTÃO (FGD) EM SUBSTITUIÇÃO  
AO CIMENTO PORTLAND**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Geilma Lima Vieira

**VITÓRIA - ES**

**2023**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

T338d Tessaro Morelo, Luciana Paula, 1992-  
Desempenho de Argamassas Produzidas com Escória Granulada de Alto-Forno moída e Coproduto do Processo de Dessulfurização de Gases de Combustão (FGD) em substituição ao Cimento Portland / Luciana Paula Tessaro Morelo. - 2023.  
139 f. : il.

Orientadora: Geilma Lima Vieira.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Argamassa com baixo teor de cimento. 2. Incorporação de resíduos. I. Lima Vieira, Geilma. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**Desempenho de Argamassas Produzidas com Escória Granulada de Alto-Forno Moída e Coproduto do Processo de Dessulfurização de Gases de Combustão (FGD) em Substituição ao Cimento Portland**

**Luciana Paula Tessaro Morelo**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **23 de março de 2023** por:

---

Profa. Dra. Geilma Lima Vieira  
Doutora em Engenharia Civil  
Orientadora – UFES

---

Profa. Dra. Rudiele Aparecida Schankoskio  
Doutora em Engenharia Civil  
Examinadora Interna – UFES

---

Profa. Dra. Georgia Serafim Araújo  
Doutora em Engenharia Civil  
Examinadora Externa - UFES

## AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus amigos e familiares, que estiveram ao meu lado durante o desenvolvimento dessa pesquisa, que torceram e acreditaram em mim;

Ao meu irmão Bernar pela ajuda durante o processo;

À professora orientadora Geilma Lima Vieira pela oportunidade, pelo apoio nas situações difíceis e pelos inúmeros ensinamentos durante todo o processo;

Aos professores queridos que tive oportunidade de conhecer e o privilégio de conviver, em especial a professora Rudiele e o professor Ronaldo;

A professora Georgina, por aceitar o convite de fazer parte da banca examinadora;

Ao meu amigo Otávio que o mestrado me presenteou, que tanto me apoiou e ajudou durante esta pesquisa;

Aos queridos colegas do LEMAC - UFES, Breno, Denise, Henrique, Luana e Márcio pelo suporte, ajuda e pelos aprendizados trocados durante a execução dos inúmeros ensaios. Em especial, agradeço ao Breno que topou planejar, montar e realizar os ensaios novos junto comigo;

À ArcelorMittal pela disponibilidade dos resíduos utilizados nesta pesquisa;

À empresa Concrevit pela doação do agregado utilizado neste trabalho;

Ao CETEM-ES pelo desenvolvimento dos ensaios de DRX e FRX;

Ao LUCCAR – UFES pela execução dos ensaios MEV/EDS;

Ao LABPETRO – Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologias para Análises de Petróleos e as queridas Suellen e Maria Tereza do Departamento de Química/CCE/UFES. pela realização do ensaio de ICP-MS e auxílio durante a análise dos resultados;

À UFES pela estrutura disponibilizada.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte desse processo junto comigo e que torceram pelo sucesso desta pesquisa.

Não sou nada.  
Nunca serei nada.  
Não posso querer ser nada.  
À parte isso, tenho em mim todos os  
sonhos do mundo.

Fernando Pessoa

## RESUMO

Alternativas vêm sendo estudadas com o intuito de minimizar os grandes impactos ambientais provenientes da produção do cimento e aço. Inclusive, adotando cimentos compostos, com incorporação de materiais alternativos, diminuindo a necessidade de cimento nas misturas. Por conseguinte, este trabalho estudou a viabilidade de incorporação de resíduos siderúrgicos no desempenho mecânico de durabilidade de argamassas, avaliando a substituição parcial e total do Cimento Portland (CP) por escória granulada de alto-forno (EGAF) e resíduo proveniente do processo de Dessulfurização de Gases de Combustão (FGD). Esta pesquisa avaliou os desempenhos mecânicos e de durabilidade de argamassas produzidas com substituição do cimento por EGAF (0%, 60% e 70%) e FGD (0%, 10%, 25% e 30%), utilizando relação água/aglomerante de 0,60. No estado fresco, determinou-se o índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado, retenção de água e tempos de pega. No estado endurecido avaliou-se a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água por capilaridade, teor de cloretos totais e sulfatos solúveis, além da microestrutura das argamassas e a lixiviação de contaminantes. Foi realizada a ANOVA dos resultados obtidos. Os traços estudados apresentaram uma maior densidade de massa e conseqüentemente, um menor teor de ar incorporado nas misturas. Os resultados encontrados mostram que a associação desses resíduos em substituição ao cimento melhorou o desempenho mecânico das argamassas. No que diz respeito a resistência à compressão e tração, as argamassas E60F10 e E70F10 de EGAF obtiveram os melhores desempenhos, com aumentos superiores a 40%. O traço com 0% de cimento, E70F30, obteve resistências superiores ao traço referência aos 28 dias. Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, todos os traços contendo substituição obtiveram valores menores que o de referência, com exceção do traço E60F10 que obteve módulo de 32 GPa. O traço E00F30 apresentou uma redução de mais de 16% no módulo, o que aponta para um traço com maior capacidade de absorver deformações. Quanto a absorção de água por capilaridade, todos os traços obtiveram menor absorção de água do que o traço referência, com exceção do traço E00F30. Os traços contendo EGAF aumentaram significativamente o desempenho frente a essa propriedade, uma vez que os traços tiveram taxas 80% menores de absorção de água que o referência. Além disso, todas as amostras apresentaram ótimo desempenho frente aos ensaios de cloretos totais e sulfatos. O ensaio de lixiviação de contaminantes não apresentou nenhum contaminante em quantidade prejudicial. Os resultados encontrados demonstram que a utilização de FGD e EGAF simultâneos para substituir o Cimento Portland são extremamente satisfatórios, obtendo desempenhos mecânicos e de durabilidade superiores aos de referência, viabilizando a utilização desses resíduos para produção de argamassas com baixo teor de cimento.

**Palavras chaves:** Dessulfurização de Gases de Combustão (FGD); Escória Granulada de alto-forno moída; Resistência à compressão; Argamassa com baixo teor de cimento; argamassas com incorporação de resíduos.

## ABSTRACT

Alternatives have been studied in order to minimize the major environmental impacts arising from the production of cement and steel. Even adopting composite cements, with the incorporation of alternative materials, reducing the need for cement in the mixtures. Therefore, this work studied the viability of incorporating steel residues in the mechanical performance of mortar durability, evaluating the partial and total replacement of Portland Cement (PC) by granulated blast furnace slag (EGAF) and residue from the Desulfurization process of flue gases (FGD). This research evaluated the mechanical and durability performances of mortars produced replacing cement with EGAF (0%, 60% and 70%) and FGD (0%, 10%, 25% and 30%), using a water/binder ratio of 0.60. In the fresh state, consistency index, mass density, incorporated air content, water retention and setting times were determined. In the hardened state, the Compressive Strength, Tensile Strength by Diametral Compression, Water Absorption by capillarity, Content of total chlorides and soluble sulfates, in addition to the microstructure of the mortars and the leaching of contaminants, were evaluated. ANOVA of the results obtained was performed. The studied mixes showed a higher mass density and, consequently, a lower amount of air incorporated in the mixtures. The results found show that the association of these residues in place of cement improved the mechanical performance of the mortars. With regard to compressive and tensile strength, the mortars E60F10 and E70F10 obtained the best performances, with increases greater than 40%. The mix with 0% cement, E70F30, obtained superior resistances to the reference mix at 28 days. As for the dynamic modulus of elasticity, all mixes containing substitution obtained values lower than the reference, with the exception of the E60F10 mix, which obtained a modulus of 32 GPa. The E00F30 mix showed a reduction of more than 16% in the modulus, which points to a mix with greater capacity to absorb deformations. As for water absorption by capillarity, all the traits had lower water absorption than the reference trait, with the exception of the E00F30 trait. The EGAF-containing mixes significantly increased the performance against this property, since the mixes had 80% lower rates of water absorption than the reference. In addition, all samples showed excellent performance against the tests of total chlorides and sulfates. The contaminant leaching test did not show any contaminants in harmful amounts. The results show that the simultaneous use of FGD and EGAF to replace Portland cement is extremely satisfactory, obtaining mechanical and durability performances superior to the reference ones, enabling the use of these residues for the production of mortars with low cement content.

**Key-words:** Flue Gas Desulfurization (FGD); Ground granulated blast furnace slag; Compressive strength; Mortar with low cement content; mortars with incorporation of residues.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Autores e a composição química do FGD utilizado em cada uma das pesquisas .....	42
Tabela 2 – Autores que utilizaram FGD e EGAF simultaneamente e traço utilizado nas pesquisas .....	42
Tabela 3 – Composição das amostras ensaiadas.....	50
Tabela 4 – Caracterização do resíduo FGD – propriedades e métodos de ensaio...52	
Tabela 5 - Caracterização do resíduo EGAF – propriedades e métodos de ensaio..58	
Tabela 6 – Laudo do cimento CPV - ARI .....	61
Tabela 7 – Caracterização do agregado miúdo.....	62
Tabela 8 –Traços (em volume) de argamassa e suas referências.....	63
Tabela 9 – Volume de água mínimo, máximo e adotado para o ensaio de tanque...75	
Tabela 10 – Parâmetros U1 e U2 para classificação dos elementos lixiviados.....	78
Tabela 11 – Caracterização do resíduo do processo FGD .....	80
Tabela 12 – Composição química do FGD .....	80
Tabela 13 – Resultados caracterização EGAF.....	81
Tabela 14 – Composição química da EGAF .....	82
Tabela 15 – Análise estatística – ANOVA .....	83
Tabela 16 – Análise estatística – ANOVA .....	87
Tabela 17 – Análise estatística – ANOVA – teor de ar incorporado.....	91
Tabela 18 – Início de tempo de pega por percentual de incorporação.....	98
Tabela 19– Médias dos valores de retenção de água em cada traço .....	98
Tabela 20 – Comparativo de resistência à compressão axial de diferentes pesquisas .....	102
Tabela 21 – Análise estatística – ANOVA .....	102
Tabela 22 - Análise estatística – ANOVA - traço.....	110
Tabela 23 – Valores de módulo de elasticidade dinâmico dos traços ensaiados....	115
Tabela 24 - Coeficiente de capilaridade de cada traço .....	117
Tabela 25 – Teor de cloretos totais – 28 dias.....	118
Tabela 26 – Teor de sulfatos.....	120
Tabela 27 – Taxa de lixiviação total de cada elemento, por traço, em mg/m2.....	122
Tabela 28 – Composição determinada pelo EDS em cada traço.....	123

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Variáveis de pesquisa .....	47
Quadro 2 – Matriz experimental .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Total de emissões antropogênicas anuais de GEE por gases 1970-2010	24
Figura 2 – Emissões de GEE em GtCO <sub>2</sub> e associadas à produção de materiais por material (esquerda) e pelo primeiro uso de materiais em processos de produção subsequentes ou consumo final (direita)	25
Figura 3 – Ensaio de DRX de uma amostra de EGAF	27
Figura 4 – Comparativo dos impactos ambientais entre o cimento com (SBC) e sem adição de escória (TPC)	28
Figura 5 – Morfologia a) gesso natural e b) FGD não tratado	30
Figura 6 - Diagrama de fluxo do método de lavagem a seco por spray	31
Figura 7 – Curvas de taxa de liberação de calor de hidratação de pastas com diferentes finuras	33
Figura 8 - Mapa de contorno de expansão de pastas de escória-gesso-clínquer aos 28 dias	39
Figura 9 – Gráfico tensão x deslocamento	43
Figura 10 – Fluxograma da sequência da metodologia de pesquisa	45
Figura 11 – Fluxograma do programa experimental	46
Figura 12 – Nomenclaturas dos corpos de prova	50
Figura 13 – Amostra do resíduo FGD recebidas no laboratório	51
Figura 14 – Amostra de FGD após homogeneização	52
Figura 15 – Etapas de execução do ensaio de Massa específica (a) Adição de amostra no frasco com querosene (b) Agitação para remoção de bolhas e (c) amostra em repouso para leitura do volume	53
Figura 16 – Ensaio de massa unitária	53
Figura 17 – Etapas de execução dos ensaios de finura – peneiras #200 e #325 (a) Amostra lavada de material retido na peneira (b) Material sendo peneirado e (c) Pesagem de material passante	54
Figura 18 – Execução do ensaio de superfície específica Blaine	54
Figura 19 - pHmetro marca KASVI modelo K39-1014B com amostra da solução contendo o resíduo FGD	55
Figura 20 – Ensaio para a determinação do teor de cloretos totais (a) Titulação da amostra e (b) Adição de solução de nitrato de prata na amostra	56

Figura 21 – Execução de ensaio de teor de sulfatos (a) Filtragem (b) filtros com material retido indo para mufla e (c) cadinhos após queima .....	56
Figura 22 – Amostra do resíduo EGAF recebidas no laboratório .....	57
Figura 23 – EGAF antes da moagem .....	58
Figura 24 – Moinho de bolas e esferas de aço de diferentes tamanhos .....	59
Figura 25 Amostra sendo moldada em forma de corpo de prova cilíndrico .....	64
Figura 26 – (a) Mesa para índice de consistência e (b) amostra compactada em molde troncônico .....	65
Figura 27 – Medição do espalhamento da argamassa, após execução do ensaio ...	65
Figura 28 – a) Recipiente cilíndrico vazio e b) Recipiente contendo amostra .....	66
Figura 29 – Curva temperatura x tempo do traço de referência e retas para determinação do início de pega .....	67
Figura 30 – (a) Recipiente vazio (b) Recipiente contendo amostra e (c) Amostra durante a sucção .....	68
Figura 31 – a) Durante e b) Após a execução do ensaio .....	69
Figura 32 – (a) Amostras antes do rompimento e (b) amostras após rompimento no ensaio de resistência à compressão .....	70
Figura 33 – (a) Amostras antes do rompimento e (b) amostras após rompimento no ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	71
Figura 34 – Equipamento de Ultrassom .....	72
Figura 35 – Câmara controlada .....	73
Figura 36 – (a) Corpos de prova durante ensaio e (b) amostras após ensaio de absorção de água por capilaridade .....	73
Figura 37 – Execução da etapa de filtragem do ensaio de sulfatos .....	74
Figura 38 – Amostras antes e durante o ensaio de tanque .....	76
Figura 39 – Amostras do filtrado para análise química .....	76
Figura 40 – Espectrômetro utilizado para analisar a composição do material lixiviado .....	77
Figura 41 – DRX do FGD .....	81
Figura 42 – DRX da EGAF .....	82
Figura 43 Quadro do teor máximo de cloretos em concretos - NBR 12655:22 .....	119
Figura 44 – MEV traço REF com 100% Cimento Portland .....	124
Figura 45 – MEV traço E60F10 .....	125
Figura 46 – MEV traço E70F10 .....	125

Figura 47 – MEV traço E00F25 .....	126
Figura 48 – MEV traço E60F25 .....	126
Figura 49 – MEV traço E70F25 .....	127
Figura 50 – MEV traço E00F30 .....	127
Figura 51 – MEV traço E60F30 .....	128
Figura 52 – MEV traço E70F30 .....	128

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	62
Gráfico 2 – Média dos índices de consistências.....	83
Gráfico 3 - Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre o índice de consistência.....	84
Gráfico 4 - Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre o índice de consistência.....	85
Gráfico 5 - Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF sobre o índice de consistência .....	86
Gráfico 6 – Médias de densidade de massa .....	87
Gráfico 7 - Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre a densidade de massa.....	88
Gráfico 8 - Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre a densidade de massa.....	89
Gráfico 9 - Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF sobre a densidade de massa .....	90
Gráfico 10 – Teor de ar incorporado .....	91
Gráfico 11 - Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre o teor de ar incorporado .....	92
Gráfico 12 - Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre o teor de ar incorporado .....	93
Gráfico 13 - Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF sobre o teor de ar incorporado .....	94
Gráfico 14 – Curva temperatura x tempo dos tracos contendo 60% de EGAF e variando os percentuais de FGD.....	95
Gráfico 15 – Curva temperatura x tempo dos tracos contendo 70% de EGAF e variando os percentuais de FGD.....	96
Gráfico 16 – Curva temperatura x tempo dos traços contendo 0% de EGAF e variando os percentuais de FGD.....	97
Gráfico 17 – Curvas de carga x deslocamento.....	100
Gráfico 18 – Médias de resistência à compressão axial nas idades de 7, 28 e 91 dias .....	101

Gráfico 19 – Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre a resistência à compressão axial .....	103
Gráfico 20 – Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre a resistência à compressão axial .....	104
Gráfico 21 – Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão axial .....	105
Gráfico 22 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD e EGAF sobre a resistência à compressão axial .....	106
Gráfico 23 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD e a idade sobre a resistência à compressão axial .....	107
Gráfico 24 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de EGAF e a idade sobre a resistência à compressão axial.....	108
Gráfico 25 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF e a idade sobre a resistência à compressão axial.....	109
Gráfico 26 – Médias de resistência à tração por compressão diametral nas idades de 7, 28 e 91 dias.....	110
Gráfico 27 – Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre a resistência à tração por compressão diametral.....	111
Gráfico 28 – Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre a resistência à tração por compressão diametral.....	112
Gráfico 29 – Efeito isolado da idade sobre a resistência à tração por compressão diametral.....	113
Gráfico 30 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF e a idade sobre a resistência à tração por compressão diametral .....	114
Gráfico 31 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD e EGAF sobre o módulo de elasticidade dinâmico .....	116
Gráfico 32 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD e EGAF sobre o coeficiente de capilaridade .....	117

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI – American Concrete Institute

AFt – Etringita

AFm – Monosulfoaluminato de cálcio

$Al_2O_3$  – Óxido de alumínio

CaO – Óxido de cálcio

$CaCO_3$  – Calcita

$CaSO_4 \cdot 2H_2O$  – Sulfato de cálcio

$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$  – Hemihidrato

$Ca(OH)_2$  – Hidróxido de cálcio

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

CETEM-ES – Laboratório do centro de tecnologia mineral

CP – Cimento Portland

DRX – Difração por Raios-X.

EDS – *Electron dispersion spectroscopy*.

EGAF – Escória Granulada de Alto-forno

$Fe_2O_3$  – Óxido de ferro III

FGD – Flue Gas Desulfurization

FRX – Fluorescência de Raios-X

GEE – Gases de Efeito Estufa

HCl – Ácido clorídrico

HF – Fluoreto de hidrogênio

IAB – Instituto Aço Brasil

LEMAC – Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

LUCCAR – Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins

MEV –: Microscopia eletrônica de varredura.

MgO –: Óxido de magnésio

NO<sub>x</sub> – Óxidos de nitrogênio

OMS –: Organização Mundial da Saúde

SiO<sub>2</sub> –: Sílica

SO<sub>x</sub> – Óxidos de enxofre

SO<sub>2</sub> – Dióxido de enxofre

SO<sub>3</sub> – Trióxido de enxofre

SNIC –:Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

IPCC –:Intergovernmental Panel on Climate Change

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	21
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA .....	22
1.3	OBJETIVOS .....	23
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>23</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
2.1	GERAÇÃO DE COPRODUTOS SIDERÚRGICOS .....	24
2.1.1	ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO (EGAF) .....	26
2.1.2	PROCESSO DE DESSULFURIZAÇÃO DE GASES DE COMBUSTÃO (FGD) 28	
2.2	CIMENTO PORTLAND E MATERIAIS ALTERNATIVOS.....	32
2.3	INCORPORAÇÃO DE COPRODUTOS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	33
2.4	COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	42
<b>3</b>	<b>ABORDAGEM METODOLÓGICA</b> .....	<b>45</b>
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	45
3.1.1	VARIÁVEIS DE PESQUISA.....	47
3.1.2	MATRIZ EXPERIMENTAL .....	48
3.2	NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS .....	50
3.3	MATERIAIS .....	51
3.3.1	COPRODUTOS SIDERÚRGICOS .....	51
3.3.1.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO PROCESSO FGD.....	51
3.3.1.1.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	52
3.3.1.1.2	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS .....	55
3.3.1.1.3	CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS .....	57
3.3.1.2	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO (EGAF) 57	
3.3.1.2.1	PRÉ-TRATAMENTO .....	59
3.3.1.2.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	60
3.3.1.2.3	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS .....	60
3.3.1.2.4	CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS .....	60

3.3.2	CIMENTO PORTLAND .....	60
3.3.3	AGREGADO MIÚDO.....	61
3.3.4	ÁGUA.....	62
3.4	MÉTODOS .....	63
3.4.1	DOSAGEM E MISTURA DAS ARGAMASSAS .....	63
3.4.2	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	64
3.4.2.1	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA – ABNT NBR 13276:2016 .....	64
3.4.2.2	DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO – ABNT NBR 13278:2005.....	66
3.4.2.3	CALORIMETRIA .....	66
3.4.2.4	RETENÇÃO DE ÁGUA – ABNT NBR 13277:2005 .....	67
3.4.2.5	SQUEEZE FLOW – ABNT NBR 15939:2010 .....	69
3.4.3	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	69
3.4.3.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL – ABNT NBR 7215:2019 .....	70
3.4.3.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL – ABNT NBR 7222:2011.....	70
3.4.3.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO – ABNT NBR 15630: 2008 .....	71
3.4.3.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE – ABNT NBR 15259: 2005 .....	72
3.4.3.5	DETERMINAÇÃO DE CLORETOS - MÉTODO ARGENTOMÉTRICO / MÉTODO DE MOHR.....	74
3.4.3.6	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE SULFATOS .....	74
3.4.3.7	LIXIVIAÇÃO DE CONTAMINANTES - EA NEN 7375:2004 .....	75
3.4.3.8	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA – MEV .....	78
3.5	ANÁLISE DE RESULTADOS .....	79
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>80</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO PROCESSO FGD.....	80
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO MOÍDA .....	81
4.3	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO .....	83
4.3.1	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA .....	83
4.3.2	DENSIDADE DE MASSA.....	86
4.3.3	TEOR DE AR INCORPORADO .....	90
4.3.4	CALORIMETRIA .....	94
4.3.5	RETENÇÃO DE ÁGUA .....	98

4.3.6	SQUEEZE FLOW.....	99
4.4	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	101
4.4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL .....	101
4.4.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	110
4.4.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	114
4.4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	116
4.4.5	TEOR DE CLORETOS TOTAIS.....	118
4.4.6	TEOR DE SULFATOS .....	120
4.4.7	LIXIVIAÇÃO DE CONTAMINANTES .....	121
4.4.8	ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	123
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>130</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>133</b>
	REFERÊNCIAS.....	134

## 1 INTRODUÇÃO

As matrizes cimentícias, em geral, têm seu uso amplamente difundido na construção civil, e seus constituintes estão dentre os materiais mais utilizados no mundo. Para atender a toda essa demanda de produção, são necessárias a extração de quantidades significativas de recursos naturais, que, por sua vez, geram grandes impactos ambientais (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2016).

A média mundial de consumo de cimento é de 553 kg/habitante/ano, e no Brasil essa média é de 260kg/habitante/ano. A projeção é que, à medida que Brasil melhore seus índices de desenvolvimento, como a diminuição do déficit habitacional e o crescimento da sua infraestrutura, essa média se aproxime da mundial, aumentando consideravelmente o seu consumo de cimento per capita (SNIC, 2019).

A indústria do aço também tem papel importante no crescimento e desenvolvimento do Brasil. Segundo o Instituto Aço Brasil (IAB), em 2019 o setor foi responsável pela produção mundial de 1,875 bilhão de toneladas de aço bruto, sendo 32,6 milhões de toneladas produzidas no Brasil. Igualmente expressivos são os números de resíduos gerados nessa produção. Estima-se que cerca de 600 kg de resíduo são gerados para cada tonelada de aço bruto produzido.

De acordo com Carvalho (2002), os estudos com matrizes cimentícias incorporados com escória granulada de alto-forno apresentam uma mistura com menor quantidade de poros, maiores tempos de pega, maior resistência a longo prazo, menores taxas de retração na mistura plástica, menores taxas de segregação e exsudação e baixo calor de hidratação, logo, é menos propenso a formação de fissuras. A sua maior durabilidade está atrelada a uma menor quantidade de poros e menor probabilidade de fissuras, portanto, é menos suscetível a ataques de sulfatos e cloretos.

A queima do carvão nas indústrias constitui-se em um importante emissor de gases poluentes, dentre eles, o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), que por sua vez oferece risco tanto a saúde humana quanto ao meio ambiente. Diante disso, os países têm sido forçados a criar legislações que controlem a emissão desse contaminante (FRANÇA, 2019).

Para controlar a emissão desse contaminante, o processo de dessulfurização de gases de combustão (*flue gas desulphurization* - FGD) tem sido muito adotado, por conta de sua alta eficiência e menor custo quando comparado a outros processos.

Porém, durante esse processo é gerado uma grande quantidade de resíduo, conhecido como FGD.

A eficácia da utilização da EGAF (Escória Granulada de Alto-forno) em conjunto com o cimento Portland em matrizes cimentícias de cimento Portland, está intimamente ligada as suas propriedades cimentícias. Os principais fatores que necessitam ser estudados e analisados para viabilizar essa incorporação são: a composição química da EGAF, concentração de álcali do sistema de reação, o teor de vidro da escória, a finura da EGAF e do cimento Portland e a temperatura durante as fases iniciais do processo de hidratação (ACI 233R).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A destinação dessa quantidade expressiva de resíduos é um desafio importante para o setor. Alguns desses resíduos estão se tornando matéria-prima para outras indústrias, inclusive para a construção civil, tornando-se um coproduto (IAB, 2019).

De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, muitos coprodutos da indústria do aço, devido a suas características físicas e mineralógicas, vêm sendo incorporados a produção de cimento Portland, reduzindo as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e a necessidade de extração de novas matérias-primas.

Além de reduzir os impactos ambientais, as adições frequentemente apresentam vantagens relacionadas com a maior durabilidade e vida útil. Dentre os coprodutos mais utilizados estão a escória granulada de alto-forno e as cinzas volantes (SNIC, 2019). Neste trabalho serão abordados dois coprodutos siderúrgicos, a escória granulada de alto-forno (EGAF) e o FGD, utilizados simultaneamente numa mistura cimentícia.

O processo de produção do Cimento Portland possui alta emissão de CO<sub>2</sub>, Por isso, é crescente a busca por materiais que sejam alternativos (TRENTIN, MAGRO et al., 2019).

Os materiais alternativos para uso como aglomerantes em misturas estão sendo desenvolvidos e estudados com o intuito de reduzir o impacto ambiental da construção, incorporar resíduos e melhorar o desempenho de argamassas e concretos. Como a utilização de materiais alternativos incorporados nas matrizes cimentícias apresentam diferenças na química tradicional do cimento Portland, e não foram tão extensivamente utilizados, não se beneficiam diretamente dos anos de

estudo, e por isso há muito menos informações sobre seus mecanismos de reação, desenvolvimento de propriedades e durabilidade.

Além de a redução de emissão de CO<sub>2</sub>, há o interesse de incorporar os resíduos de outras indústrias. O Cimento Portland já incorpora parte desses resíduos, mas em quantidades limitadas, se mantendo sempre como o material de maior percentual na mistura. Porém, é possível ir além disso, criando misturas com praticamente 100% de resíduos, diminuindo o consumo de cimento Portland. Os estudos têm mostrado que além do benefício ambiental, os materiais alternativos têm mostrado bons desempenhos em situações em que o desempenho do Cimento Portland é abaixo do desejado, como em ambientes com altas concentrações de sulfato (JUENGER, WINNEFELD et al., 2010).

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Diante do exposto, é importante o desenvolvimento de estudos mais frequentes de materiais alternativos, adotando medidas que visem a transformação cada vez maior dos resíduos siderúrgicos em coprodutos para outras indústrias, diminuindo a necessidade de áreas para destinação desses resíduos e os impactos ambientais.

Para viabilizar a utilização da substituição da escória granulada de alto-forno e o FGD, será necessário conhecer suas características individuais de cada um e, posteriormente, avaliar o comportamento quando estão associados na matriz cimentícia.

Esta pesquisa visa contribuir para desenvolver as análises da substituição desses coprodutos na matriz cimentícia, verificar o seu comportamento, além de possíveis vantagens e desvantagens dessas substituições. Além de análises mecânicas, é fundamental o conhecimento das suas propriedades no âmbito ambiental, como a lixiviação de contaminantes e aspectos de durabilidade, como a maior ou menor suscetibilidade à penetração de água, cloretos e sulfatos.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho mecânico, ambiental e de durabilidade de argamassas produzidas com substituição total e parcial de cimento Portland por EGAF e FGD.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os coprodutos siderúrgicos possibilitando a análise de suas características físicas, químicas, mineralógicas e ambientais;
- Avaliar o efeito de diferentes percentuais de substituição de coprodutos nas propriedades das argamassas no estado fresco, por meio dos ensaios de índice de consistência, densidade de massa, tempos de pega e retenção de água;
- Analisar as propriedades mecânicas das argamassas de diferentes traços, com diferentes percentuais de substituição no estado endurecido, como a resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico;
- Analisar as propriedades relacionadas a durabilidade, das argamassas de diferentes traços com diferentes percentuais de substituição no estado endurecido, como a penetração de cloretos e sulfatos e absorção de água por capilaridade;
- Avaliar propriedades ambientais, como a lixiviação de contaminantes nas argamassas de diferentes traços com diferentes percentuais de substituição de coprodutos e
- Analisar a microestrutura das argamassas, através do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

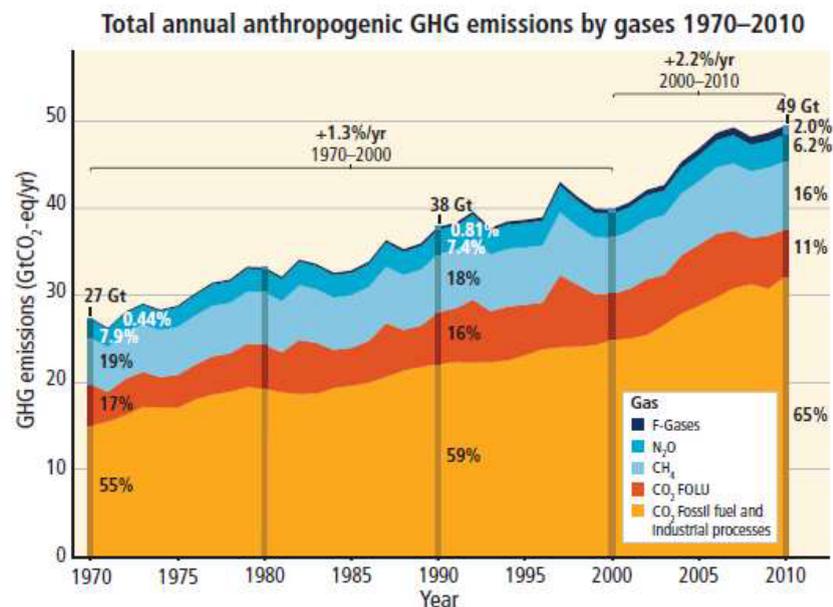
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Geração de coprodutos siderúrgicos

Dentre os vários coprodutos gerados pela indústria do aço, este trabalho abordará a escória granulada de alto-forno e o resíduo do processo de dessulfurização de gases de combustão (FGD).

Os esforços mundiais para a mitigação das mudanças climáticas não estão tendo impacto significativo na redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE). As emissões antrópicas totais de GEE continuaram a aumentar de 1970 a 2010, com aumentos expressivos entre 2000 e 2010, atingindo em 2010 um total de 49 GtCO<sub>2</sub>-eq/ano. A combustão de combustíveis fósseis e processos industriais, incluindo a fabricação do cimento e aço, foi responsável pela maior parcela de aumento do total de emissões, 78% (IPCC, 2014), conforme apresentado na figura 1.

Figura 1 - Total de emissões antropogênicas anuais de GEE por gases 1970-2010



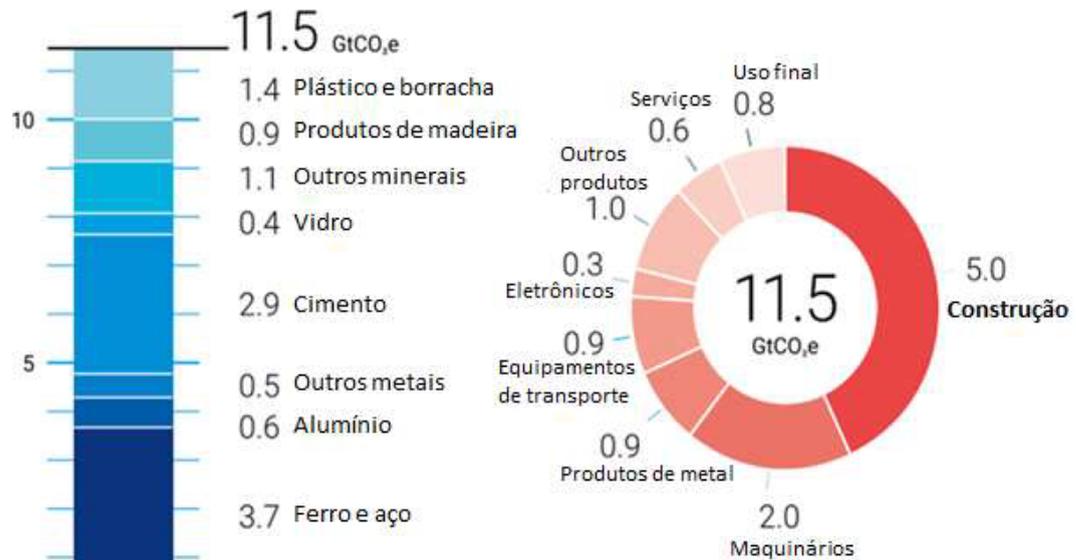
Fonte: IPCC (2014)

No gráfico da Figura 1 é possível observar que a combustão dos combustíveis fósseis e processos industriais, correspondem a cerca de 65% do total de emissões anuais, ou seja, quase 32 GtCO<sub>2</sub>-eq/ano em 2010.

Em 2015, as emissões de GEE associadas a produção de materiais de construção totalizaram cerca de 5 GtCO<sub>2</sub>-eq das 11,5 GtCO<sub>2</sub>-eq totais. Os índices

mais representativos são das emissões de 3,7 GtCO<sub>2</sub>-eq correspondente a produção de ferro e aço e 2,9 da produção de cimento, conforme pode ser visto na figura 2.

Figura 2 – Emissões de GEE em GtCO<sub>2</sub>e associadas à produção de materiais por material (esquerda) e pelo primeiro uso de materiais em processos de produção subsequentes ou consumo final (direita)



Fonte: Adaptado de Emissions Gap Report (2019)

Os níveis de emissão de gás metano estão aumentando e seu efeito é mais danoso do que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no aquecimento global. Estudos apontam que a diminuição da sua emissão pode evitar o aumento de quase 0,3 °C até 2040 (BREATHHELIFE, 2021). Além disso, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o desenvolvimento e a saúde de 93% das crianças com menos de 15 anos já está comprometido, uma vez que estão submetidas a níveis altíssimos de poluição do ar. Em 2016, 600 mil crianças morreram em função de infecções respiratórias agudas.

Alguns países possuem legislações específicas para limitar as emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), NO<sub>x</sub> e outros poluentes agressivos. Para controlar essas emissões, o processo de dessulfurização de gases de combustão (FGD) tem sido muito adotado. Podendo ser divididos em processos úmidos, secos e semissecos (KOUKOUZAS; VASILATOS, 2008).

O limite de emissão de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) por usinas de energia, movidas a carvão na China sofre drásticas reduções com o passar dos anos. O limite que era de 2100 mg.m<sup>-3</sup> em 1996 passou para 100mg.m<sup>-3</sup> em 2012. Desta forma, as usinas foram obrigadas a instalar equipamentos de dessulfurização de gases de combustão, reduzindo a poluição atmosférica. No entanto, esse processo gera toneladas de

resíduos FGD todos os anos. Logo, a utilização do FGD como coproduto é extremamente relevante, tanto no âmbito econômico, quanto de gestão de recursos e proteção do meio ambiente (ZHONG; NI; LI, 2012).

O resíduo FGD foi tema de diversas pesquisas que o estudaram como substituto do gesso natural ou como retardador do tempo de pega, porém, até 2018, de acordo com Jiang, Li et al. (2018) nenhum trabalho foi publicado analisando o efeito do FGD no desempenho de concretos com grandes quantidades de escória de alto-forno.

### **2.1.1 Escória Granulada de Alto-forno (EGAF)**

A escória granulada de alto-forno (EGAF) é obtida durante a produção de ferro-gusa. As cinzas do carvão utilizado para aquecer os altos-fornos são misturadas com as impurezas contidas no minério e são liberadas pelo processo de aquecimento do óxido de ferro do minério a 1400 °C (CARVALHO, 2002). Para a liberação das impurezas, além do combustível, é necessário a adição de um fundente. Os mais utilizados são a cal, calcários calcíticos e magnesianos. Os fundentes, por sua vez, reduzem o ponto de fusão da mistura, onde torna-se possível a separação da escória. Neste momento, ela encontra-se na forma líquida, com temperatura variando entre 1350 e 1500 °C. (SILVA, M. G. et al., 2017). Seguido de um método de resfriamento, podendo ser rápido ou lento.

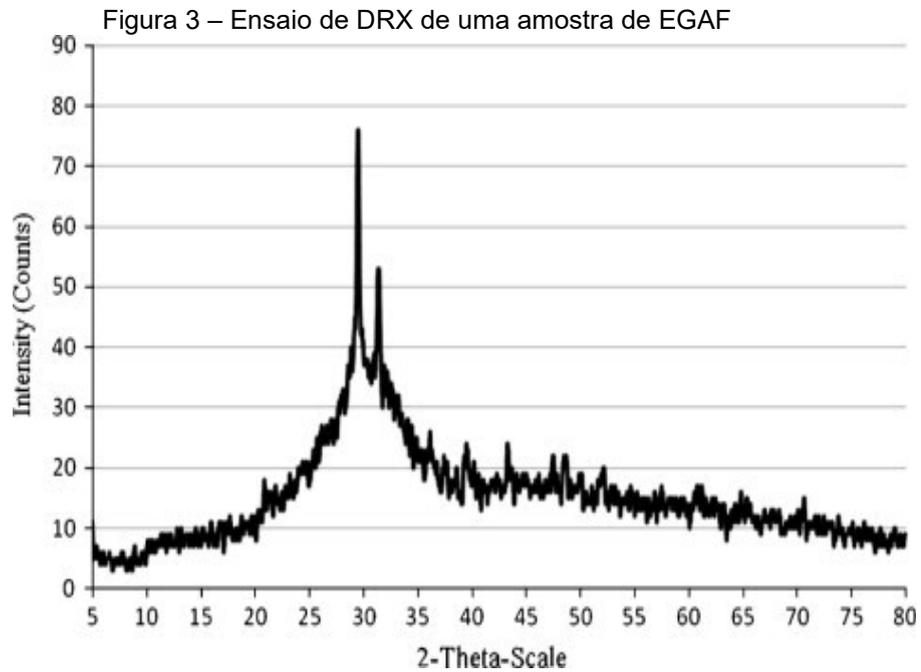
De acordo com o método de resfriamento adotado, há variações na composição e na estrutura física da escória. Quando o resfriamento é rápido, há uma fragmentação da escória em forma de grãos (NEVILLE, 2016).

A escória de alto-forno é um produto não metálico, composta essencialmente de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. Pode ser resfriada ao ar, expandida ou granulada de alto-forno (ACI 116R).

As características, densidade e granulometria também variam em função do tipo de resfriamento. No resfriamento rápido, não é possível a formação de núcleos cristalinos, logo, seu nível de energia e reatividade é mais elevado e o material adquire uma capacidade ligante (SILVA, M. G. et al., 2017).

No ensaio de Difração de Raio X (DRX) é possível identificar as fases vítreas e cristalinas de uma amostra. S. Teng et al. (2013) realizaram o ensaio em uma amostra de EGAF e foi possível verificar que a amostra de EGAF analisada é composta quase

totalmente por fases vítreas, uma vez que há pouca identificação de picos cristalinos, conforme observa-se na figura 3.



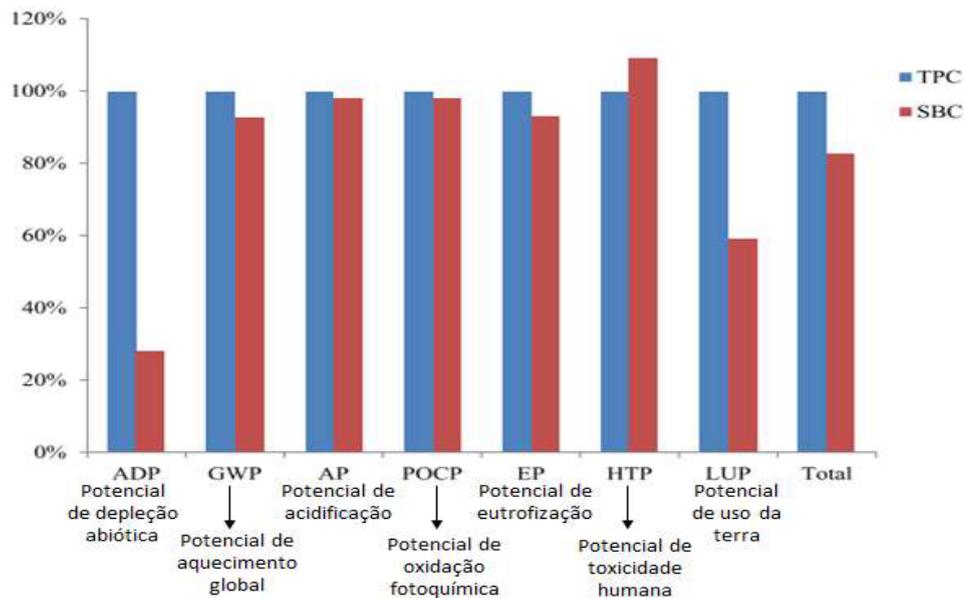
Após a fragmentação, o aspecto da EGAF é semelhante a um grão de areia, porém, com um formato mais angular. Para ser utilizada como material cimentício, é necessário passar por um processo de moagem subsequente, onde adquire a denominação escória de alto-forno granulada moída. Esse processo de moagem também pode ser realizado juntamente com o clínquer (SILVA, CLETO et al., 2018).

A cada tonelada de ferro-gusa produzido, são gerados cerca de 300 kg de EGAF. Os óxidos que compõem a escória são os mesmos do cimento Portland, porém, em diferentes proporções, são principalmente o óxido de cálcio, sílica e alumina (NEVILLE, 2016).

Estudos de Y. Li et al. (2016) possibilitaram uma avaliação do impacto ambiental causado pela utilização de EGAF na produção de Cimento Portland em fábricas em Pequim, baseado nas normas de Avaliação do Ciclo de Vida - ISO 14040 e 14044. Para esse estudo foi considerado um cimento com 100% de clínquer e o outro com 5 a 20% de EGAF, avaliando as etapas de berço ao portão de fábrica: produção de cimento, produção de EGAF, mineração das matérias-primas (calcário, arenito, minério de ferro e gesso), transporte (transporte rodoviário e ferroviário) e geração de energia (carvão bruto, petróleo bruto e eletricidade), mas não envolveu as

fases de uso e descarte. A unidade funcional definida foi de 1 kg de cimento com resistência à compressão de 42,5 MPa. Os resultados obtidos estão apresentados no gráfico da figura 4. Ao comparar os impactos ambientais entre o cimento Portland tradicional e com adição de escória, o único índice que apresentou aumento foi o da toxicidade humana, devido a necessidade de uma etapa de moagem da escória, que resultou em um aumento do consumo de eletricidade.

Figura 4 – Comparativo dos impactos ambientais entre o cimento com (SBC) e sem adição de escória (TPC)



Fonte: Adaptado de Li et al. (2016)

A redução total de impacto ambiental foi de 17%. As maiores reduções ocorreram no potencial de esgotamento abiótico e o potencial de uso da terra, que diminuíram significativamente em 72% e 41%, respectivamente. Desta forma, concluíram que a utilização da escória de alto-forno, em substituição ao clínquer, é benéfica, pois, além de reduzir significativamente o impacto ambiental, com a melhor gestão dos resíduos e diminuição da emissão de gases poluentes da indústria do cimento, apresenta uma economia significativa de recursos terrestres e favorece a conservação desses recursos naturais. O aumento do uso do consumo de eletricidade pode ser mitigado com o ajuste da estrutura da rede de energia no futuro (LI et al., 2016).

### 2.1.2 Processo de Dessulfurização de Gases de Combustão (FGD)

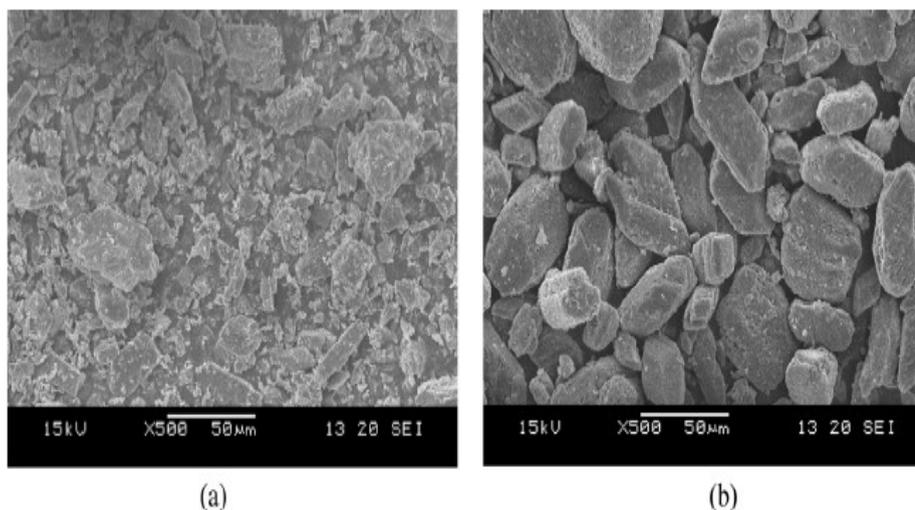
O processo de Dessulfurização de Gases de Combustão (FGD) possui basicamente duas classificações. A primeira é baseada na maior ou menor necessidade de utilização água durante o processo, podendo ser úmido, semi-seco ou seco. Mais de 80% dos processos instalados é do tipo úmido, seguidos pelos semissecos (cerca de 10%) e secos. Além disso, os processos também podem ser classificados em “passagem única” ou “regenerável”, onde no primeiro há o descarte do reagente utilizado no processo e, no regenerável, o reagente é reciclado e retorna ao processo, caracterizando um sistema cíclico. Esse processo tende a ser adotado em locais onde não há disponibilidade de área para descarte e/ou quando não há mercado de compra para os resíduos gerados, além de possuir custo de mais elevado para implantação e operação (CARPENTER, 2012).

Durante a queima do carvão, o enxofre reage com o oxigênio, formando dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e menores quantidades de trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ). A preocupação com essas emissões está ligada aos danos que eles podem causar, tanto para a saúde humana quanto nos equipamentos. O  $\text{SO}_2$  está associado a poluição urbana, riscos à saúde e formação da chuva ácida. O  $\text{SO}_3$ , dependendo da quantidade, pode formar ácido sulfúrico, causando corrosão nos equipamentos da usina. Como o  $\text{SO}_2$  e o  $\text{SO}_3$  são ácidos, para serem removidos, necessitam de uma reação com um reagente alcalino adequado. A eficácia do reagente vai depender da sua composição, tamanho da partícula, morfologia, temperatura, dentre outros (CARPENTER, 2012).

A composição do gesso FGD seco ao ar é principalmente sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Quando o resíduo é proveniente de processos úmidos contém elevada umidade. Logo, para que se torne viável a sua incorporação, ele deve passar pelo processo de calcinação, transformando-se em hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) (GUO; SHI, 2013).

Um estudo proposto por D.-Y. Lei et al. (2017) compara materiais de construção de alta resistência elaborados com gesso natural e gesso FGD. A distribuição granulométrica do gesso natural é melhor, em contrapartida, as partículas de FGD são mais limpas e possuem formato colunar. A morfologia do gesso natural e gesso FGD pode ser verificado na figura 5. A porosidade do FGD nas primeiras idades é maior, porém, com o aumento da idade de hidratação, os poros são preenchidos por etringita, sua microestrutura fica mais densa, a taxa de encolhimento é pequena e a resistência ao gelo e a água foram excelentes.

Figura 5 – Morfologia a) gesso natural e b) FGD não tratado



Fonte: Lei; Guo et al. (2017)

Koukouzas; Vasilatos (2008) investigaram as características mineralógicas do FGD e encontraram um material puro, idêntico ao gesso mineral natural, possuindo teores semelhantes de óxido de cálcio (CaO) e óxido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) e menores teores de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). As características do FGD variam de acordo com a composição do carvão, e das cinzas volantes utilizadas, além das condições de combustão e proporção adotada de reagentes.

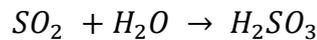
### 1.3.2.1 Processos Úmidos

Os purificadores úmidos foram criados no final dos anos 1960 e possuem uma ampla aplicação, por conta da sua eficiência e custo-benefício quando comparados aos sistemas semissecos e secos. Além da sua alta taxa de remoção de SO<sub>2</sub> (>98%), esse processo conta com a remoção de mercúrio oxidado, ácido clorídrico (HCl) e fluoreto de hidrogênio (HF), podendo ser utilizados em usinas que utilizam carvão com baixos ou altos índices de enxofre. Os reagentes possíveis de utilização são a cal, óxido de magnésio, amônia e carbonato de cálcio. Por conta da disponibilidade e preço, o reagente mais utilizado é o calcário (CARPENTER, 2013).

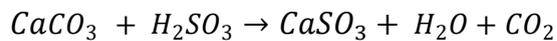
Dentro do processo úmido, o consumo de água vai depender do tipo de planta, do sistema de refrigeração empregado, do processo FGD e outros fatores. A maior demanda de água nesse processo é nas torres de resfriamento. Dentro da torre de pulverização, o reagente em forma de pasta é bombeado e pulverizado, absorvendo o SO<sub>2</sub> do gás de combustão. O HCl presente no gás também é absorvido e reage com

o calcário, formando cloreto de cálcio. Parte da água contida na pasta evapora, resfriando o gás e saturando-o com água. Após esse procedimento, o gás de combustão limpo passa por eliminadores de névoa para remover as gotículas aprisionadas e é liberado para atmosfera. Em seguida, ocorre o procedimento de oxidação forçada, onde é injetado ar comprimido no tanque de reação para oxidar o sulfito de cálcio hidratado em sulfato de cálcio hidratado (gesso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). O gesso é posteriormente transportado para um sistema de processamento, onde é desidratado e processado para produzir um produto de qualidade vendável ou que em último caso, que será enviado para aterro sanitário (CARPENTER, 2013).

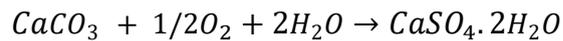
As principais reações que ocorrem são:



Equação 1



Equação 2

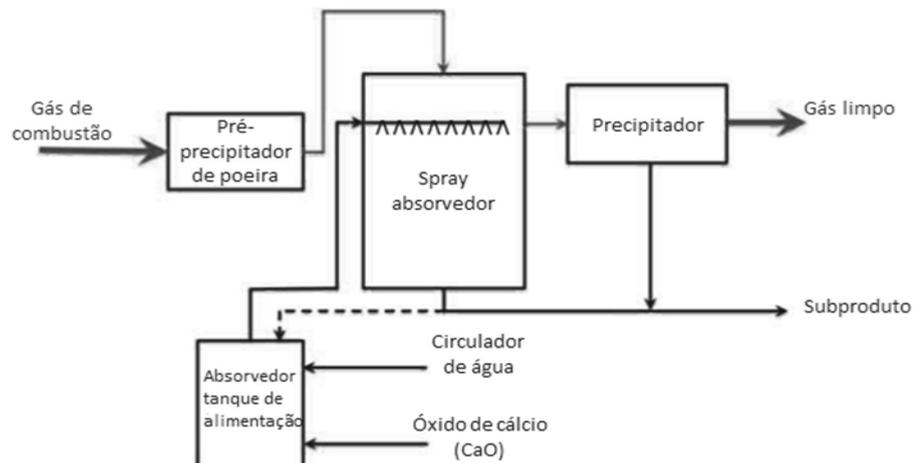


Equação 3

### 1.3.2.2 Processos Semi-secos e Secos

O processo FGD semi-seco é o segundo mais amplamente utilizado no mundo. Sua eficiência de remoção de  $\text{SO}_2$  é alta (em torno de 90%). Porém, esse processo possui limitações de taxa de fluxo de volume, suportando um fluxo de até  $0,90 \times 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$  e só são eficientes para plantas que utilizam um combustível com teor máximo de enxofre de 3,50%. Nesse processo o reagente mais comum é a cal (POULLIKKAS, 2015)

Figura 6 - Diagrama de fluxo do método de lavagem a seco por spray



Fonte: Adaptado de Poullikkas (2015).

A figura 6 apresenta um exemplo de funcionamento de um sistema seco. Nos processos semi-secos e secos, o reagente pode ser injetado ou pulverizado na corrente de gás ou, ainda, promover a passagem do gás de combustão através do reagente em um recipiente separado. Ao entrar em contato com o gás, o reagente reage diretamente com o  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , formando sulfitos e sulfatos de cálcio, também incluindo carbonatos e parte da cal que não sofreu reação (CARPENTER, 2012).

## 2.2 CIMENTO PORTLAND E MATERIAIS ALTERNATIVOS

Até o ano de 1991, os cimentos não recebiam nenhum tipo de adição mineral (escória de alto-forno, cinza volante, filler calcário, sílica ativa etc.). As adições minerais possuem comportamentos diferentes quando adicionados à matriz cimentícia. Quanto ao critério de hidratação, a diferença está na interação da adição com os demais compostos coexistentes na mistura. Quando ela não necessita de outros compostos para se hidratar, ela possui caráter hidráulico. Porém, quando necessita das reações químicas com outros compostos é denominada hidraulicidade latente. Quando ela não sofre hidratação, mas tem função importante nas propriedades das matrizes cimentícias, denomina-se inerte, como o filler (NEVILLE, 2016).

Além de reduzir os impactos ambientais, as adições frequentemente apresentam vantagens relacionadas com a maior durabilidade e vida útil. Dentre os coprodutos mais utilizados na construção civil, estão a escória granulada de alto-forno e as cinzas volantes (SNIC, 2019).

O processo de produção do Cimento Portland possui alta emissão de  $\text{CO}_2$ , por isso, cresce a busca por materiais alternativos. (TRENTIN; MAGRO et al., 2019)

Além da redução de emissão de  $\text{CO}_2$  há o interesse de incorporar os resíduos de outras indústrias. O Cimento Portland já incorpora parte desses resíduos, mas em quantidades limitadas. Porém, é possível ir além disso, criando misturas com praticamente 100% de resíduos, diminuindo consideravelmente o consumo de cimento Portland. Os estudos têm mostrado que além do benefício ambiental, os materiais alternativos têm mostrado bons desempenhos em situações em que o desempenho do Cimento Portland é abaixo do desejado, como em ambientes com altas concentrações de sulfato. (JUENGER; WINNEFELD et al., 2010)

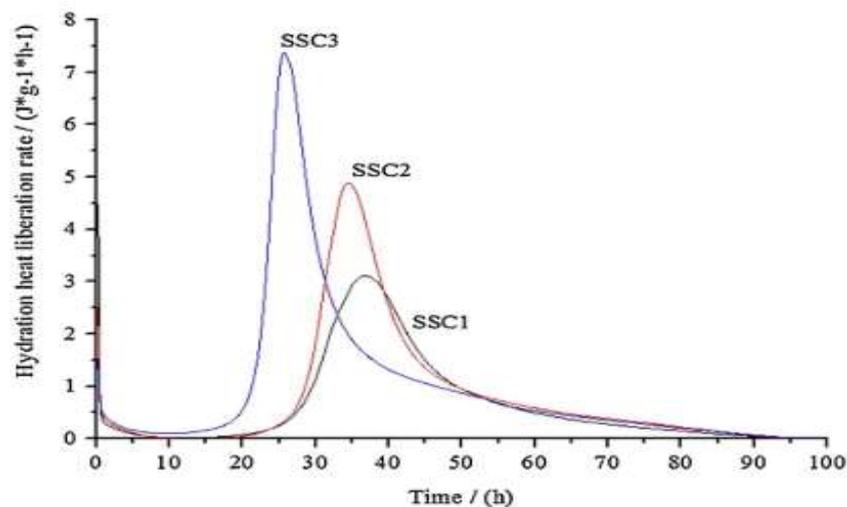
Os materiais alternativos para ligantes estão sendo desenvolvidos e estudados

com o intuito de reduzir o impacto ambiental da construção, incorporar resíduos e melhorar o desempenho de argamassas e concretos.

A finura das matérias-primas constituintes do cimento possui influência direta nas propriedades de hidratação. Quanto maior a finura, maior será a área de superfície específica e conseqüentemente uma maior emissão de calor de hidratação. (LIU; WANG et al., 2015).

Liu e Wang et al. (2015) estudaram o comportamento de hidratação de pastas contendo cimentos com altos teores de EGAF e água. Na figura 7, é possível verificar o gráfico da taxa de liberação de calor em função do tempo.

Figura 7 – Curvas de taxa de liberação de calor de hidratação de pastas com diferentes finuras



Fonte: Liu e Wang et al. (2015)

A pasta SSC3 é a que possui maior área de superfície específica, seguida da SSC2 e SSC1, logo, quanto maior a área de superfície específica, maiores foram as taxas de liberação de calor. Além disso, verificaram que, devido ao alto teor de EGAF contido nas pastas, os períodos de indução foram mais longos quando comparadas com as pastas produzidas apenas com cimento Portland, devido ao baixo teor de clínquer contido na mistura.

### 2.3 INCORPORAÇÃO DE COPRODUTOS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

A incorporação de coprodutos em matrizes cimentícias precisa ser estudada, uma vez que alterações nos tipos de materiais que compõem a mistura influenciam diretamente nas suas propriedades finais. Logo, além de estudar as características

individuais de cada material, é fundamental estudar a interação entre todos os constituintes das matrizes.

A seleção de quais materiais e a proporção de utilização de cada um deles é essencial para uma matriz cimentícia bem formulada. Isso porque, a granulometria, a composição química e a morfologia de cada material influencia na reologia e no consumo de água da mistura. A inserção de materiais mais finos nas misturas deve ser feita na dosagem adequada, uma vez que ao adicioná-los, demandará uma maior quantidade de água na mistura, já que possuem uma maior área superficial. Por outro lado, a escolha e a adição adequada de finos pode melhorar o empacotamento da mistura, melhorando a sua resistência mecânica e aumentando a sua durabilidade (DAMINELI, 2013).

A utilização de coprodutos em matrizes cimentícias tem se mostrado uma alternativa eficiente para a diminuição do consumo de Cimento Portland. Porém, é necessário cada vez mais estudos para aumentar a eficiência no uso desses materiais nas matrizes cimentícias. De acordo com Damineli (2013) o aumento da eficiência no uso dos ligantes depende diretamente da reologia da mistura, uma vez que é necessário maximizar a mobilidade das partículas com o mínimo teor de água possível, obtendo maiores desempenhos mecânicos com menores teores de ligantes – materiais que durante a sua produção, passam por um processo térmico e emitem  $\text{CO}_2$ , como o clínquer, EAF, cinzas volantes e outros.

O estudo das propriedades reológicas colabora para o entendimento das interações entre os constituintes de uma matriz cimentícia, possibilitando a melhora de suas características.

A estudo para a melhora da reologia da mistura passa por 4 etapas: 1) Controle rigoroso das características das matérias-primas utilizadas; 2) Elaboração de um projeto granulométrico eficiente, com a diminuição do número de vazios; 3) Dispersão das partículas para aumentar a fluidez sem necessitar do aumento do teor de água e 4) Ensaio reológicos adequados, já que o comportamento reológico dessas misturas mais otimizadas é mais complexo (DAMINELI, 2013).

Janavicius et al. (2013) investigaram as propriedades reológicas de diferentes pastas de cimento. A pasta de referência continha apenas Cimento Portland com área de superfície específica de  $360 \text{ m}^2/\text{kg}$ , enquanto na segunda houve a substituição de 70% por cimento de alto-forno (teor máximo de escória de 50%) com área de superfície específica maior, de  $420 \text{ m}^2/\text{kg}$ . A pasta produzida com cimento de alto-

forno apresentou uma tensão de escoamento cerca de 25,9% menor e a viscosidade cerca de 3,5 vezes maior, em comparação com a tensão de escoamento e a viscosidade da pasta de cimento de referência. Além disso, sua curva de fluxo apresentou um comportamento pseudoplástico, onde a viscosidade e a taxa de cisalhamento são inversamente proporcionais. Os resultados revelaram que a forma, finura, densidade e distribuição dos grãos exerceram efeito direto sobre os resultados encontrados.

O processo de hidratação de cimentos contendo a incorporação de EGAF é mais lento, uma vez que a escória necessita de um ativador sulfático (gesso, anidrita) ou alcalino (óxidos, portlandita) para iniciar as reações e por possuir um processo de dissolução mais difícil do que o cimento, devido ao seu caráter vítreo. Esse comportamento mais lento da EGAF ocasiona uma diminuição da taxa de precipitação dos produtos de hidratação responsáveis pela resistência mecânica, acarretando menores resistências iniciais, porém, é possível obter resistências iguais ou maiores do que misturas contendo somente CP, porém, em idades posteriores (CABRERA-MADRID, 2016).

Estudos com matrizes cimentícias incorporados com escória granulada de alto-forno apresentam uma mistura com menor quantidade de poros, maiores tempos de pega, maior resistência a longo prazo, menores taxas de retração na mistura plástica, menores taxas de segregação e exsudação e baixo calor de hidratação, logo, é menos propenso a formação de fissuras. A sua maior durabilidade está atrelada a uma menor quantidade de poros e menor probabilidade de fissuras, portanto, é menos suscetível a ataques de sulfatos e cloretos (CARVALHO, 2002).

Com o intuito de melhorar as resistências iniciais de uma matriz cimentícia que não contém cimento Portland, Rust, Rathbone et al. (2012) estudaram a utilização de sulfato de cálcio hemihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) oriundo da desidratação parcial do gesso FGD, uma vez que é um produto que possui um tempo de cura rápido, associado a cinzas gastas da combustão em leito fluidizado circulante (CFBC) e cinzas volantes. Como resultado, obtiveram um aumento significativo na resistência inicial das argamassas produzidas.

A eficácia da utilização da EGAF em conjunto com o cimento Portland, está intimamente ligada as suas propriedades cimentícias. Os principais fatores que necessitam ser estudados e analisados para viabilizar essa incorporação são: a composição química da EGAF, concentração de álcali do sistema de reação, o teor

de vidro da escória, a finura da EGAF e do cimento Portland e a temperatura durante as fases iniciais do processo de hidratação (ACI 233R).

A utilização da adição mineral EGAF melhora a trabalhabilidade da matriz cimentícia, uma vez que o formato dos grãos proporciona uma redução do atrito entre a pasta e o agregado (LEE, J.; LEE, T., 2020).

A escória necessita de um ambiente alcalino para atingir uma reatividade suficiente. Como são normalmente básicas, as escórias reagem na presença do gesso contido na matriz cimentícia. Dessa forma, quando possui baixo teor de óxido de cálcio (CaO) na mistura, são necessários a adição de um ativador, podendo ser cal hidratada, clínquer, hidróxido alcalino, entre outros. A reatividade depende da composição química e estrutural do vidro, quanto maior a proporção de alumina ( $Al_2O_3$ ) e óxido de cálcio (CaO), mais rápidas serão as reações e maior será a resistência à compressão. Quando a quantidade de alumina está abaixo de 10%, a escória é considerada de baixa reatividade. Quando comparada à de alta reatividade, possui uma menor quantidade de hidróxido de cálcio e uma maior quantidade de sílica ( $SiO_2$ ) e óxido de magnésio MgO (GRUSKOVNJAK; LOTHENBACH et al., 2008).

Esses autores, ao estudarem e compararem matrizes cimentícias com escórias de alta e baixa reatividade, apontam que em ambas os produtos de hidratação são estes: C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado), etringita, gesso e hidrotalcita. Apesar disso, há diferenças significativas no comportamento de desenvolvimento de resistência, na quantidade de formação desses produtos de hidratação, nos mecanismos de crescimento da etringita e na taxa de dissolução da escória. Como a de baixa reatividade possui menor teor de  $Al_2O_3$ , há pouca precipitação de etringita. Além disso, ela se hidrata mais lentamente e necessita de um maior grau de reação para atingir o mesmo grau de preenchimento de poros. Sendo assim, nas primeiras idades a escória de baixa reatividade é mais porosa e conseqüentemente, menos resistente. As resistências tendem a se aproximar à medida que as idades aumentam.

Masoudi e Hooton (2019) também investigaram os mecanismos de hidratação de escórias de alta e baixa reatividade e obtiveram resultados semelhantes aos descritos por Gruskovnjak; Lothenbach et al. (2008). O aumento da finura desenvolveu um aumento na reatividade da escória. Esses dois parâmetros juntamente com a composição química da escória, impactaram significativamente na hidratação e na resistência mecânica das misturas. A resistência à compressão das argamassas contendo escórias com baixa alumina pode ser melhorada aumentando a taxa de

dissolução da escória por meio de técnicas de ativação.

A reatividade das escórias pode ser determinada baseada no teor de Alumina em sua composição. Segundo Gruskovnjak; Lothenbach et al. (2008) quando essa quantidade está abaixo de 10%, a escória é considerada de baixa reatividade.

De acordo com Pal, Mukherjee e Pathak (2003) a reatividade da escória varia de acordo com a fonte de escória, o tipo de matéria-prima utilizada, o método e a taxa de resfriamento e é umas das características importantes para avaliar a eficácia da utilização desta em matrizes cimentícias.

Na literatura é possível encontrar diferentes maneiras de identificar a basicidade das escórias. Uma delas consiste em verificar a proporção entre o CaO e a SiO<sub>2</sub> (C/S). Se a proporção C/S for maior que 1, ou seja, quando temos mais quantidade de CaO, a escória possui caráter semelhante ao óxido, ou seja, é básica. Já se a proporção C/S for menor do que 1, onde há maior quantidade SiO<sub>2</sub>, o caráter da escória é ácido (JOHN, 1995). Quanto mais básica for a escória, maior será a sua atividade hidráulica na presença de algum ativador alcalino, como o Cimento Portland, por exemplo (ÖZBAY et al., 2016).

A NBR 16697 (ABNT, 2018) de cimento determina que a composição da EGAF deve obedecer a proporção descrita na equação 4.

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1,00$$

Equação 4

Para garantir a correta dissolução da escória e a formação dos produtos hidratados, é imprescindível a dosagem correta do ativador alcalino e do sulfato de cálcio e estas quantidades estão intimamente ligadas ao desempenho da mistura (GRACIOLI, VARELA et al., 2017).

No estudo proposto por S. Rubert et al. (2018), foi observado que o teor de ativador alcalino influenciou a resistência a compressão, o calor de hidratação, os valores de pH, o consumo de anidrita e a formação de C-S-H. A influência foi ainda maior nas amostras cujo traço possuía altos percentuais de sulfato de cálcio (20%).

A formação de etringita é fundamental para a evolução das reações na matriz cimentícia e no desenvolvimento da resistência. De acordo com Mun, Hyung. et al. (2007), se o ativador alcalino for muito forte ou estiver superdosado, ele aumenta o pH da mistura tornando-a alcalina, com pH acima de 13, dificultando a produção da etringita nas primeiras idades, que é influenciada pelo pH da solução.

O bom desempenho das matrizes cimentícias produzidas com alto percentual de incorporação de EGAF está intimamente ligado as condições de cura. O processo de cura inadequado pode gerar fissuração na superfície, levando ao aumento da permeabilidade, diminuindo drasticamente a resistência mecânica e aumentando a suscetibilidade a penetração de agentes agressivos, como cloretos (CABRERA-MADRID, 2016).

As matrizes cimentícias estão expostas no ambiente e sofrem diretamente com a degradações por agentes agressivos. Pensando nisso, o estudo proposto por Uysal e Sumer (2011) avaliou a perda de resistência das amostras quando submergidas em soluções de sulfato de sódio e magnésio. Os resultados mostraram que as matrizes cimentícias que continham adições minerais tiveram menores perdas de resistência quando comparadas àquelas que continham apenas CP. Logo, as adições minerais melhoraram a resistência de matrizes cimentícias ao ataque de sulfatos.

Cerulli et al. (2003) desenvolveram uma ampla pesquisa com quatro diferentes argamassas para avaliar aspectos químicos, morfológicos, mecânicos e de durabilidade. A argamassa de EGAF não continha CP e apresentou a melhor resistência mecânica e melhor desempenho no ensaio de adesão ao bloco cerâmico vazado. Quanto aos aspectos físicos, foram avaliados a permeabilidade ao vapor de água e a absorção de água. É sabido que na cura da argamassa ocorre a evaporação de parte da água contida na mistura, acarretando o aumento da porosidade total, que está diretamente ligada a taxa de absorção de água do material. O sistema mais adequado seria caracterizado por uma absorção de água baixa e uma alta permeabilidade, ambos atendidos pela argamassa de EGAF.

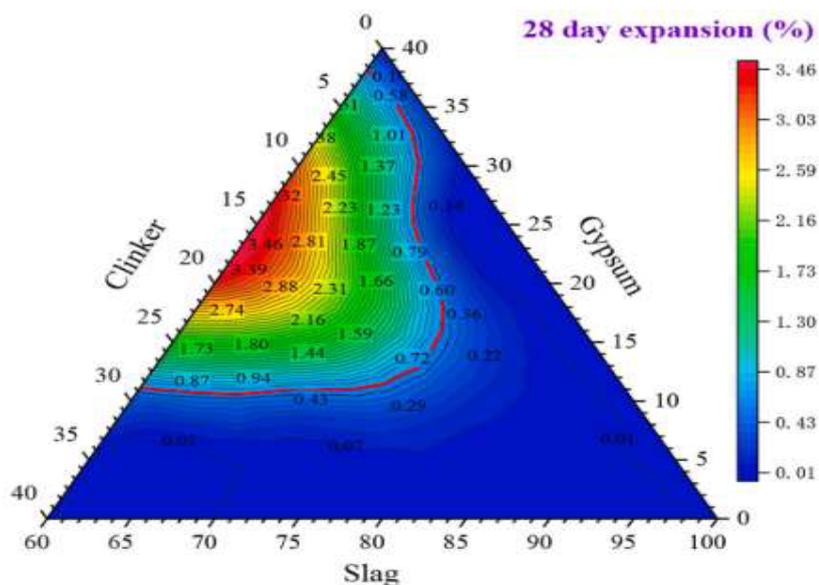
Os aspectos de durabilidade foram verificados em 3 ensaios: (1) eflorescência, (2) ataque ácido e (3) degradação do sulfato. No ensaio de eflorescência, a argamassa de EGAF obteve as melhores resistências a ação degradante da cristalização do sal. O desenvolvimento do ataque ácido ocorre devido a diminuição do teor de cal hidratada na superfície, acarretando a redução do pH, permitindo a migração por difusão dos íons sulfato até o interior da argamassa, reagindo com o cálcio, formando gesso, que possui comportamento expansivo. Desta forma, observou-se que a resistência ao ataque ácido estava relacionada a 3 fatores: alta porosidade (fator que diminui a probabilidade de fissuras, uma vez que comporta a expansão ocasionada pela formação do gesso), baixo teor de hidróxido de cálcio (redução da formação do gesso) e ausência de carbonato de cálcio (substância que é caracterizada pela baixa

resistência a ataques ácidos) (CERULLI et al., 2003).

A argamassa à base de escória é caracterizada por uma combinação adequada desses três fatores. Após a avaliação das interações foi possível verificar que a argamassa de EGAF possui todos os requisitos para uma boa durabilidade de reboco: baixa absorção de água, alta permeabilidade, baixo teor de hidróxido de cálcio e ausência de carbonato de cálcio (CERULLI et al., 2003).

Sun, Qian et al. (2020) estudaram a interação de diversos percentuais de escória, gesso e clínquer nas propriedades de pastas, inclusive a formação e expansão da etringita e a resistência mecânica. A expansão pode ser destrutiva ou controlável. Conforme pode ser observado na figura 8, a expansão destrutiva ocorreu na região que possuía alta concentração do teor de gesso e clínquer, 20 e 10% respectivamente.

Figura 8 - Mapa de contorno de expansão de pastas de escória-gesso-clínquer aos 28 dias



Fonte: Sun, Qian et al. (2020)

A expansão destrutiva ocorreu pela tensão de cristalização da formação de etringita, relacionada à proporção mútua de gesso e clínquer e não de um elemento isolado. Para viabilizar matrizes cimentícias com menor teor de clínquer, é necessário o aumento do teor de gesso nos cimentos contendo escória. Os teores de gesso e escória podem ser aumentados na mistura do cimento, desde que a razão molar  $[CaO] / [SO_3] / [Al_2O_3]$  seja menor que 1,50 (SUN; QIAN et al., 2020).

A adição de gesso FGD em matrizes cimentícias com alto teor de escória (30 e

60%) contribuiu para um aumento significativo da resistência à compressão nas primeiras idades (3 e 7 dias), sendo que o teor ótimo de adição encontrado foi de 5%. Também houve melhora na resistência aos 28 dias, porém, pouco expressiva. Não houve resultados de melhora expressiva na taxa de carbonatação e permeabilidade de íons cloreto, porém, reduziu consideravelmente o encolhimento por secagem (JIANG LI et al., 2018).

Um estudo elaborado por Pang Sun et al. (2020) com argamassas compostas por gesso FGD e EGAF, apresentaram menores resistências nas argamassas que possuíam um maior teor de FGD e menor de EGAF. A influência da finura da escória também foi objeto de estudo deste trabalho. Avaliou-se a substituição da escória por uma escória com maior finura até o percentual de 100% de substituição. Verificou-se poucas diferenças na resistência a compressão em 3 dias, porém um aumento expressivo nas demais idades. Aspectos de durabilidade foram avaliados após cura úmida. O contato com a água ocasionou a deterioração dos materiais a base de gesso, porém, notou-se uma estabilidade da resistência após os 28 dias, mostrando uma microestrutura compactada, que pode ter sido originada pela porosidade densa e a hidratação completa da EGAF. As argamassas apresentaram mau comportamento em ambientes com baixa temperatura. Nos ensaios de profundidade de carbonatação, observou-se um aumento após 14 dias, revelando uma não estabilidade. Já a taxa de retração se manteve estável durante todo o período. A EGAF teve sua hidratação acelerada devido a cura a vapor, diminuindo a água livre dentro da mistura, levando a pequenas taxas de retração.

Um estudo elaborado por Lee e Lee T. (2020) avaliou aspectos de durabilidade de amostras com substituição de CP por EGAF de 0 a 70%. As profundidades de carbonatação permaneceram semelhantes até 50% de substituição, porém, para percentuais maiores, a profundidade aumentou expressivamente. Já as taxas de profundidade de penetração de íons cloreto, houve decréscimo até um percentual de substituição de 25%, se mantendo estável até 70%. O módulo de elasticidade se manteve estável até 45%, tendo um acréscimo pequeno posteriormente. Já a taxa de redução do peso serviu para avaliar o desgaste por abrasão do concreto, resultado que foi bastante expressivo após os 20% de substituição.

Ao comparar pastas com e sem a incorporação do FGD verificou-se que nas primeiras idades, as curvas de distribuição de poros eram muito semelhantes. No entanto, com o avanço das idades, a curva de distribuição do tamanho dos poros nas

pastas que continham FGD apresentou uma curva secundária significativa. Esse evento pode estar associado a maior formação de etringita que preenche o espaço dos poros, melhorando a resistência aos sulfatos (KATHIB et al., 2013).

A adição do gesso FGD nas matrizes cimentícias com EGAF retardou os tempos de pega inicial e final nas argamassas e concretos. O FGD quando em solução, forneceu uma grande quantidade de íons sulfatos, que por sua vez reagiram imediatamente com os aluminatos tricálcicos ( $C_3A$ ) e alumina ativada ( $Al_2O_3$ ), para formar etringita. É possível que a etringita formada ao redor dos grãos de  $C_3A$ , criou uma espécie de barreira que impediu a difusão dos íons necessários para formar os hidratos que iniciariam a pega. Apesar disso, o gesso FGD proporcionou um efeito químico positivo, contribuindo com a finura, aumentando a solubilidade e a introduzindo impurezas que melhoraram o desempenho das matrizes (GUO; SHI, 2013).

A utilização do gesso FGD aumentou a hidratação da EGAF e os produtos de hidratação formados, por possuírem diâmetros menores, preencheram parte dos vazios da mistura, diminuindo a porosidade total. Desta forma, a mistura tornou-se mais compacta, aumentando a resistência a compressão e reduzindo da retração por secagem, ocasionada pela maior formação da etringita, que possui caráter expansivo e equilibrou a retração por secagem das misturas (GUO; SHI, 2013).

A adição de gesso ao clínquer é fundamental para estender o tempo de pega do cimento. Sem essa adição, o tempo de pega seria de apenas alguns minutos, logo, o gesso atua como retardador de pega no cimento. Caillahua e Moura (2017) estudaram a viabilidade do uso do gesso FGD como aditivo retardador de pega no Cimento Portland em substituição ao gesso natural, que é constituído basicamente de diidrato ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), enquanto o gesso FGD era composto por bassanita ( $CaSO_4 \cdot 0,6H_2O$ ) e *hannebachite* ( $CaSO_3 \cdot 0,5H_2O$ ). O gesso FGD quando incorporado estendeu o tempo de pega do cimento em cerca de uma hora, além disso, melhorou as resistências das argamassas. Na análise de lixiviação de contaminantes, o gesso FGD se enquadra na Classe II - não perigoso.

Identificou-se diversas pesquisas utilizando o FGD nas matrizes cimentícias. Para fins comparativos, elaborou-se a tabela 1 com os autores e as respectivas composições do FGD utilizados.

Tabela 1 – Autores e a composição química do FGD utilizado em cada uma das pesquisas

Constituinte	Teixeira (2019)	Jiang (2018)	Caillahua (2017)	Lou* (2011)	Zhong (2012)	Guo (2008)	Tzouvalas* (2004)	Ozkul* (2000)
CaO	37,80	37,95	45,87	31,84	29,40	31,20	33,40	31,91
SO <sub>3</sub>	28,90	49,74	47,97	43,79	39,60	41,80	42,19	43,13
SiO <sub>2</sub>	0,20	2,39	1,20	1,85	4,37	1,82	0,30	2,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	1,43	0,10	0,24	1,73	0,39		0,52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20	0,26	0,30	0,12	0,87	0,20	0,10	0,21
MgO	0,10	0,25	0,13	0,05	0,64	0,64	0,10	0,42
K <sub>2</sub> O	0,10	NR	0,14	0,06	0,12	0,13	NR	NR
Na <sub>2</sub> O	NR	NR	NR	NR	NR	0,05	NR	NR
Cl <sup>-</sup>	6,50	0,26	NR	NR	NR	NR	NR	NR

\* autores listados no trabalho de Caillahua (2017)

Fonte: Elaborado pela autora

Identificou-se também algumas pesquisas que realizaram estudos com a incorporação de FGD e EGAF de forma simultânea, conforme tabela 2.

Tabela 2 – Autores que utilizaram FGD e EGAF simultaneamente e traço utilizado nas pesquisas

Autores	%EGAF	%FGD	%CP
		2	68
	30	5	65
Jiang; Li et al. (2018).		8	62
		2	38
	60	5	35
		8	32
		50	15
	35	55	10
		60	5
		45	15
Pang, Sun et al. (2020)	40	50	10
		55	5
		40	15
	45	45	10
		50	5
		25	75
Guo; Shi (2013).	40		60
		50	50

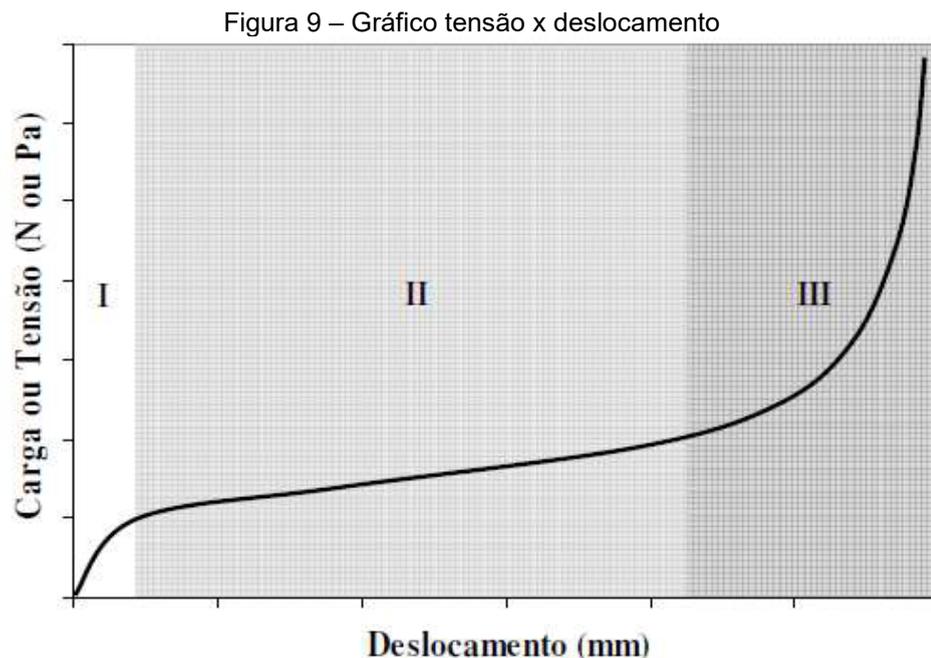
Fonte: Elaborado pela autora

## 2.4 COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Existem diversos ensaios que podem ser utilizados para analisar os

comportamentos da argamassa no estado fresco. Um deles é o ensaio de *squeeze flow*, que possibilita uma verificação de tendência de comportamento das argamassas. A técnica permite simular restrições similares as que ocorrem nas argamassas de revestimento no momento de sua aplicação. O estudo da reologia das argamassas é extremamente importante, uma vez que o seu desempenho no estado endurecido será o reflexo de uma aplicação correta do material, que ocorre ainda em seu estado fresco. Além disso, o alto desempenho do material vai passar por uma dosagem adequada de seus constituintes, que somados a uma aplicação adequada, vão melhorar o desempenho e evitar o aparecimento de manifestações patológicas. (CARDOSO; PILLEGGI E JOHN, 2010).

De acordo com Min, Erwin e Jennings (1994) o comportamento de um fluido pode ser caracterizado por 3 estágios, conforme apresentado na figura 9



Fonte: Retirado de Min, Erwin e Jennings (1994)

. No estágio I há pequenos deslocamentos, mostrando uma relação linear entre a tensão e a deformação aparente do material, caracterizando um comportamento elástico. Nesse primeiro estágio, há muita dispersão de tensão para uma taxa de deformação pequena. Em um primeiro estágio, o material possui comportamento semelhante a um sólido. O comportamento do material será reflexo da relação entre sua tensão de escoamento e a sua deformação. O equilíbrio apresentado nesse estágio entre a tensão e deformação representa um comportamento elástico linear,

que refletirá na máxima espessura que a argamassa poderá ser aplicada. (CARDOSO; PILLEGGI; JOHN, 2010).

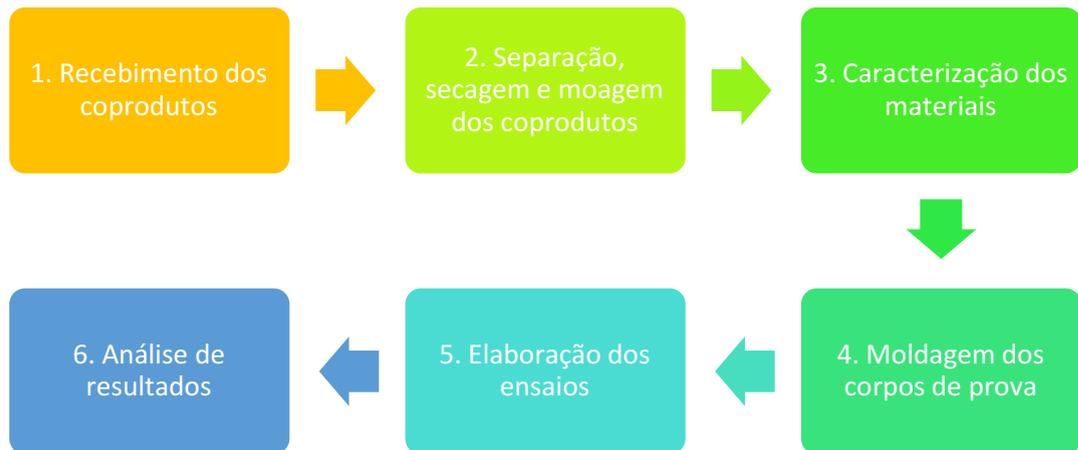
No estágio II é possível observar que o fluido possui grandes deformações com pouca variação da carga, onde o gráfico fica praticamente paralelo ao eixo das abscissas (deslocamento). Esse comportamento é característico de um comportamento plástico, onde as taxas superaram as forças internas que mantinham o material em comportamento elástico (MIN; ERWIN; JENNINGS, 1994).

O contrário pode ser observado no terceiro estágio. Para que ocorram deformações no material é necessário um aumento exponencial da carga aplicada, isso porque, as partículas internas já possuem uma aproximação significativa, ocasionando uma restrição ao fluxo da pasta. Esse comportamento faz com que a aplicação e acabamento das argamassas seja dificultado, devido a necessidade de emprego de altas cargas. (CARDOSO; PILLEGGI; JOHN, 2010).

### 3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A metodologia para o desenvolvimento da pesquisa seguiu a sequência do fluxograma apresentado na figura 10.

Figura 10 – Fluxograma da sequência da metodologia de pesquisa



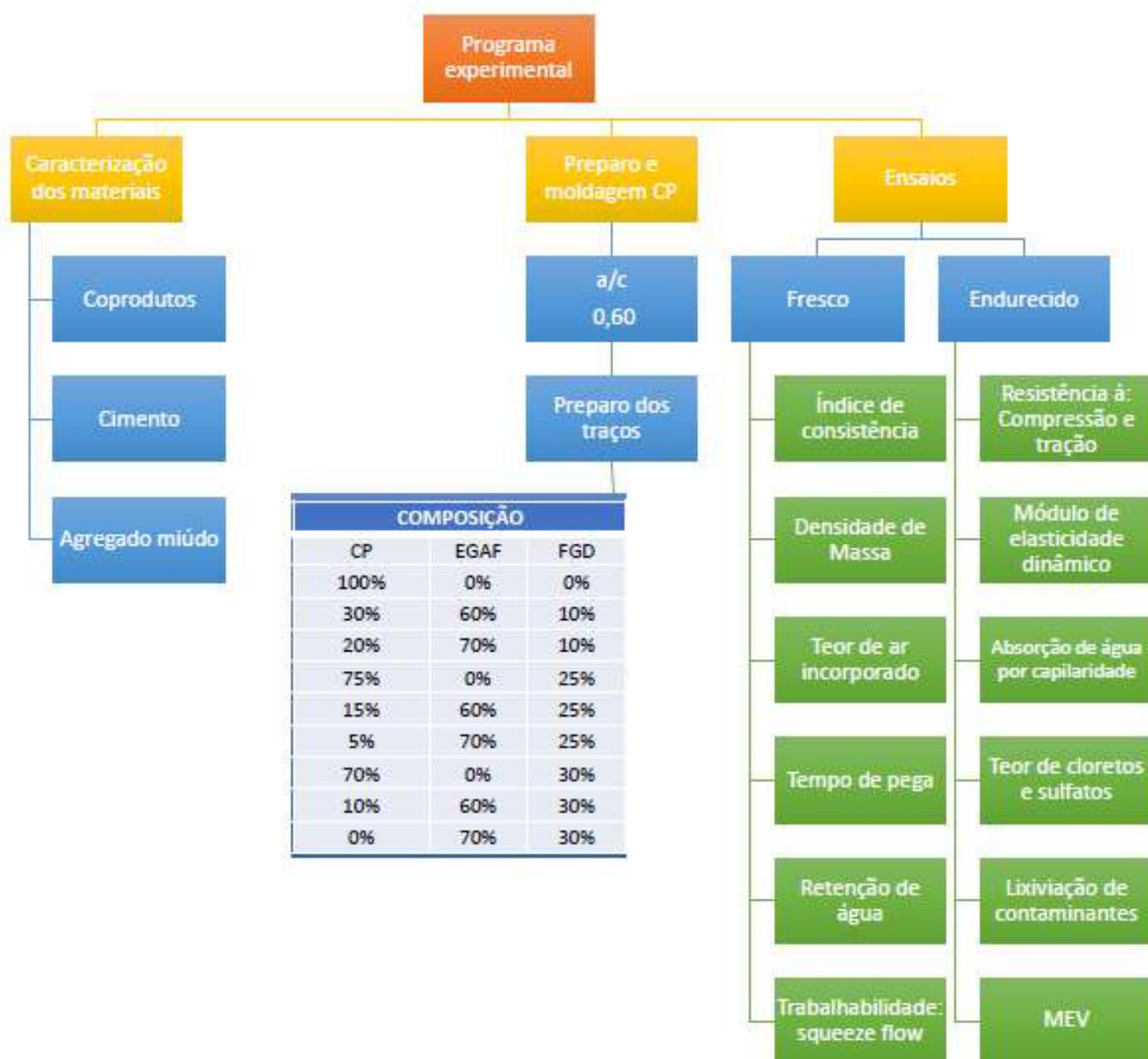
Fonte: Elaborado pela autora

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental compreende as etapas que serão realizadas para obtenção dos resultados esperados nesta pesquisa. Está dividido em 3 etapas, sendo a caracterização dos materiais, a dosagem e execução dos corpos de prova e por fim, os ensaios que serão realizados.

O fluxograma da figura 11 ilustra o programa e suas etapas de execução.

Figura 11 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborado pela autora

### 3.1.1 Variáveis de Pesquisa

No quadro 01 estão apresentadas as variáveis de resposta (dependentes), os fatores controláveis (independentes) e os fatores constantes.

Quadro 1 – Variáveis de pesquisa

Variáveis de resposta (Variáveis dependentes)	Índice de consistência		
	Densidade de Massa no estado fresco		
	Teor de ar incorporado		
	Calorimetria		
	Retenção de água		
	Trabalhabilidade: squeeze flow		
	Resistência à compressão axial		
	Resistência à tração por compressão diametral		
	Módulo de elasticidade dinâmico		
	Absorção de água por capilaridade		
	Teor de cloretos totais		
	Teor de sulfatos		
	Lixiviação de contaminantes		
	Análise microestrutural - MEV		
Fatores controláveis (Variáveis independentes) – níveis dos fatores	Relação a/c	Nível 1	0,60
	% de substituição de escória	Nível 1	0%
		Nível 2	60%
		Nível 3	70%
	% de substituição de FGD	Nível 1	0%
		Nível 2	10%
		Nível 3	25%
		Nível 4	30%
	Idade	Nível 1	7
		Nível 2	28
Nível 3		91	
Fatores constantes	Temperatura e método de cura		
	Características dos agregados		
	Característica do FGD		
	Característica da EGAF		
	Tipo de cimento (CPV - ARI)		
	Processo de dosagem das argamassas		
	Processo de moldagem dos corpos de prova		

Fonte: Elaborado pela autora

### 3.1.2 Matriz Experimental

A matriz experimental do quadro 2 apresenta as variáveis dependentes e independentes, além de seus respectivos níveis, e possibilitou a determinação do número total de corpos de prova que foram analisados.

Sabendo que o presente estudo visava a análise mecânica, ambiental e de durabilidade de argamassas com alto teor de substituição de escória, optou-se por três níveis de substituição, sendo 0%, 60% e 70%.

Para possibilitar o estudo de argamassas com altos percentuais de incorporação de resíduos, adotou-se quatro níveis de substituição do FGD, 0%, 10%, 25% e 30%.

Quadro 2 – Matriz experimental

Variáveis independentes				Variáveis dependentes			Total de corpos de prova
Relação água/aglomerante	Utilização de resíduos		Idade		Ensaio	Quantidade de CP/ensaio	
	Níveis	Valores	Níveis	Valores			
1		9	-	-	Índice de consistência	Estado fresco	-
1		9	-	-	Densidade de Massa no estado fresco		-
1		9	-	-	Calorimetria		-
1		9	-	-	Retenção de água		-
1		9	3	7;28;91	Resistência à compressão axial	5	135
1		9	3	7;28;91	Resistência à tração por compressão diametral	5	135
1	0,6	9	1	28	Módulo de elasticidade dinâmico	3	27
1		9	1	28	Absorção de água por capilaridade	3	27
1		9	1	28	Teor de cloretos (totais e livres)	Nestes ensaios, serão utilizados fragmentos dos ensaios de resistência à compressão e tração	
1		9	1	28	Teor de sulfatos		
1		9	1	28	Análise microestrutural - MEV	1	9
1		9	1	120	Lixiviação de contaminantes	1	9
<b>TOTAL DE CORPOS DE PROVA</b>							<b>342</b>

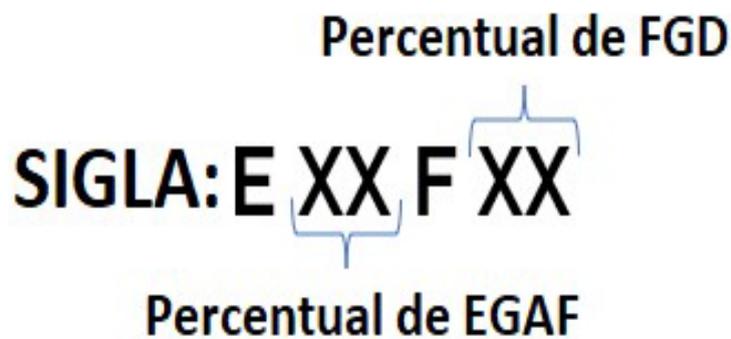
Fonte: Elaborado pela autora

### 3.2 NOMENCLATURA DAS AMOSTRAS

As amostras foram preparadas com diferentes percentuais de resíduos, logo, com o objetivo de tornar a nomenclatura o mais claro possível, adotou-se o esquema apresentado na figura 12, onde os números representam o percentual de EGAF e de FGD, respectivamente.

Vale ressaltar que a relação água/aglomerante de todas as amostras é igual a 0,60.

Figura 12 – Nomenclaturas dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pela autora.

Foram ensaiadas amostras de 8 traços com diferentes percentuais de substituição de resíduos e um traço de referência, somente com Cimento Portland. Na tabela 3 estão apresentadas todas essas composições.

Tabela 3 – Composição das amostras ensaiadas

TRAÇO		COMPOSIÇÃO		
		CP	EGAF	FGD
0	REF	100%	0%	0%
1	E60F10	30%	60%	10%
2	E70F10	20%	70%	10%
3	E00F25	75%	0%	25%
4	E60F25	15%	60%	25%
5	E70F25	5%	70%	25%
6	E00F30	70%	0%	30%
7	E60F30	10%	60%	30%
8	E70F30	0%	70%	30%

Fonte: Elaborado pela autora

### 3.3 MATERIAIS

#### 3.3.1 Coprodutos Siderúrgicos

Os coprodutos que foram utilizados nesta pesquisa advêm do processo de produção do aço da empresa ArcelorMittal Tubarão, localizada na cidade de Serra/ES. Os coprodutos fornecidos foram a escória granulada de alto-forno e o FGD, provenientes das etapas de alto-forno e do processo de dessulfurização dos gases de combustão, respectivamente.

##### 3.3.1.1 Caracterização do Resíduo do Processo FGD

As amostras oriundas da ArcelorMittal Tubarão foram recebidas em outubro/2021 (figura 13) e foram devidamente homogeneizadas e separadas, segundo a NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Figura 13 – Amostra do resíduo FGD recebidas no laboratório



Fonte: Acervo pessoal da autora

Na figura 14 observa-se a separação do material para realizar os ensaios de caracterização e a dosagem das misturas para confecção dos corpos de prova para análise.

Figura 14 – Amostra de FGD após homogeneização



Fonte: Acervo pessoal da autora

Para a caracterização do resíduo, foram adotados métodos de caracterização de cimento e de adições minerais utilizados em matrizes cimentícias. As propriedades e métodos podem ser observados na tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização do resíduo FGD – propriedades e métodos de ensaio

	<b>Propriedades avaliadas</b>	<b>Método de ensaio</b>
Características físicas	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 12127 (ABNT, 2017)
	Finura #200 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)
	Finura #325 (%)	NBR 15894-3 (ABNT, 2010)
	Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	NBR 16372 (ABNT, 2015)
Características químicas	Composição química (FRX)	Análise semiquantitativa Espectrômetro marca Bruker/ modelo S2 Ranger.
	Perda ao fogo (%)	NBR NM 18 (ABNT, 2004)
	pH	4500 – HB (APHA, 2005)
	Umidade	2540 B (APHA, 2005)
	Matéria orgânica (%)	2540 E (APHA, 2005)
	Teor de cloretos totais (%)	Método Argentométrico
	Teor de sulfatos solúveis (%)	NBR NM 16 (ABNT, 2012)
Características mineralógicas	Difração de raio-x	Espectrômetro marca Bruker/ modelo S2 Ranger

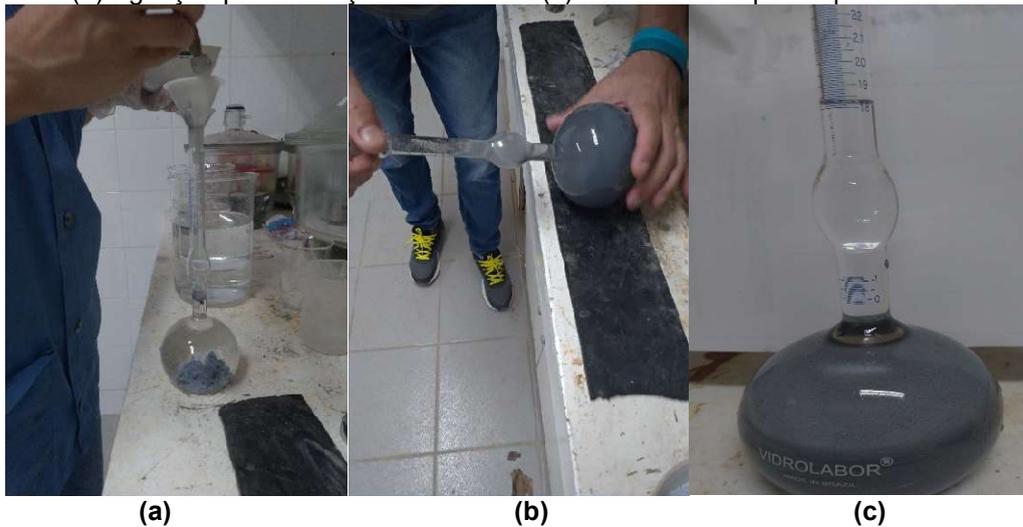
Fonte: Elaborado pela autora

### 3.3.1.1.1 Características físicas

Os ensaios das propriedades físicas do material foram desenvolvidos no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção – LEMAC/ UFES – campus Goiabeiras.

Para execução do ensaio de massa específica foi adotado o método descrito na NBR 16605 (ABNT, 2017), demonstrado nas imagens da figura 15.

Figura 15 – Etapas de execução do ensaio de Massa específica (a) Adição de amostra no frasco com querosene (b) Agitação para remoção de bolhas e (c) amostra em repouso para leitura do volume



Fonte: Acervo pessoal da autora

O ensaio de massa unitária foi realizado de acordo com a NBR 12127 (ABNT, 2017), como pode ser observado na figura 16. Na ocasião de execução desse ensaio, essa norma ainda estava válida.

Figura 16 – Ensaio de massa unitária



Fonte: Acervo pessoal da autora

Os ensaios de finura na peneira #200 e #325 foram realizados seguindo as diretrizes das normas NBR 11579 (ABNT, 2012) e NBR 15894-3 (ABNT, 2010), respectivamente. Na figura 17 contam fotos de algumas etapas dos ensaios.

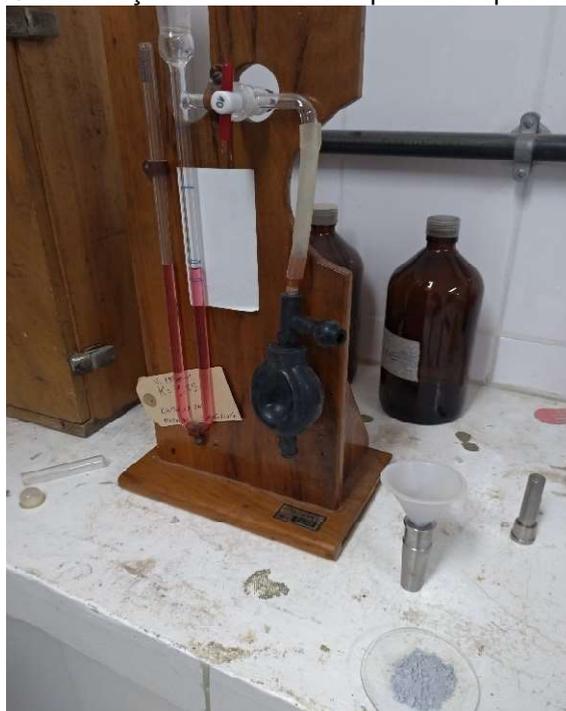
Figura 17 – Etapas de execução dos ensaios de finura – peneiras #200 e #325 (a) Amostra lavada de material retido na peneira (b) Material sendo peneirado e (c) Pesagem de material passante



Fonte: Acervo pessoal da autora

O ensaio de superfície específica foi realizado de acordo com a norma NBR 16372 (ABNT, 2015) e pode ser verificado na figura 18.

Figura 18 – Execução do ensaio de superfície específica Blaine



Fonte: Acervo pessoal da autora

### 3.3.1.1.2 Características químicas

Para a determinação da composição química do resíduo FGD foi realizada análise semiquantitativa em espectrômetro por Fluorescência de Raios-X (FRX) da marca Bruker, modelo S2 Ranger. O ensaio foi executado no laboratório do CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM/MCTI.

Os demais ensaios químicos foram executados no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção – LEMAC/UFES – campus Goiabeiras.

O percentual de perda ao fogo do resíduo foi obtido seguindo a NBR NM 18 (ABNT, 2004). O material foi preparado, pesado e em seguida, foi realizado a queima com a utilização de um Forno-Mufla com capacidade de temperatura controlada de até 1200 °C.

Já os ensaios de pH, umidade e matéria orgânica foram utilizados procedimentos descritos na APHA (*American Public Health Association*).

Para a determinação do pH do resíduo, primeiramente a amostra foi preparada seguindo o procedimento descrito no Standard Methods, método 4500 – HB (APHA, 2005). Para a medição, utilizou-se o pHmetro marca KASVI modelo K39-1014B, conforme apresentado na figura 19.

Figura 19 - pHmetro marca KASVI modelo K39-1014B com amostra da solução contendo o resíduo FGD



Fonte: Acervo pessoal da autora

Para a determinação do percentual de cloretos das misturas foi adotado o Método Argentométrico, também conhecido como método de Mohr. Na figura 20 estão ilustradas algumas etapas.

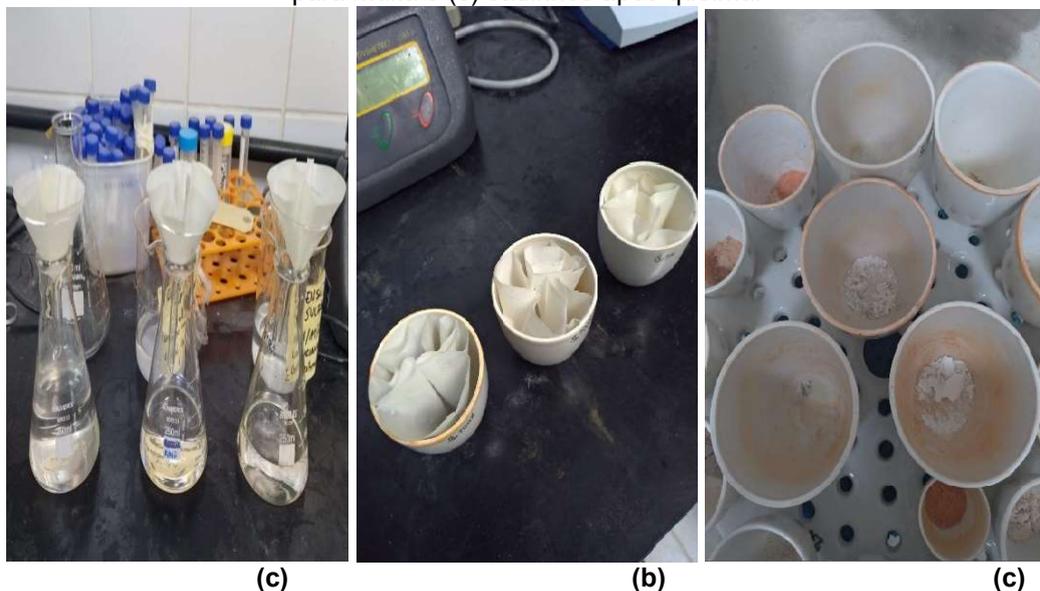
Figura 20 – Ensaio para a determinação do teor de cloretos totais (a) Titulação da amostra e (b) Adição de solução de nitrato de prata na amostra



Fonte: Acervo pessoal da autora

O teor de sulfatos solúveis foi determinado seguindo a NBR NM 16 (ABNT, 2012), conforme figura 21.

Figura 21 – Execução de ensaio de teor de sulfatos (a) Filtragem (b) filtros com material retido indo para mufla e (c) cadinhos após queima.



Fonte: Acervo pessoal da autora

Após a queima do material, os cadinhos com as amostras foram novamente pesados e os resultados calculados.

### 3.3.1.1.3 Características mineralógicas

Para a verificação das características mineralógicas do FGD, executou-se o ensaio de Difração de Raio X (DRX) do material, com um espectrômetro da marca Bruker, modelo S2 Ranger. O ensaio foi executado no laboratório do CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM/MCTI.

### 3.3.1.2 Caracterização da Escória Granulada de Alto-forno (EGAF)

As amostras oriundas da ArcelorMittal Tubarão foram recebidas em janeiro/2022 (figura 22). Diferentemente do resíduo do FGD, a EGAF precisou de uma etapa de pré-tratamento, que consistia em submeter o material a moagem para obter a finura adequada. Somente após essa etapa, o material foi devidamente homogeneizado e separado, segundo a NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Figura 22 – Amostra do resíduo EGAF recebidas no laboratório



Fonte: Acervo pessoal da autora

As amostras recebidas possuíam aspecto bem semelhante a uma areia, conforme pode ser observado nas figuras 22 e 23.

Figura 23 – EGAF antes da moagem



Fonte: Acervo pessoal da autora

Para a caracterização do resíduo, foram adotados métodos de caracterização de cimento e de adições minerais utilizados em matrizes cimentícias. As propriedades e métodos podem ser observados na tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização do resíduo EGAF – propriedades e métodos de ensaio

Propriedades avaliadas		Métodos de ensaio
Pré-tratamento	Moagem no moinho de bolas: 2 ciclos (5 horas e 34 minutos)	≤ 20% retido na peneira de 45µm
Características físicas	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 16605 (ABNT, 2017)
	Massa unitária	NBR 12127 (ABNT, 2019)
	Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	NBR 16372 (ABNT, 2015)
	Finura #325 (%)	NBR 15894-3 (ABNT, 2015)
Características químicas	Fluorescência de raios-X	Análise semiquantitativa Espectrômetro marca Bruker/ modelo S2 Ranger
	pH	4500 HB (APHA, 2005)
	Matéria orgânica (%)	2540 E (APHA, 2005)
	Teor de cloretos totais (%)	Método Argentométrico
	Teor de sulfatos solúveis (%)	NBR NM 16 (ABNT, 2012)
Características mineralógicas	Difração de raio-x	Espectrômetro marca Bruker/ modelo S2 Ranger

Fonte: Acervo pessoal da autora

Por apresentar um aspecto superficial umedecido, o material foi submetido a um processo de secagem em estufa a uma temperatura de 100°C, por 24 horas, antes da etapa de pré-tratamento.

### 3.3.1.2.1 Pré-tratamento

Para a utilização desse resíduo como adição mineral no Cimento Portland, era necessário que atendesse aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) – Materiais Pozolânicos. Para tanto, estabeleceu-se que a finura aceitável para o resíduo deveria ser superior à do próprio Cimento Portland. Dessa forma, estabeleceu-se que a quantidade de material retido na peneira de abertura de malha de 45µm deveria ser menor ou igual a 20%.

O moinho de bolas utilizado para a moagem do material era composto por 50 kg de esferas de aço de diferentes diâmetros, conforme pode ser observado na figura 24.

Figura 24 – Moinho de bolas e esferas de aço de diferentes tamanhos



Fonte: Acervo pessoal da autora

Para atingir o parâmetro de finura necessário, a escória granulada de alto-forno necessitou de dois ciclos de moagem, que corresponde a um total de 5 horas e 34 minutos.

#### 3.3.1.2.2 Características físicas

Para determinar as características físicas do resíduo, adotou-se os ensaios de Massa específica, Superfície específica e finura na peneira de malha #325, idem aos realizados no resíduo FGD e já descritos neste capítulo.

#### 3.3.1.2.3 Características químicas

Para a determinação da composição química da EGAF foi realizada análise semiquantitativa em espectrômetro por Fluorescência de Raios-X (FRX) da marca Bruker, modelo S2 Ranger. O ensaio foi executado no laboratório do CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM-ES/MCTI, idem ao FGD.

As características químicas: pH, Matéria orgânica, teor de cloretos e sulfatos da EGAF foram realizados seguindo as normas já descritas na caracterização do resíduo FGD.

#### 3.3.1.2.4 Características mineralógicas

Para a verificação das características mineralógicas da EGAF, executou-se o ensaio de Difração de Raio X (DRX) do material, com um espectrômetro da marca Bruker, modelo S2 Ranger. O ensaio foi executado no laboratório do CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM-ES/MCTI.

### 3.3.2 Cimento Portland

As adições contidas nos cimentos podem acarretar interferências nas características das argamassas, logo, como este trabalho visava analisar misturas com adições de coprodutos siderúrgicos, optou-se pelo CPV-ARI, que é cimento comercializado com menor teor de adições, evitando interações que afetem o resultado.

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) o cimento CPV-ARI possui em sua composição de 90 a 100% de clínquer + sulfato de cálcio e de 0 a 10% de material carbonático. Valores de clínquer bem expressivos quando comparados aos demais cimentos disponíveis no mercado, que possuem em sua composição também a

Escória Granulada de Alto-Forno e materiais pozolânicos.

Na tabela 6 estão os dados apresentados no laudo do fabricante do cimento adquirido.

Tabela 6 – Laudo do cimento CPV - ARI

Ensaio Químicos					
Ensaio	NBR nº	Unid.	Média	Especif. NBR 16.697:18	
Perda ao fogo	NM 18/12	%	9,47	≤ 6,50	
SO <sub>3</sub>	NBR 14.656/01	%	2,60	≤ 4,50	
RI	NM 15/12	%	1,68	≤ 3,50	
CaO	NM 13/13	%	1,41	não aplicável	
MgO	NBR 14.656/01	%	0,57	≤ 6,50	
Ensaio Físicos					
Ensaio	NBR nº	Unid.	Média	Especif. NBR 16.697:18	
Blaine	NBR 16.372:15	cm <sup>2</sup> /g	4.819	não aplicável	
Ret. 75 mic	NBR 11.579:13	%	0,00	≤ 6,00	
Expansibilidade	NBR 11.582:16	mm	0,00	≤ 5,00	
Início de pega	NBR 16.607:18	min	157,00	≥ 60	
Fim de pega	NBR 16.607:18	min	225,00	≤ 600	
Resistência à Compressão					
Ensaio	NBR nº	Unid.	Desvio	Média	Especif. NBR 16.697:18
Resist. Comp. 1D	NBR 7215:19	MPa	2,00	19,8	≥ 14,00
Resist. Comp. 3D	NBR 7215:19	MPa	1,32	32,3	≥ 24,00
Resist. Comp. 7D	NBR 7215:19	MPa	1,30	37,5	≥ 34,00
Resist. Comp. 28D	NBR 7215:19	MPa	1,38	43,4	não aplicável

Fonte: Laudo fornecido pela empresa CSN (Fevereiro-2022)

### 3.3.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa foi uma areia natural de jazida. Todos os ensaios foram desenvolvidos no LEMAC. O aspecto úmido era visível, logo, antes de ser utilizada nos ensaios, a areia passou por secagem em estufa a 100 °C e posteriormente foi peneirada para retirada de impurezas.

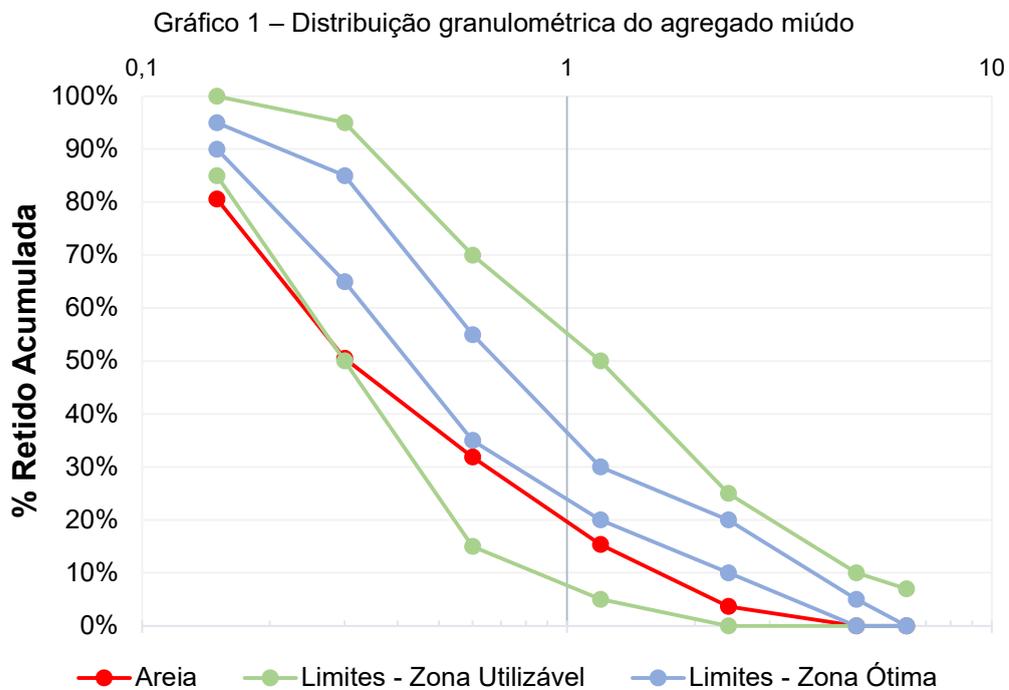
Na tabela 7 estão apresentados os resultados da caracterização do agregado miúdo.

Tabela 7 – Caracterização do agregado miúdo

Propriedade	Normatização de ensaio	Resultados
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,785
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,65
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,40
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,82

Fonte: Elaborado pela autora

A distribuição granulométrica foi realizada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na ocasião de execução desse ensaio, essa norma ainda estava válida. No gráfico 01 constam os resultados encontrados. Observa-se que os valores encontrados estão dentro das faixas de utilização.



### 3.3.4 Água

A água utilizada na pesquisa proveio da rede pública de distribuição de água potável do município de Vitória/ES pela CESAN - Companhia Espírito Santense de Saneamento. De acordo com a NBR NM 137 (ABNT, 1997), como a água para amassamento das argamassas é proveniente de abastecimento público, não é necessário caracterização.

### 3.4 MÉTODOS

Os métodos dos ensaios apresentados a seguir visaram atender os objetivos desta pesquisa. Todos os ensaios serão realizados no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção – LEMAC, UFES – campus Goiabeiras, com exceção daqueles indicados em campo específico.

#### 3.4.1 Dosagem e Mistura das Argamassas

A dosagem e mistura das argamassas foram realizadas segundo critérios da NBR 7215 (ABNT, 2019). A argamassa é preparada utilizando um misturador mecânico e compactada manualmente em um molde.

O traço utilizado nessa pesquisa foi de 1:6,00 (Aglomerante: Areia – em volume) e foi definido baseado em outras pesquisas já realizadas na área de estudos em argamassas. A tabela 8 apresenta alguns dos estudos já elaborados com o traço adotado.

Tabela 8 –Traços (em volume) de argamassa e suas referências

Traço (CIM:AREIA) – em volume	Referências
1:5,88	Molnar e Manea (2016)
	Monte, Uemoto e Selmo (2003)
	N.G. Silva, G.G. Silva e Gleize (2013)
1:6,00	Martínez, Etxeberria, Pavón e Díaz (2016)
	Paes, Silva, Campos, Evangelista, L. Ribeiro, E. Ribeiro, (2017)
	Ruffeil, Silva, Grisolia, Fonseca, Rodrigues, Bordalo, Paes, (2017)

Fonte: Adaptado de Vaz e Carasek (2019).

Realizou-se os estudos de traços e em seguida, foi possível realizar a dosagem das argamassas e a moldagem os corpos de prova. Na figura 25 consta a amostra já preparada sendo moldada em forma cilíndrica.

Figura 25 Amostra sendo moldada em forma de corpo de prova cilíndrico



Fonte: Acervo pessoal da autora

### 3.4.2 Ensaio no Estado Fresco

No estado fresco foram realizados os ensaios de Índice de Consistência (ABNT NBR 13276:2016), Densidade de Massa no estado fresco e Teor de Ar Incorporado (ABNT NBR 13278:2005), Retenção de Água (ABNT NBR 13277:2005), Avaliação de tempos de pega através de técnica de Calorimetria e Estudos de trabalhabilidade através do método Squeeze flow (ABNT NBR 15839:2010).

#### 3.4.2.1 Índice de Consistência – Abnt NBR 13276:2016

O ensaio do Índice de Consistência foi executado segundo as determinações da NBR 13276 (ABNT, 2016), utilizando um molde em formato de tronco de cone sobre uma mesa provida de uma alavanca, que ao ser acionada, possibilita que a mesa faça movimentos de subida e descida, conforme pode ser observado na figura 26.

Figura 26 – (a) Mesa para índice de consistência e (b) amostra compactada em molde troncônico



(a)

Fonte: Acervo pessoal da autora

(b)

O resultado de Índice de Consistência foi a média das três medições efetuadas em cada traço das argamassas estudadas. Todos os ensaios foram executados pelo mesmo operador. A figura 27 apresenta uma demonstração do ensaio de Índice de Consistência no programa experimental realizado, enfatizando a medição do espalhamento da argamassa.

Figura 27 – Medição do espalhamento da argamassa, após execução do ensaio



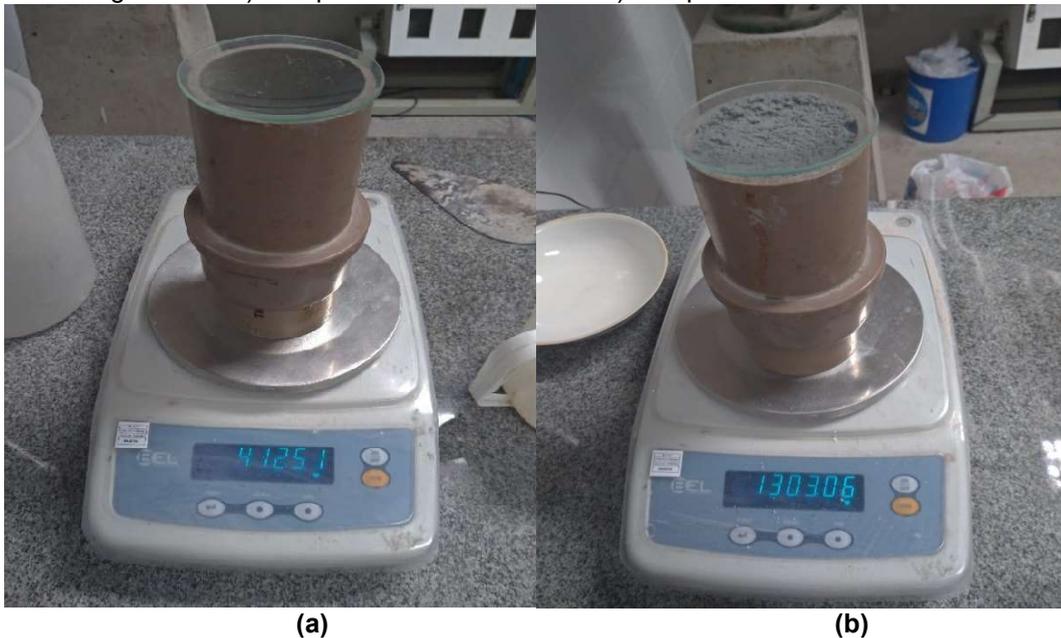
Fonte: Acervo pessoal da autora

### 3.4.2.2 Densidade de Massa e Teor de ar Incorporado – ABNT NBR 13278:2005

Para a execução dos ensaios de Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado das argamassas, foi utilizado um recipiente cilíndrico de PVC, com massa e volume conhecidos.

Na figura 28 observa-se etapas da execução do ensaio de densidade de massa.

Figura 28 – a) Recipiente cilíndrico vazio e b) Recipiente contendo amostra



Fonte: Acervo pessoal da autora

Como a massa do recipiente vazio já era conhecida, calculou-se a densidade de massa. E para a determinação do teor de ar incorporado, primeiramente realizou-se o cálculo da densidade de massa teórica, considerando todos os componentes anidros da argamassa e em seguida, com a densidade teórica e a densidade calculada, calculou-se o teor de ar incorporado das misturas.

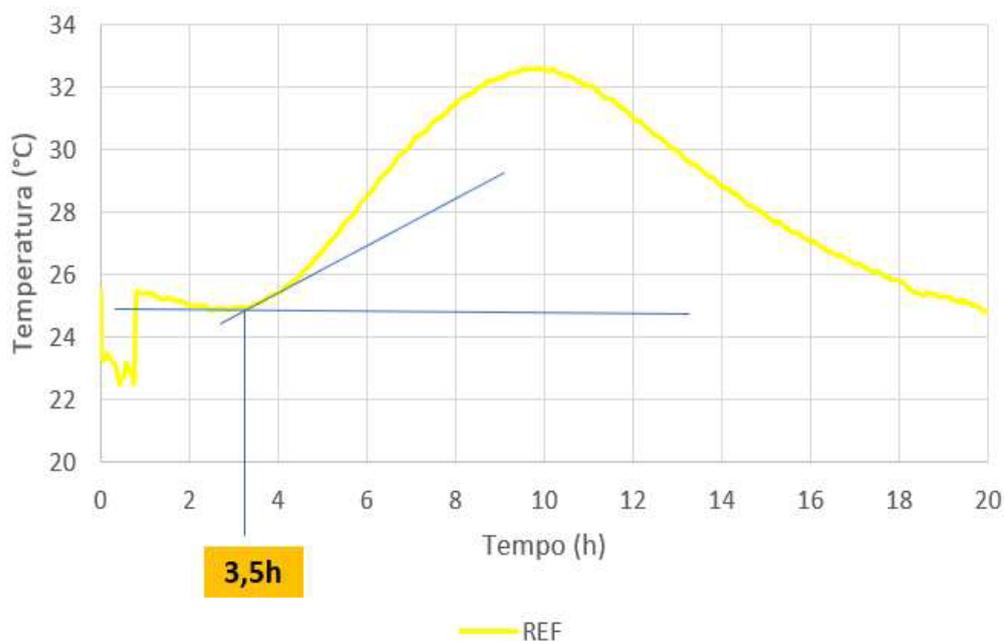
### 3.4.2.3 Calorimetria

Com o intuito de identificar os tempos de pega das argamassas, adotou-se o ensaio de calorimetria, uma vez que ele possibilita a avaliação da mudança de temperatura com o decorrer do tempo, possibilitando a comparação dos traços com substituição de EGAF e FGD com o de referência.

Para a realização do ensaio, utilizou-se o aquisitor de dados, Marca: Lynx/ Modelo: ADS 2002/ Com sensores: Termopar tipo k. As argamassas foram dosadas, colocadas em caixas de isopor e levadas para a câmara climática com temperatura e umidade controladas. Em cada amostra foi colocado um dos sensores para que fosse possível realizar as leituras de temperatura durante todo o tempo de ensaio. A câmara climática utilizada era marca: feutron/ Modelo: kpk200.

Para análise dos resultados, utilizou-se a técnica baseada em Betioli et al. (2009) para a determinação do início de pega das misturas. A técnica consiste em traçar uma reta paralela sobre período de indução, onde não há mudanças significativas de temperatura e uma paralela a inclinação da curva, conforme exemplo apresentado na figura 29.

Figura 29 – Curva temperatura x tempo do traço de referência e retas para determinação do início de pega



Fonte: Elaborado pela autora

O ponto de encontro dessas duas retas é o ponto onde a temperatura começa a subir, após um período sem variação. Nesse ponto se estabelece o início de pega.

#### 3.4.2.4 Retenção de Água – ABNT NBR 13277:2005

A avaliação da propriedade de retenção de água da argamassa visa avaliar a maior ou menor capacidade da argamassa de reter a água na mistura, mantendo sua

trabalhabilidade, mesmo em situações que acarretem a perda de água (CARASEK, 2010).

O ensaio de retenção de água foi executado conforme prescrito na ABNT NBR 13277:2005. Na figura 30 estão algumas imagens da execução do ensaio.

Figura 30 – (a) Recipiente vazio (b) Recipiente contendo amostra e (c) Amostra durante a sucção



(a)

(b)



(c)

Fonte: Acervo pessoal da autora

Realizou-se a pesagem da amostra após sucção e com os dados obtidos, comparou-se com os valores antes da sucção, e obteve-se os resultados de retenção de água de cada uma das amostras.

### 3.4.2.5 Squeeze Flow – ABNT NBR 15939:2010

O procedimento de squeeze flow foi adotado como complemento de avaliação da trabalhabilidade das argamassas, uma vez que o ensaio de consistência avalia o comportamento baseado em uma única taxa de solitação, por isso são denominados monopontos.

O ensaio foi realizado com uma Prensa com capacidade de 30 tf, Marca: EMIC/ Modelo: DL 30000 e célula de carga com capacidade de 200 kgf/ 2000N.

Na figura 31 observa-se as amostras durante e após a execução do ensaio.

Figura 31 – a) Durante e b) Após a execução do ensaio



Fonte: Acervo pessoal da autora

Transformou-se os dados coletados no aquisitor de dados em gráficos de tensão x deslocamento e analisou-se o comportamento de cada uma das amostras.

### 3.4.3 Ensaio no Estado Endurecido

No estado endurecido foram realizados os ensaios de Resistência à Compressão Axial (ABNT NBR 7215:2019), Resistência à Tração por Compressão Diametral (ABNT NBR 7222:2011), Módulo de Elasticidade Dinâmico (ABNT NBR 15630:2008), Absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 15259:2005), Teor de Cloretos através do Método Argentométrico/ Método De Mohr, Teor de Sulfatos (ABNT

NBR NM 16:2012), Lixiviação de Contaminantes (EA NEN 7375:2004) e Análise Microestrutural – MEV.

### 3.4.3.1 Resistência à Compressão Axial – ABNT NBR 7215:2019

Para o ensaio de Resistência à Compressão Axial foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos de cada traço, em cada idade, com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100mm, que ficaram submersos em água com cal (saturados) até a idade de ensaio. Para o rompimento, baseou-se nos procedimentos descritos na NBR 7215 (ABNT, 2019) e utilizou-se uma prensa Amsler de mostrador analógico com um limite de escala de 25 tf.

Os corpos de prova foram retificados e verificou-se as medidas dos corpos de prova para o cálculo da resistência à compressão das amostras.

Figura 32 – (a) Amostras antes do rompimento e (b) amostras após rompimento no ensaio de resistência à compressão



Fonte: Acervo pessoal da autora

### 3.4.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral – ABNT NBR 7222:2011

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral, os corpos de prova foram moldados e curados seguindo as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 2019). Para o ensaio, posicionou-se os corpos de prova cilíndricos no equipamento

na horizontal apoiado em lâminas de madeira, com 15 cm de largura e 3,5 cm de altura, para auxiliar no posicionamento durante a realização do ensaio, conforme apresentado na figura 33.

Figura 33 – (a) Amostras antes do rompimento e (b) amostras após rompimento no ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Acervo pessoal da autora

A prensa utilizada neste ensaio foi a mesma utilizada nos ensaios de resistência à compressão axial.

#### 3.4.3.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico – ABNT NBR 15630: 2008

O ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico foi realizado conforme as diretrizes da NBR 15630 (ABNT, 2008) nos corpos de prova com 28 dias de idade. Antes da execução dos ensaios, os corpos de prova ficaram 24 horas em estufa para secagem.

Realizou-se o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico através da técnica de velocidade de propagação de onda ultrassônica. A distância entre os transdutores era conhecida, uma vez que todos os corpos de prova tiveram suas medidas aferidas. Tomando nota do tempo gasto para a onda percorrer essa distância, calculou-se a velocidade da propagação da onda ultrassônica e posteriormente o módulo de elasticidade dinâmico.

O aparelho de ultrassom utilizado neste ensaio era Marca: Proceq e Modelo: Pundit lab, conforme figura 34.

Figura 34 – Equipamento de Ultrassom



Fonte: Acervo pessoal da autora

Em cada amostra foram realizadas três leituras e foi considerada a de menor valor para a utilização na fórmula da velocidade de propagação.

#### 3.4.3.4 Absorção de Água por Capilaridade – ABNT NBr 15259: 2005

O ensaio de Absorção de Água por Capilaridade foi realizado conforme NBR 15259 (ABNT, 2005). Os corpos de prova foram moldados conforme descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005) com dimensões 40 x 40 x 160 mm, sendo 3 corpos de prova para cada traço e todos foram ensaiados aos 28 dias.

Para execução deste ensaio, os corpos de prova permaneceram em câmara climática controlada, com temperatura do ar de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $(60 \pm 5) \%$ , conforme figura 35.

Figura 35 – Câmara controlada



Fonte: Acervo pessoal da autora

Na figura 36 observa-se as amostras durante o ensaio, colocadas na posição vertical, dentro de uma bandeja com água até uma altura de 5mm. As amostras tiveram sua massa aferida aos 10 e 90 minutos de ensaio.

Figura 36 – (a) Corpos de prova durante ensaio e (b) amostras após ensaio de absorção de água por capilaridade



(a)  
Fonte: Acervo pessoal da autora

(b)

Na figura 35 (b) nota-se as diferentes alturas de absorção de água de cada uma das amostras avaliadas.

### 3.4.3.5 Determinação de Cloretos - Método Argentométrico / Método de Mohr

Para determinação do total de cloretos contido nas amostras, realizou-se a trituração de fragmentos das amostras da argamassa no estado endurecido. Após a trituração, foi executado o método Argentométrico/ método de Mohr.

### 3.4.3.6 Determinação do Teor de Sulfatos

Para avaliação do Teor de Sulfatos, executou-se os ensaios prescritos na NBR NM 16 (ABNT, 2012), o mesmo procedimento utilizado para a caracterização dos resíduos e do cimento, uma vez que não há norma específica para determinação de sulfatos em argamassas. Teixeira (2019) e Mazer et al. (2014) também utilizaram essa técnica para teor de sulfatos em concretos.

Observa-se na figura 37 a etapa de filtragem de diferentes amostras.

Figura 37 – Execução da etapa de filtragem do ensaio de sulfatos



Fonte: Acervo pessoal da autora

O procedimento de filtragem lenta foi executado por diversas vezes, até o filtrado não apresentar turbidez quando em contato com o Nitrato de Prata ( $\text{AgNO}_3$ ). Esse procedimento é executado para que a amostra fique livre de cloretos, uma vez que caso estejam presentes nas amostras, podem acarretar interferências no resultado de sulfatos do lixiviado. Realizada essa conferência, o filtro era transferido

para um recipiente de massa conhecida e levado para calcinação. Após a calcinação, o recipiente era novamente pesado.

### 3.4.3.7 Lixiviação de Contaminantes - EA NEN 7375:2004

A incorporação dos resíduos siderúrgicos em matrizes cimentícias devem ser amplamente estudados, não somente por critérios de resistência mecânica e durabilidade, mas também no âmbito ambiental, uma vez que esses resíduos possuem elementos químicos que podem ocasionar a contaminação da matriz cimentícia e posteriormente, o ambiente onde ela será aplicada.

Portanto, o ensaio de lixiviação de contaminantes é imprescindível para verificar se a argamassa é capaz de estabilizar substâncias químicas perigosas que podem estar contidas nos coprodutos siderúrgicos.

A metodologia adotada para este ensaio está descrita na norma holandesa EA NEN 7375 (NNI, 2004) e o ensaio também é conhecido como ensaio de tanque.

As amostras foram moldadas e permaneceram em cura úmida por um período de 120 dias. Após esse período, elas foram colocadas em recipientes cilíndricos com capacidade de 2,50 litros.

Para calcular o volume de água necessária para o ensaio, foi utilizada a fórmula 5:

$$50 \times A \times f \leq V \leq 200 \times A \times f$$

Equação 5

Onde:

V é o volume de água necessária para realização do ensaio, em litros

A é a área do corpo de prova, em metros quadrados

f é um fator de conversão = 1 l/m<sup>2</sup>

A partir da fórmula, calculou-se o volume mínimo e máximo necessário para o ensaio, conforme tabela 9.

Tabela 9 – Volume de água mínimo, máximo e adotado para o ensaio de tanque

<b>V<sub>mín</sub> (l)</b>	<b>V<sub>máx</sub> (l)</b>	<b>V adotado (l)</b>
0,982	3,927	2,300

Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto, utilizou-se 2,30 litros de água ultrapura (AUP) em cada recipiente onde os corpos de foram submersos e cobertos com plástico filme, conforme pode ser observado na figura 38.

Figura 38 – Amostras antes e durante o ensaio de tanque



Fonte: Acervo pessoal da autora

A norma determina que as amostras sejam filtradas em várias etapas: 6 horas, 1 dia, 2 dias e 6 horas, 4 dias, 9 dias, 16 dias, 36 dias e 64 dias. Filtrou-se a solução contida no recipiente nos 8 períodos descritos na norma, armazenadas em tubos tipo Falcon e enviadas para análise química. Na figura 39 observa-se as amostras já armazenadas.

Figura 39 – Amostras do filtrado para análise química



Fonte: Acervo pessoal da autora

A análise química do material lixiviado foi realizada pelo Laboratório de Espectrometria Atômica-LEA/Departamento de Química/CCE/UFES com um Espectrômetro de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), Modelo NexION™ 300, conforme figura 40.

Figura 40 – Espectrômetro utilizado para analisar a composição do material lixiviado



Fonte: Laboratório de Espectrometria Atômica-LEA/Departamento de Química/CCE/UFES

Após a análise dos dados das concentrações de cada elemento, foi realizado o cálculo da taxa de lixiviação total ( $E_i$ ) para cada um dos compostos e essa taxa é comparada aos limites U1 e U2 informados pela própria norma, em mg/m<sup>2</sup>. O cálculo da taxa de lixiviação total ( $E_i$ ) foi realizado de acordo com a equação 6.

$$E_i = \frac{C_i \times V}{f \times A}$$

Equação 6

Onde:

$E_i$ : concentração do componente, em mg/m<sup>2</sup>;

$C_i$ : concentração do componente, em µg/l;

$V$ : Volume contido no tanque, em l;

$A$ : Área da superfície do corpo de prova em contato com a água, em m<sup>2</sup>;

$f$ : fator de conversão = 1.000 µg/mg.

Os parâmetros U1 e U2 estão estabelecidos na NEN 7375 (NNI, 2004), conforme tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros U1 e U2 para classificação dos elementos lixiviados

Elemento	Parâmetros em mg/m <sup>2</sup>	
	U1	U2
<b>As</b>	40	300
<b>Cd</b>	1	7,5
<b>Cu</b>	150	950
<b>Pb</b>	50	350
<b>Cr</b>	1,5	9,5
<b>Mn</b>	-	
<b>Hg</b>	-	-
<b>Zn</b>	200	1.500

Fonte: Elaborado pela autora

Com as taxas *E<sub>i</sub>* calculadas, é necessário realizar a classificação do material, de acordo com os comparativos com U1 e U2. A classificação ambiental da matriz cimentícia vai interferir se o material poderá ou não ser utilizado nas edificações. Essa classificação pode ocorrer de 3 formas:

- 1) Taxa *E<sub>i</sub>* de todos os elementos abaixo de U1 – Material sem restrição de uso;
- 2) Taxa *E<sub>i</sub>* com valores entre U1 e U2 – Materiais sem restrição de uso, porém, ao final da sua vida útil será necessário a remoção e destinação adequada do material, para não ocorrer contaminação do ambiente e
- 3) Taxa *E<sub>i</sub>* com valores superiores a U2 – a utilização do material passa a ser restrita e para utilização, serão necessários tratamentos específicos para impossibilitar a lixiviação de contaminantes.

#### 3.4.3.8 Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV

O conhecimento da microestrutura da argamassa é fundamental para entender as suas propriedades, principalmente nesta pesquisa, onde o que se quer avaliar é como a variação dos percentuais de coprodutos incorporados influencia nas características ambientais, de durabilidade e mecânicas das matrizes cimentícias. Além disso, o espectrômetro de dispersão de energia (EDS) acoplado no equipamento, permitirá o conhecimento da composição química dos compostos presentes na mistura.

Com o objetivo de identificar as características microestruturais, foi realizada a análise em um Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV do LUCCAR - Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins que faz parte da rede de laboratórios multiusuários do CCS-UFES.

O equipamento utilizado é do fabricante: JEOL/ Modelo: JSM6610LV, com Resolução: 3.0 nm (30kV), 8nm (3kV), 15nm (1kV). Com o intuito de associar as imagens analisadas com a composição dos constituintes das amostras, foi utilizado o Detector de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) acoplado ao MEV, fabricante: Bruker / Modelo: XFlash Detector 6|10.

### 3.5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios foram analisados estatisticamente por meio da Análise de Variância (ANOVA), através do software STATISTICA® 10.0 (STATSOFT, 2004).

Avaliou-se os resultados encontrados e verificou-se qual das variáveis estavam interferindo no comportamento de cada propriedade, utilizando a análise de variância em um nível de confiabilidade de 95%.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO PROCESSO FGD

Os ensaios foram executados conforme descritos no capítulo de métodos. Os resultados encontrados para o FGD, referente as características físicas e químicas estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Caracterização do resíduo do processo FGD

Propriedades		Resultados
<b>Características físicas</b>	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,101
	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	0,425
	Finura #200 (%)	7,75%
	Finura #325 (%)	8,19%
	Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	9.716
<b>Características químicas</b>	Fluorescência de Raio-X	Tabela 12
	Perda ao fogo (%)	22,00%
	pH	13,98
	Umidade	0,43%
	Matéria orgânica (%)	1,51%
	Teor de cloretos totais (%)	4,08%
<b>Características mineralógicas</b>	Teor de sulfatos solúveis (%)	9,04%
	Difração de Raio-X	Figura 41

Fonte: Elaborado pela autora.

A composição química do FGD foi obtida através de FRX – Fluorescência de Raio-X. Na tabela 12 estão os percentuais de cada elemento da composição química do FGD.

Tabela 12 – Composição química do FGD

Amostra	CaO	SO <sub>3</sub>	Cl	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Outros	PPC
FDG	48,20	25,10	4,61	1,29	0,76	0,46	0,36	0,23	0,18	0,09	0,22	18,50

PPC: Perda por calcinação

Fonte: Centro De Tecnologia Mineral – CETEM-ES/MCTI

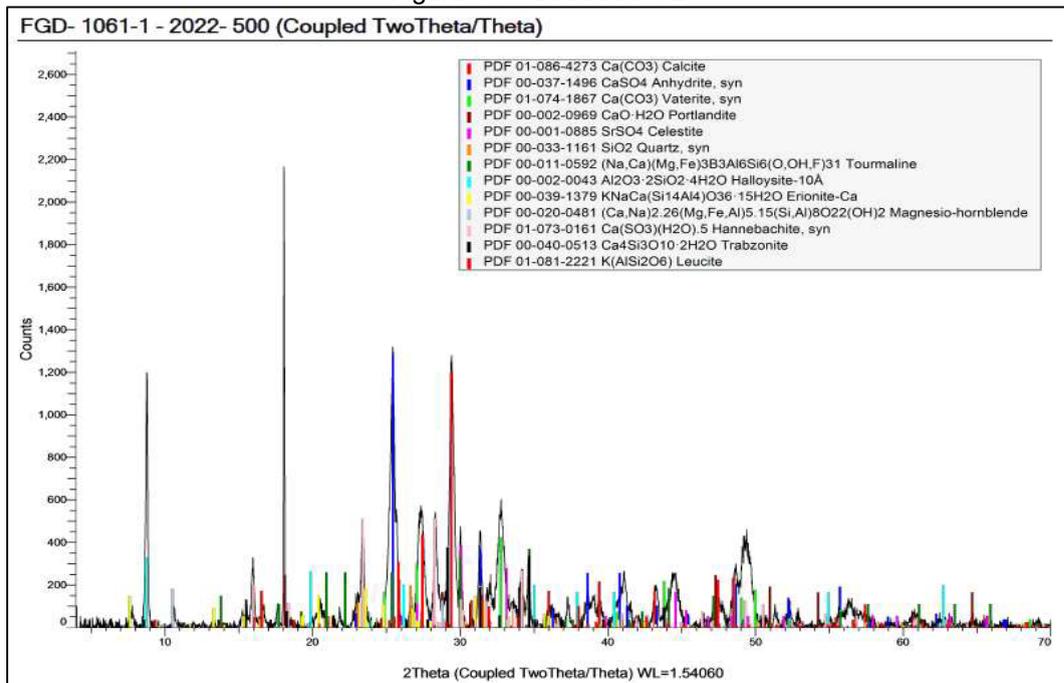
O elemento encontrado com maior representatividade foi o Óxido de Cálcio (CaO), seguido por Trióxido de Enxofre (SO<sub>3</sub>). Percentuais muito semelhantes de CaO e SO<sub>3</sub> foram encontrados por outros autores, como Guo e Shi (2008), Telesca et al. (2013) e Teixeira (2019).

A composição química encontrada por Li et al. (2015) foi muito semelhante a observada nessa pesquisa, onde os maiores percentuais são de CaO e SO<sub>3</sub>. Nessa

pesquisa, esse total é superior a 73%, percentual semelhante também foi encontrado por Teixeira (2019), representando quase 67%.

Observa-se o resultado DRX do FGD e nota-se uma grande quantidade de picos cristalinos contidos na amostra da figura 41.

Figura 41 – DRX do FGD



Fonte: Centro De Tecnologia Mineral – CETEM-ES/MCTI

No quadro apresentado na figura 41, identifica-se diversas fases cristalinas, dentre elas: calcita, anidrita, portlandita, celestita, quartzo e leucita.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO-FORNO MOÍDA

Executou-se os ensaios descritos no capítulo de métodos e os resultados encontrados foram descritos na tabela 13.

Tabela 13 – Resultados caracterização EGAF

Propriedades avaliadas		Resultados
Características físicas	Massa específica	2,827
	Superfície específica	4.361
	Fluorescência de Raios-X	Tabela 14
Características químicas	Potencial hidrogeniônico	8,44
	Teor de cloretos totais (%)	0,005%
	Teor de sulfatos solúveis (%)	0,06%
Características mineralógicas	Difração de Raios-X	Figura 45

Fonte: Elaborado pela autora.

Obtiveram-se a composição química da EGAF também através de FRX – Fluorescência de Raio-X, conforme observa-se na tabela 14.

Tabela 14 – Composição química da EGAF

Amostra	CaO	SO <sub>3</sub>	Cl	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	Outros	PPC
EGAF	36,4	2,53	-	7,35	31,5	10,2	0,45	0,1	0,37	0,46	0,31	0,17	0,06	10,1

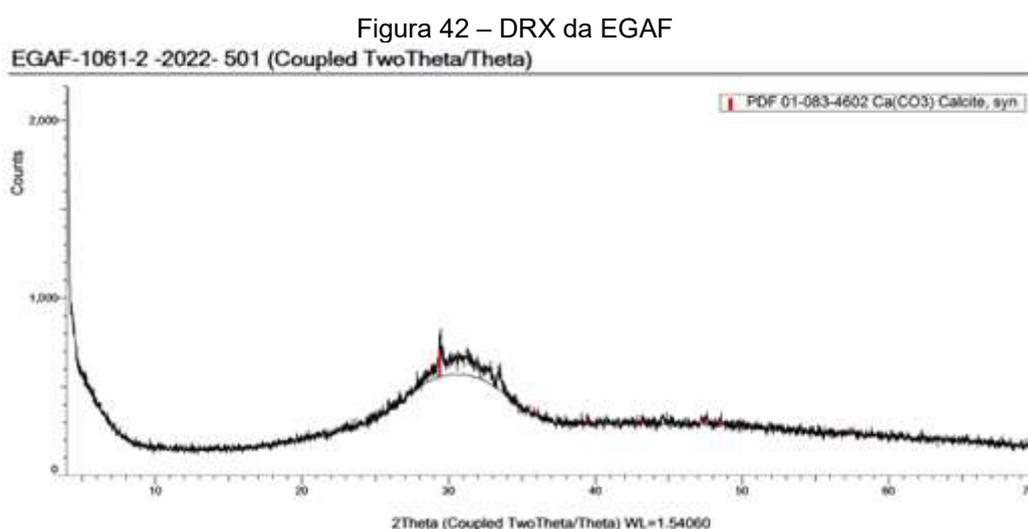
PPC: Perda por calcinação

Fonte: Centro De Tecnologia Mineral – CETEM-ES/MCTI

Nota-se uma presença majoritária de Óxido de Cálcio (CaO) e Sílica (SiO<sub>2</sub>), totalizando praticamente 68% da composição da EAGF utilizada. Seguido por Alumina e Óxido de Magnésio.

Observa-se que o valor de CaO/SiO<sub>2</sub> é maior do que 1, caracterizando uma escória básica. Além disso, como o teor de alumina está abaixo de 10%, essa EGAF é considerada de baixa reatividade.

Avaliou-se o DRX da EGAF utilizada nessa pesquisa, e nota-se que praticamente não há presença de picos cristalinos, comportamento típico de material com predominância de fases vítreas. Os únicos picos identificados no gráfico são referentes as Calcitas (CaCO<sub>3</sub>) presentes na composição da EGAF, conforme figura 42.

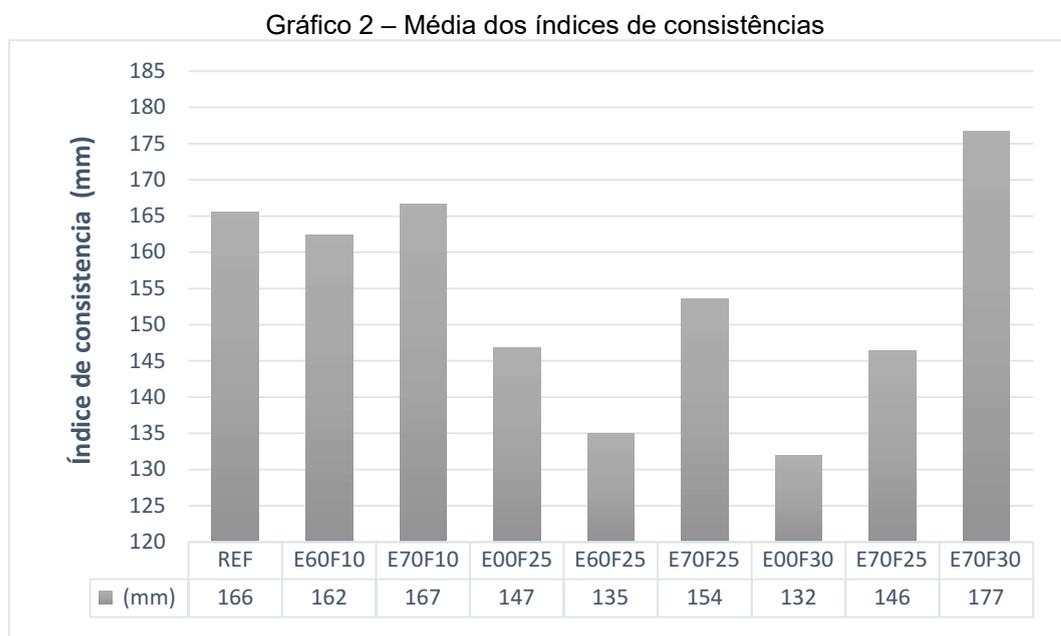


Fonte: Centro De Tecnologia Mineral – CETEM/MCTI

### 4.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

#### 4.3.1 Índice de Consistência

A média dos dados de Índice de consistência obtidos estão apresentados no gráfico 2. O maior valor encontrado foi o do traço E70F30, com incorporação de 70% de EGAF e 30% de FGD, ou seja, argamassa com 0% de cimento. Já o menor valor encontrado foi no traço E00F30, com 0% de incorporação de EGAF e 30% de FGD.



Fonte: Elaborado pela autora.

Adotou-se a análise fatorial estatística do tipo ANOVA, com 95% de confiabilidade e verificou-se quais fatores afetaram diretamente os dados de Índice de Consistência, conforme tabela 15.

Tabela 15 – Análise estatística – ANOVA

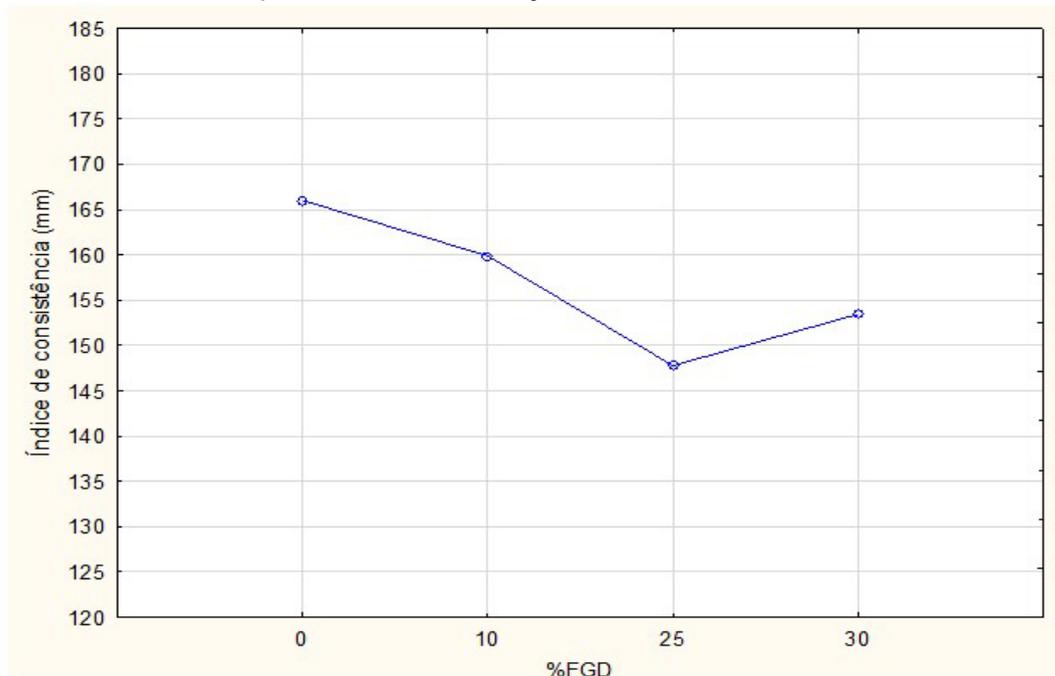
Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Probabilidade
%FGD	661,00	2	330,50	7,06	0,005	99,46%
%EGAF	3217,90	2	1608,90	34,40	0,000	100,00%
%FGD*%EGAF	2004,80	4	501,20	10,71	0,000	99,99%
Erro	842,00	18	46,80			

Fonte: Elaborado pela autora.

Na tabela 15 nota-se que todos os fatores foram significativos, uma vez que todos possuem valor de p inferior a 5%, portanto, todos foram analisados. O gráfico 3

apresenta os resultados do fator isolado do percentual de incorporação de FGD nas misturas.

Gráfico 3 - Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre o índice de consistência



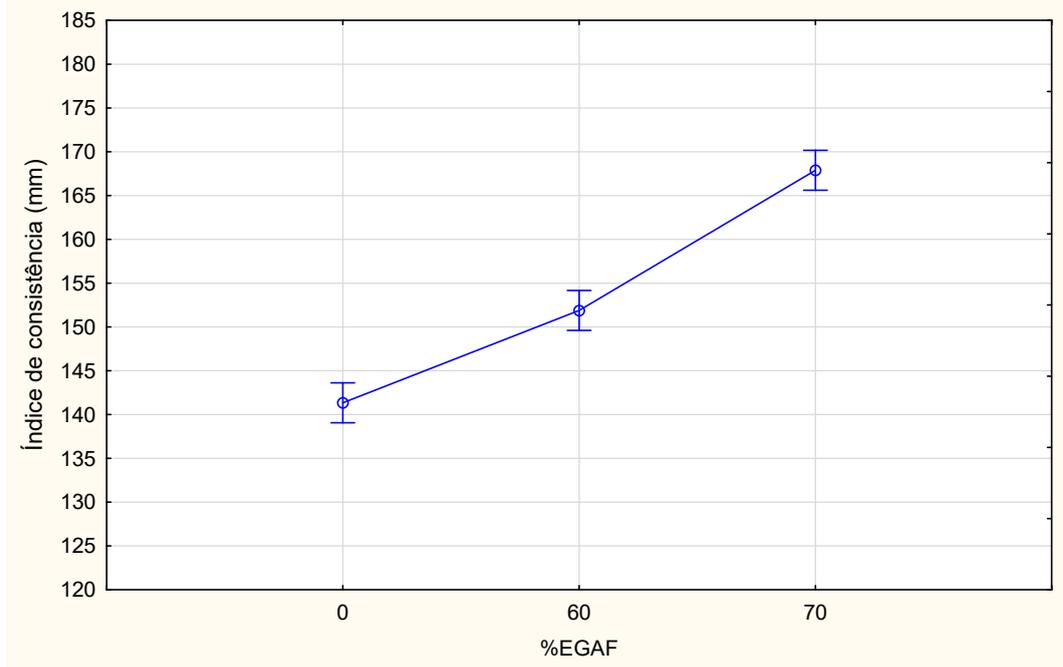
Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que apesar de ter ocorrido um leve aumento no índice de consistência de 25 para 30% de substituição do FGD, a presença de FGD nas argamassas acarretou uma diminuição do espalhamento das misturas, quando comparado ao traço de referência.

Esse comportamento pode ser associado a uma maior superfície específica do FGD quando comparado ao Cimento Portland. Quanto maior a superfície específica, maior a área específica e maior a necessidade de água na mistura para uma mesma trabalhabilidade, como a relação água/ aglomerante foi fixado, houve a redução da trabalhabilidade devido a incorporação do FGD.

Ao contrário do efeito isolado de substituição do FGD, a substituição de Cimento Portland por EGAF, aumentou o índice de consistência das argamassas. O gráfico 4 apresenta os resultados do efeito isolado da substituição de EGAF.

Gráfico 4 - Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre o índice de consistência



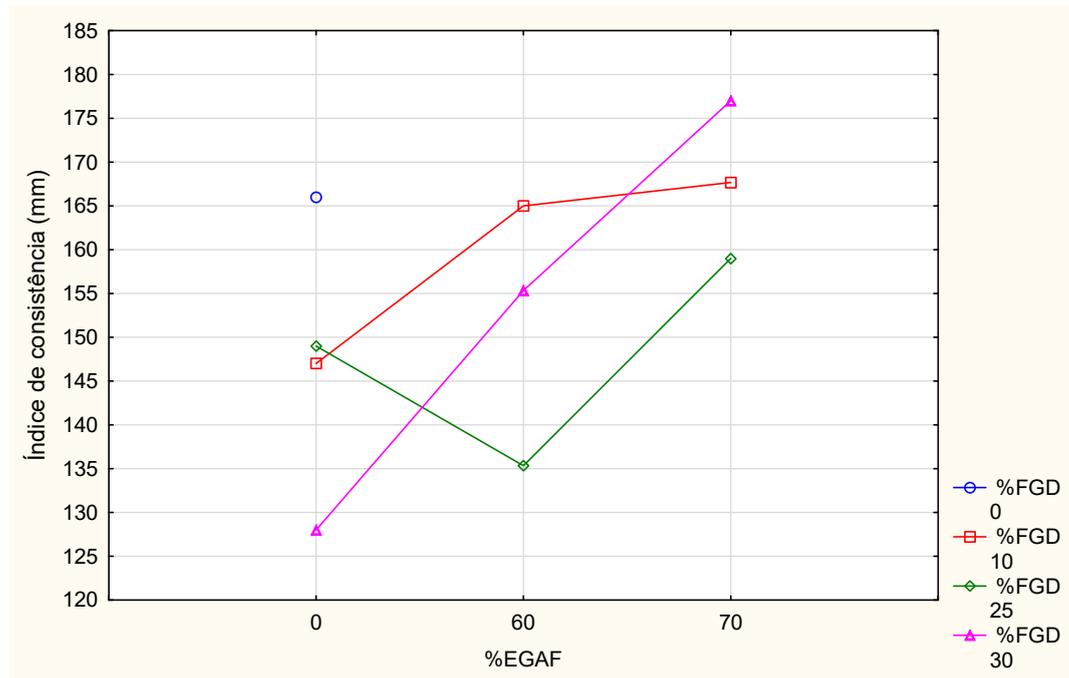
Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se que quanto maior o percentual de substituição, maior foi o espalhamento da mistura.

Johari, Megat et al. (2011) também encontraram resultados semelhantes durante sua pesquisa. A inserção da EGAF melhorou a trabalhabilidade da mistura e à medida que esse percentual de substituição aumentou, houve também o aumento significativo da trabalhabilidade. Esse comportamento pode ser atribuído a melhora da dispersão das partículas de cimento e pouca necessidade de absorção de água durante a mistura.

O efeito da interação dos diferentes percentuais de EGAF e FGD estão contidos no gráfico 5.

Gráfico 5 - Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF sobre o índice de consistência



Fonte: Elaborado pela autora.

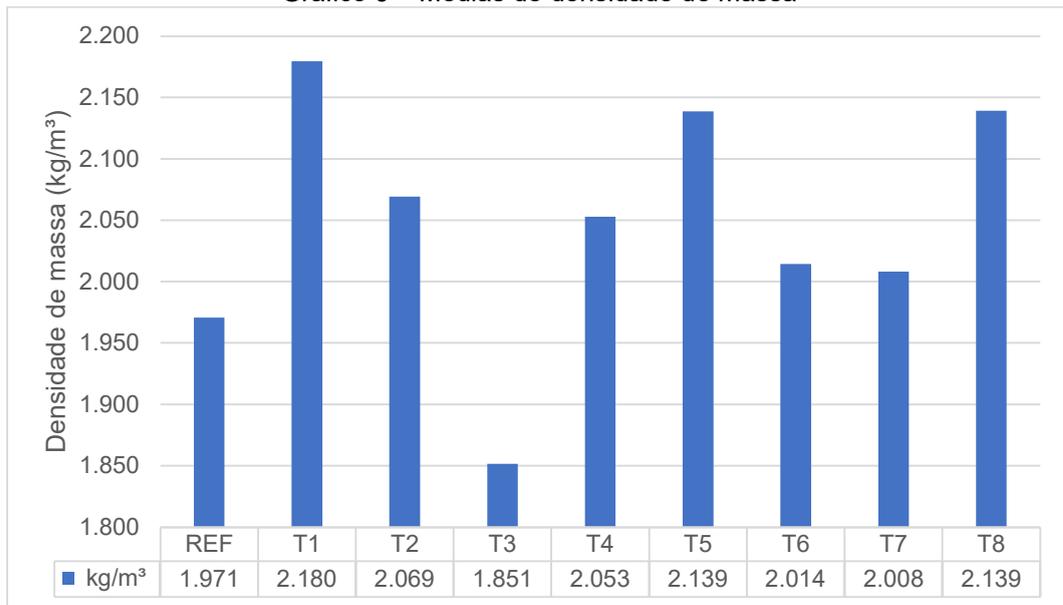
Observou-se que independente do percentual de incorporação do FGD, quando não há incorporação de EGAF, os índices de consistência são inferiores ao de referência, efeito que pode estar associado a maior finura do material que aumenta a necessidade de água na mistura.

A melhora da trabalhabilidade das misturas contendo EGAF pode estar associada a superfície mais lisa do material, o que favorece o deslizamento das partículas durante o ensaio (ACI 233 R03, 2000).

#### 4.3.2 Densidade de Massa

Os resultados das médias das densidades de massa no estado fresco estão apresentados no gráfico 6. A menor densidade corresponde ao traço T3 (E00F25), sendo  $1.851 \text{ kg/m}^3$  e a maior densidade de  $2.180 \text{ kg/m}^3$  do traço T1 (E60F10).

Gráfico 6 – Médias de densidade de massa



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados foram analisados estatisticamente para verificar quais eram os fatores que possuíam interferência significativa nessa propriedade. Os dados da ANOVA estão contidos na tabela 16.

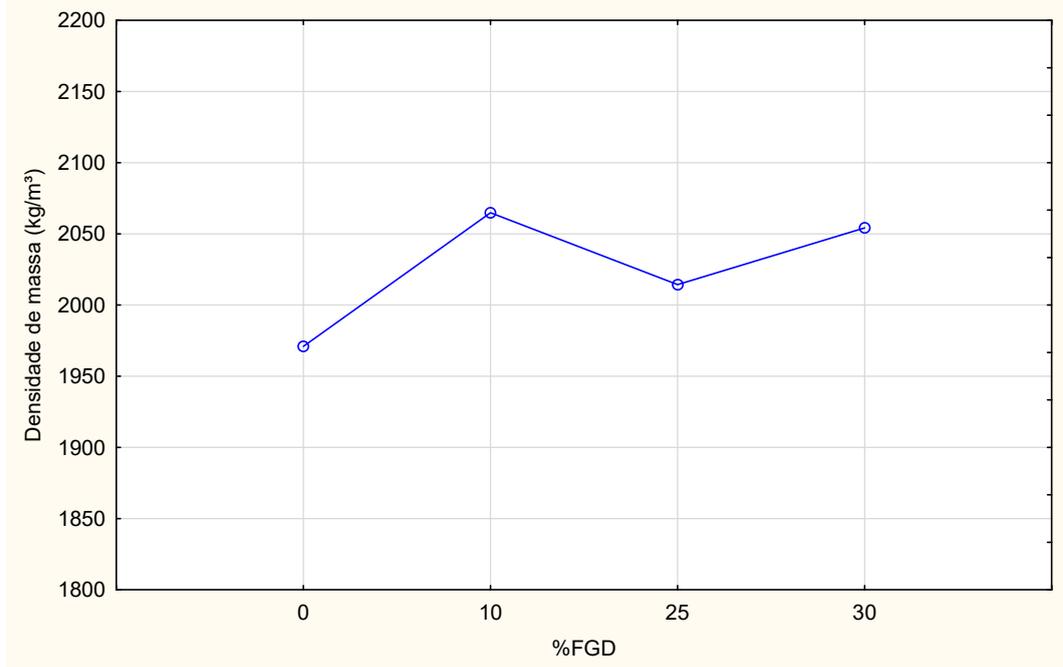
Tabela 16 – Análise estatística – ANOVA

Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Probabilidade
%FGD	8.501,00	2	4.251,00	3.188,00	0,000	100,00%
%EGAF	108.002,00	2	54.001,00	40.501,00	0,000	100,00%
%FGD*%EGAF	56.599,00	4	14.150,00	10.612,00	0,000	100,00%
<b>Erro</b>	12,00	9	1,00			

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme apresentado na tabela, todos os fatores foram significativos. O comportamento isolado do percentual de incorporação do FGD pode ser observado no gráfico 7.

Gráfico 7 - Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre a densidade de massa



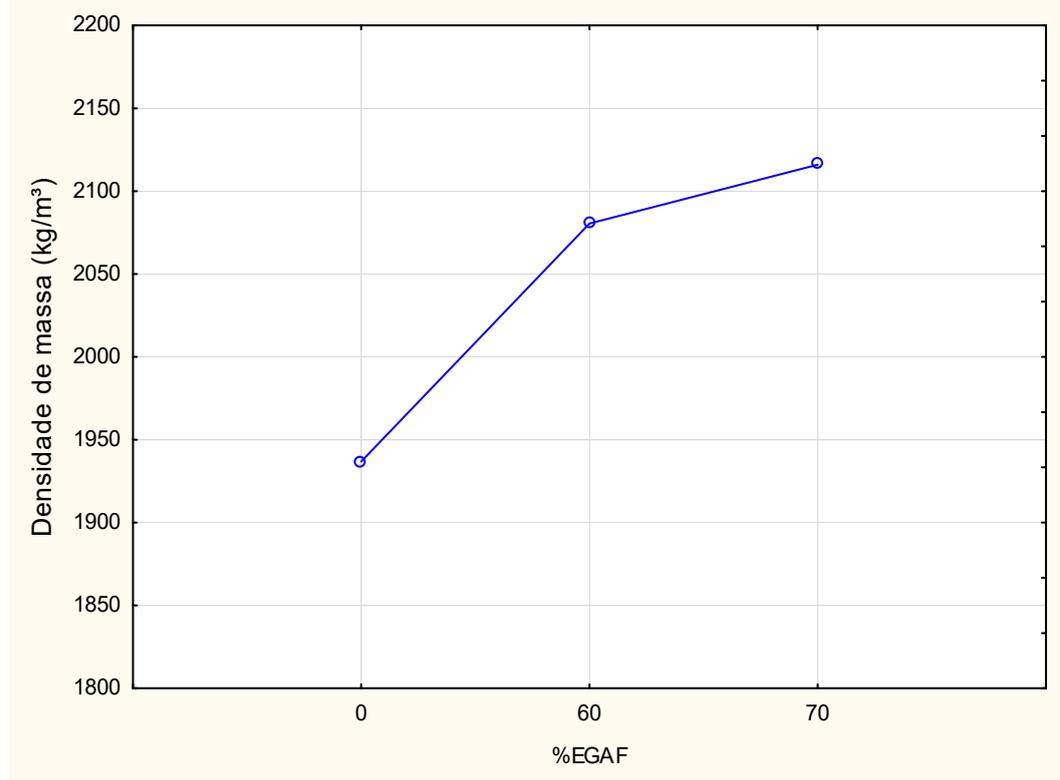
Fonte: Elaborado pela autora.

Ao observar o efeito isolado do percentual de incorporação de FGD, nota-se que a incorporação, independente do percentual, provoca o aumento na densidade de massa das misturas. Esse efeito mostra uma tendência do FGD de apresentar um comportamento de filler na matriz, uma vez que por conta da sua finura, consegue penetrar nas zonas de transição, além de preencher os vazios da mistura.

Efeito semelhante foi encontrado por Teixeira (2019), onde a utilização do FGD ocasionou um preenchimento dos vazios e um melhor empacotamento da matriz, indicado pelo aumento das massas específicas das misturas estudadas.

O gráfico 8 apresenta o comportamento da incorporação de EGAF sobre a variável de resposta densidade de massa.

Gráfico 8 - Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre a densidade de massa



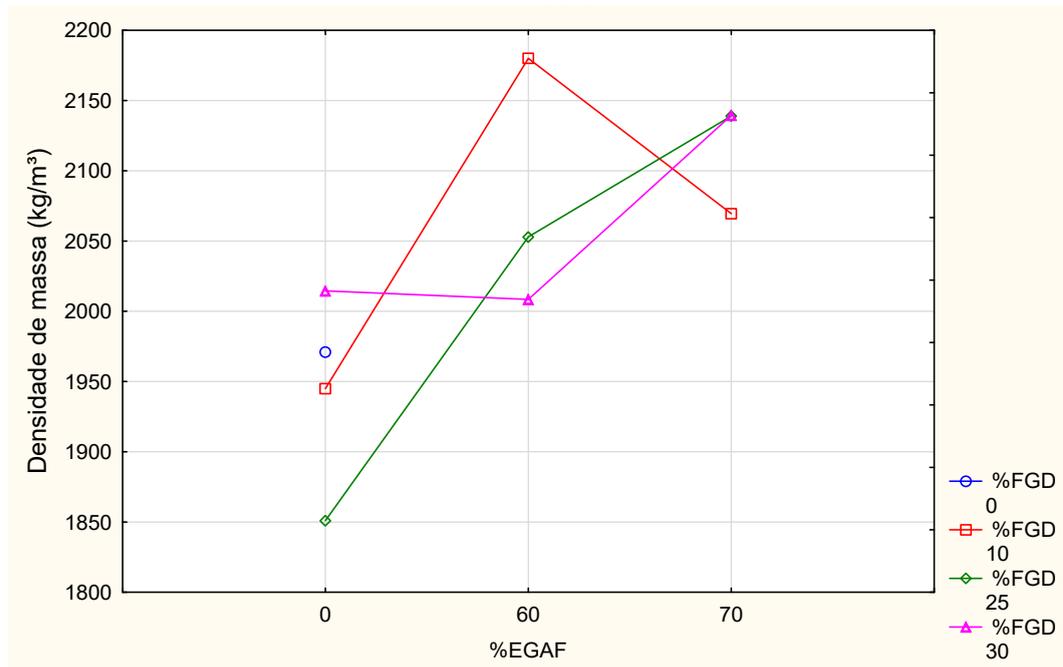
Fonte: Elaborado pela autora.

Efeito semelhante é apresentado no gráfico 8, onde nota-se que o quanto maior o percentual de incorporação de EGAF, maior é a densidade de massa da mistura. Esse comportamento pode ser atribuído ao preenchimento dos poros pelas partículas de EGAF, ocasionando a diminuição da porosidade e consequentemente o aumento da densidade de massa, uma vez que os poros passam a conter as partículas de EGAF.

Jinpeng et al. (2022) verificaram que a incorporação da EGAF na matriz resulta em uma melhor estrutura de poros e menor porosidade, uma vez que a EGAF possui partículas mais finas que absorvem o hidróxido de cálcio (CH) liberado pelo processo de hidratação do cimento e transformam em gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H).

O comportamento da interação entre o FGD e a EGAF frente a densidade de massa pode ser analisado pelo gráfico 9.

Gráfico 9 - Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF sobre a densidade de massa



Fonte: Elaborado pela autora.

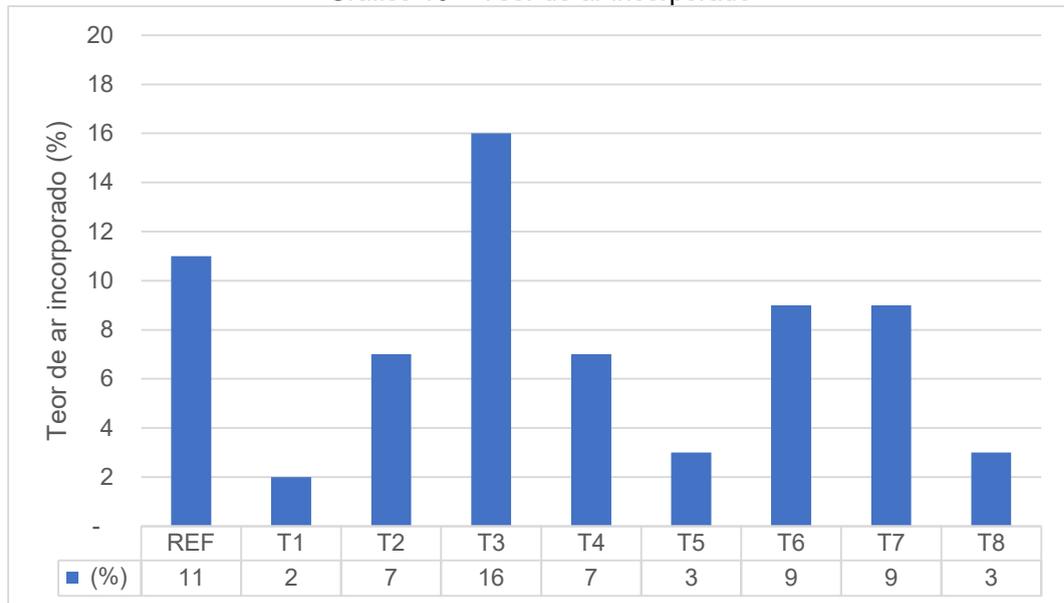
As considerações levantadas anteriormente nos gráficos isolados de incorporação de FGD e EGAF, apontam que a incorporação desses materiais tende a aumentar a densidade de massa, uma vez que preenchem os poros da mistura. Porém, no gráfico 9 verifica-se que os traços contendo apenas a incorporação do FGD de 10 e 25% apresentam densidade inferior ao de resistência. Esse comportamento mostra que até um percentual de 25% de incorporação de FGD, não acontece o efeito filler esperado pelo material, logo, não há valores significativos de preenchimento das zonas de transição e nem dos poros. Efeito esse que já se observa com o percentual de 30% de FGD.

#### 4.3.3 Teor de ar Incorporado

Após a obtenção dos valores de densidade de massa apresentados no item 4.3.2, foi possível estabelecer uma relação com a densidade de massa teórica para obtenção dos valores de Teor de ar incorporado, que estão apresentados no gráfico 10.

A densidade de massa teórica foi obtida utilizando as massas específicas de cada um dos materiais utilizados na mistura, na sua forma anidra.

Gráfico 10 – Teor de ar incorporado



Fonte: Elaborado pela autora.

Para verificar o efeito de cada um dos fatores sobre o teor de ar incorporado, foi realizado a análise de variância – ANOVA, com um nível de confiabilidade de 95%. Todos os fatores analisados foram significantes, como pode ser observado na tabela 17.

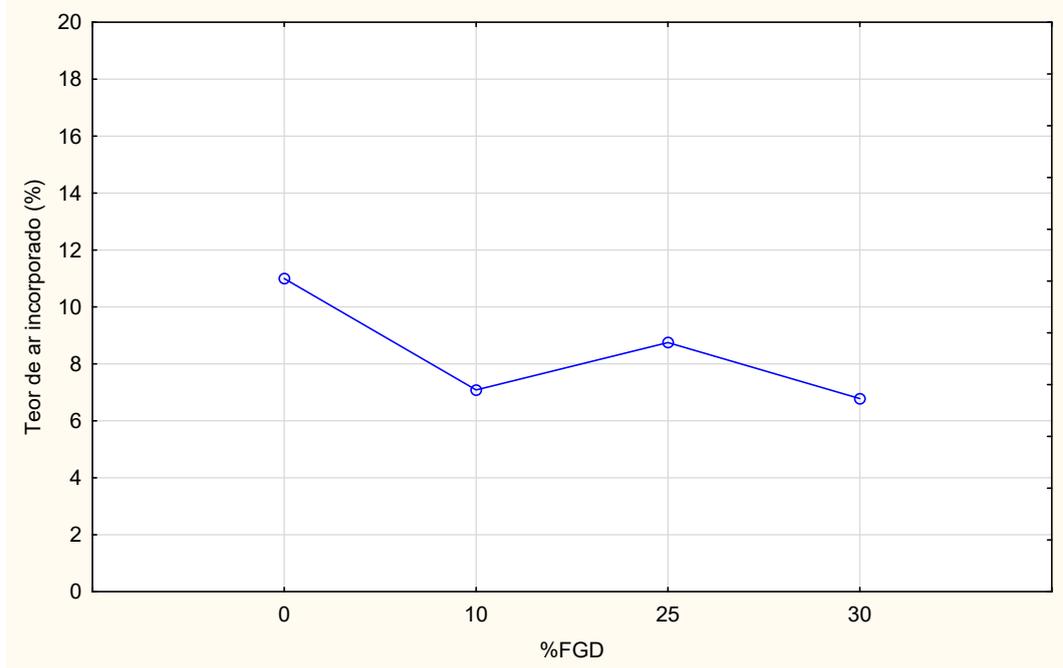
Tabela 17 – Análise estatística – ANOVA – teor de ar incorporado

Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Probabilidade
%FGD	13,47	2	6,74	6,49	0,018	98,20%
%EGAF	254,12	2	127,06	122,37	0,000	100,00%
%FGD*%EGAF	117,03	4	29,26	28,18	0,000	100,00%
<b>Erro</b>	9,35	9	1,04			

Fonte: Elaborado pela autora.

O gráfico 11 apresenta o efeito isolado do FGD, onde nota-se que o teor de ar incorporado diminui conforme há o aumento do teor de incorporação de FGD.

Gráfico 11 - Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre o teor de ar incorporado

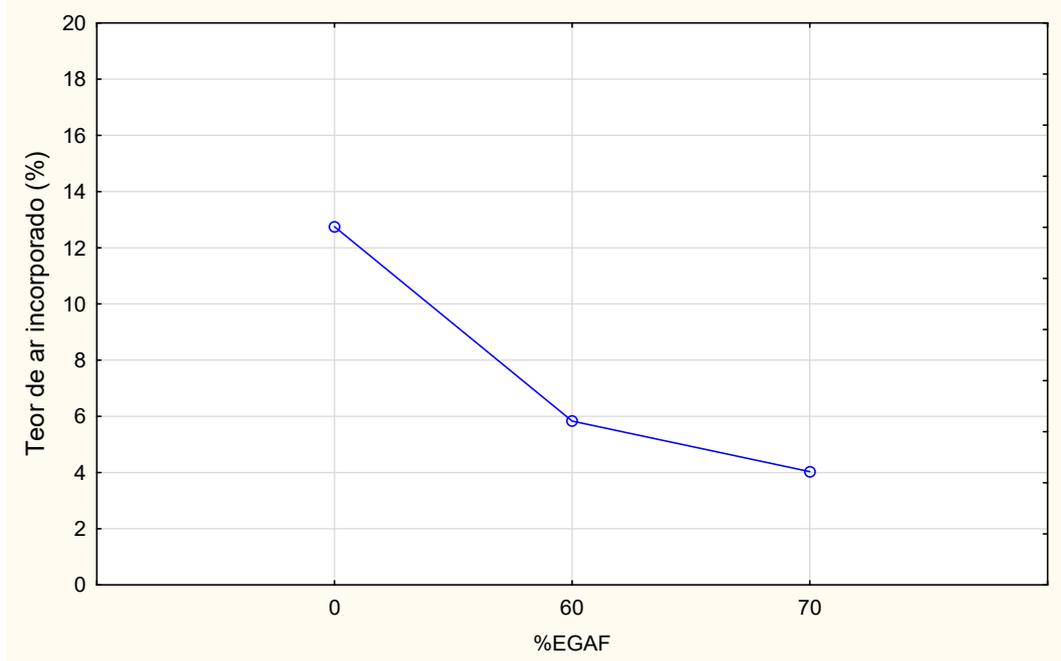


Fonte: Elaborado pela autora.

O comportamento do teor de ar incorporado corrobora com a ideia de efeito filler apresentado pela incorporação do FGD e que também foi descrito em outras pesquisas. Esse efeito resultou em uma mistura com melhor empacotamento, logo, com menor número de vazios e, conseqüentemente, menor teor de ar incorporado. O comportamento do teor de ar incorporado vai ao encontro de misturas com maiores densidades de massa, conforme descrito no tópico 4.3.2.

O gráfico 12 apresenta o efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre a variável de resposta, teor de ar incorporado, nas misturas produzidas. Os valores gráficos foram representados a partir da ANOVA.

Gráfico 12 - Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre o teor de ar incorporado



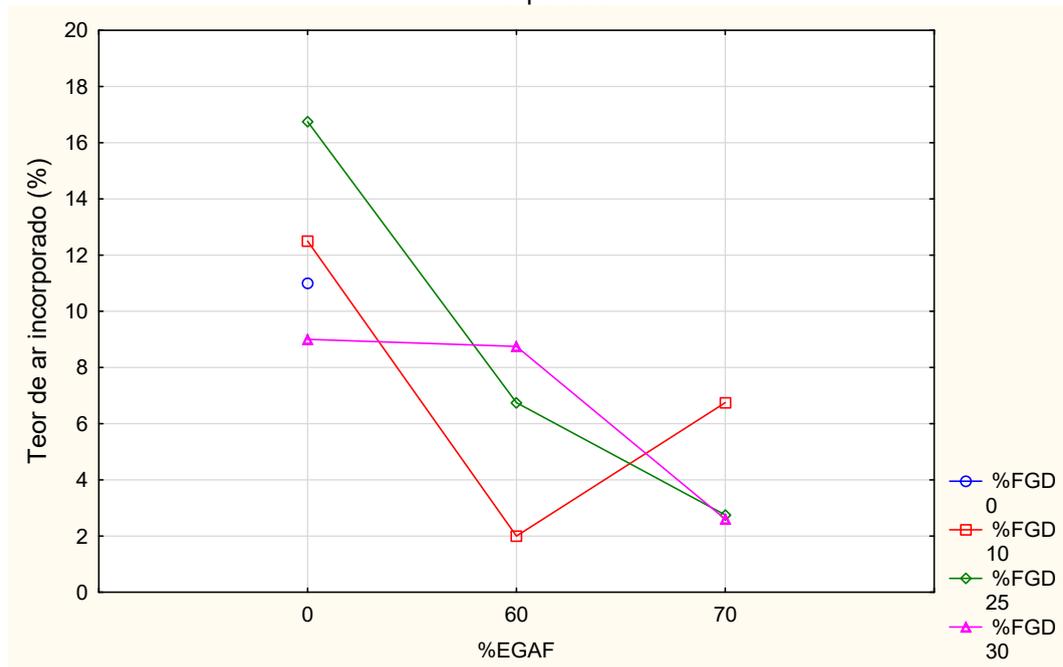
Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto maior o percentual de incorporação de EGAF, menor foi o teor de ar incorporado da mistura. A incorporação da EGAF também proporciona uma melhora no empacotamento das matrizes, uma vez que ela preenche os poros e diminui a porosidade das misturas.

Ozbay et al. (2023) aponta que diversas pesquisas e documentos comprovam que a utilização da EGAF modifica o tamanho dos poros e diminui a porosidade das misturas e atribui esse comportamento principalmente a reação com o CH e a liberação de álcalis durante a hidratação do cimento.

O gráfico 13 apresenta a interação do FGD e da EGAF frente ao teor de ar incorporado.

Gráfico 13 - Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF sobre o teor de ar incorporado



Fonte: Elaborado pela autora.

O comportamento apresentado corrobora com os dados apresentados até agora em relação a densidade de massa das misturas. Quando os resíduos são incorporados, há uma melhora no empacotamento das matrizes, diminuindo a porosidade, o que acarreta um menor teor de ar incorporado.

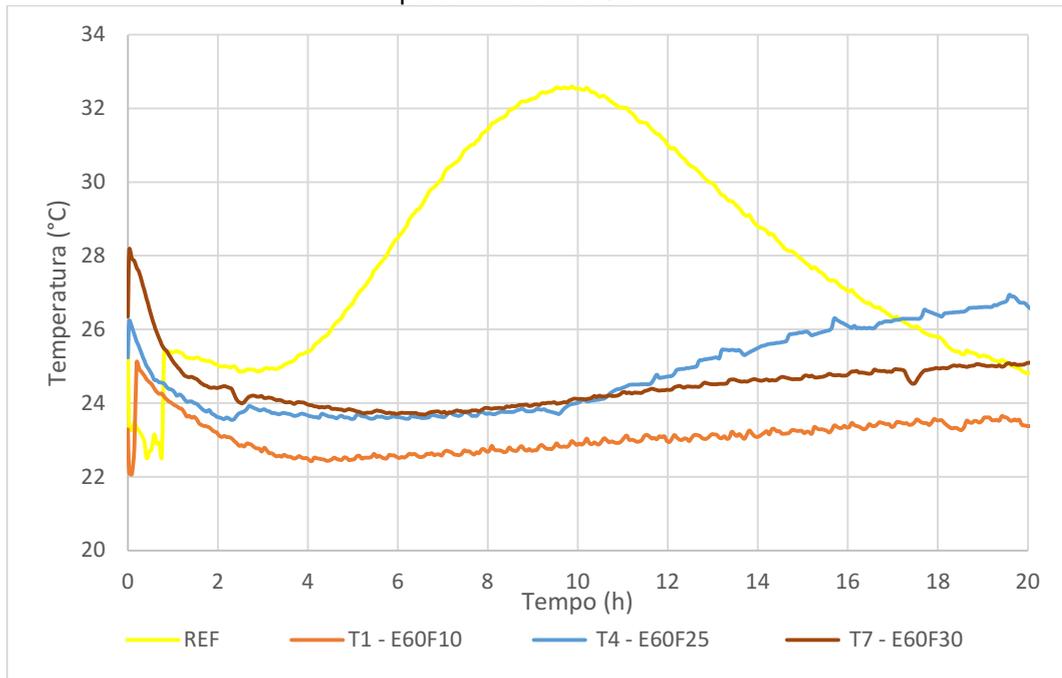
Os traços contendo até 25% de FGD e que não possuem EGAF em sua composição, não apresentam significativamente o efeito filler esperado, uma vez que essas misturas ainda possuem teor de ar incorporado maior que o de referência. Nota-se que esse comportamento se inverte ao incorporar 30% de FGD.

#### 4.3.4 Calorimetria

Para possibilitar a visualização do comportamento de cada mistura e determinar o início de pega, utilizou-se a técnica de calorimetria.

No gráfico da figura 14, estão apresentadas as curvas dos traços contendo 60% de EGAF e com variação do percentual de FGD. Dessa forma, torna-se possível a avaliação do efeito isolado do percentual do FGD.

Gráfico 14 – Curva temperatura x tempo dos traços contendo 60% de EGAF e variando os percentuais de FGD



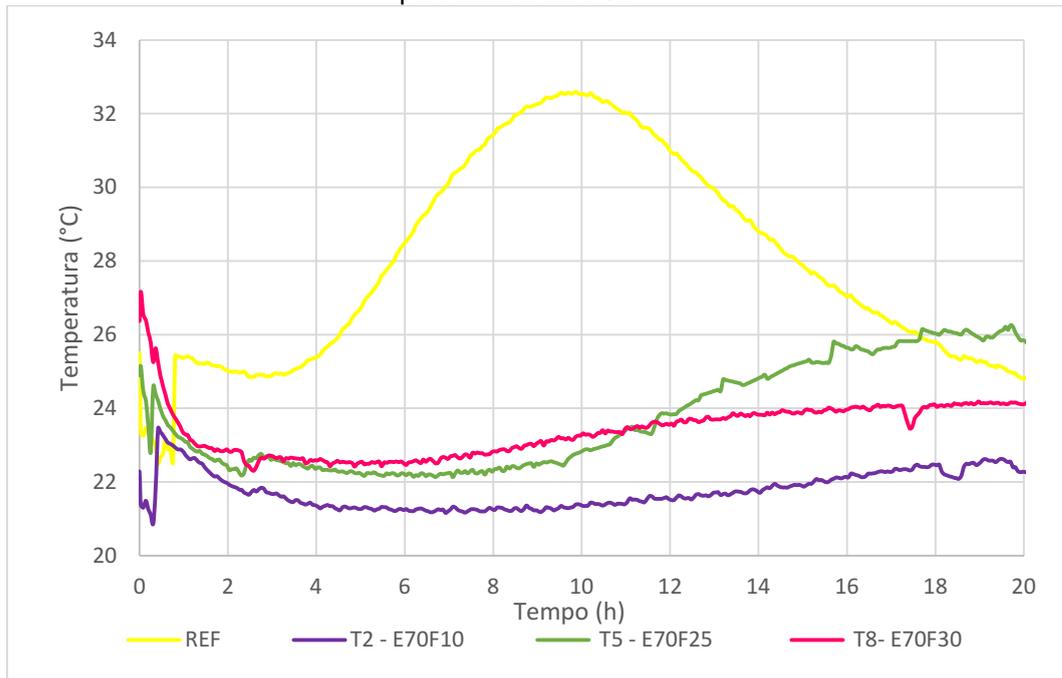
Fonte: Elaborado pela autora.

A curva do comportamento dos traços contendo os resíduos foi muito mais suave do que a curva do traço de referência. Esse fato pode ser justificado pelo alto percentual de substituição de cimento por EGAF, já que uma das principais vantagens da utilização da EGAF nas matrizes é a redução do calor de hidratação das misturas, devido a suas reações mais lentas de hidratação.

Apesar do comportamento das misturas no gráfico serem muito semelhantes, observa-se que quanto maior o percentual de FGD das misturas, maior é a faixa de temperatura onde acontece o período de indução, logo, maior é a quantidade de calor liberada. No traço T8 contendo 30% de FGD, a temperatura é em torno de 24°C, o T4 com 25% de FGD possui um patamar um pouco abaixo de 24°C e o T1 com 10% de FGD na faixa de 22°C. Dessa forma, o incremento de FGD ocasionou o aumento da temperatura e conseqüentemente, uma maior taxa de liberação de calor.

O comportamento das amostras com incorporação de 70% de EGAF também foram analisadas e estão apresentadas no gráfico 15.

Gráfico 15 – Curva temperatura x tempo dos tracos contendo 70% de EGAF e variando os percentuais de FGD

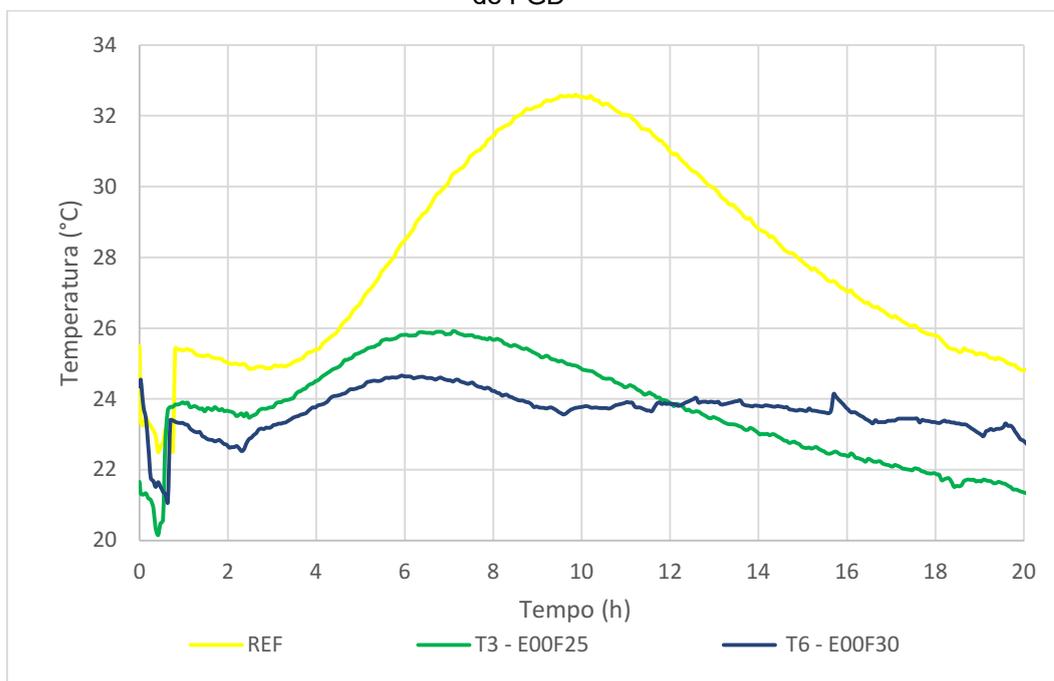


Fonte: Elaborado pela autora.

O comportamento das curvas das misturas com 70% de EGAF é muito semelhante ao descrito anteriormente nas misturas com 60% de incorporação. Inclusive, da mesma forma que analisado anteriormente, quanto maior o percentual de FGD nas misturas, maior é a temperatura, logo, maior é a taxa de calor liberado. Como esperado, o aumento do percentual de EGAF acarretou uma diminuição da temperatura das misturas, logo, reduziu a taxa de calor liberado.

Por conseguinte, analisou-se as curvas das amostras com 0% de EGAF e variando o percentual de FGD, como pode ser observado no gráfico 16.

Gráfico 16 – Curva temperatura x tempo dos traços contendo 0% de EGAF e variando os percentuais de FGD



Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que as curvas das amostras que não contém EGAF seguem uma forma muito mais semelhante ao traço de referência, ou seja, bem menos suaves que as apresentadas nos gráficos 14 e 15. Esse comportamento era esperado, uma vez que as reações nas misturas contendo EGAF são mais lentas, prolongando o período de indução.

Dessa forma, foi possível inferir que o FGD quando utilizado sozinho na mistura, não proporciona o prolongamento dos tempos de indução, logo, possuem tempos de pega inferiores aos demais traços contendo EGAF e o de referência. Sendo assim, o FGD isolado não apresenta desempenho favorável nessa propriedade. Entretanto, observa-se uma redução da taxa de calor liberado quando comparado à referência, uma vez que a faixa de temperatura é inferior.

Os tempos de pega foram determinados de acordo com a metodologia proposta e estão apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Início de tempo de pega por percentual de incorporação

%EGAF	Início do tempo de pega (h)			
	%FGD			
	0	10	25	30
0	3,5		2,5	2,0
60		6,0	9,5	8,0
70		9,0	8,5	6,5

Fonte: Elaborado pela autora.

No que tange os tempos de pega das amostras com 0% de incorporação de EGAF, observou-se que ao aumentar o percentual de incorporação de FGD nas argamassas, ocorreu uma redução no tempo de pega, logo, a substituição isolada de CP por FGD proporcionou uma aceleração nas reações químicas de hidratação. Ao substituir o CP por FGD e EGAF simultaneamente, os tempos de pega aumentaram expressivamente.

Guo XiaoLu et al. (2013) observaram que a incorporação de FGD nas misturas que continham EGAF, prolongou o tempo de pega das matrizes quando comparadas as matrizes contendo apenas EGAF. Eles atribuíram esse prolongamento ao fato de que o FGD libera uma alta taxa de sulfatos na solução durante a hidratação do cimento, dessa forma, esses sulfatos reagem com os aluminatos tricálcicos da solução formando etringita, que por sua vez, cria uma espécie de camada que impede a difusão dos íons necessários para formar os hidratos necessários para o endurecimento das misturas.

#### 4.3.5 Retenção de Água

Realizou-se o ensaio conforme a metodologia e os valores encontrados para cada uma das misturas estudadas, foram apresentados no gráfico 19.

Tabela 19– Médias dos valores de retenção de água em cada traço

%EGAF	Retenção de água (%)			
	%FGD			
	0	10	25	30
0	94		95	95
60		94	94	93
70		94	94	94

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que a propriedade de retenção de água não sofreu grandes influências dos resíduos estudados nessa pesquisa, uma vez que os resultados foram muito semelhantes, independente dos percentuais de incorporação de FGD e EGAF.

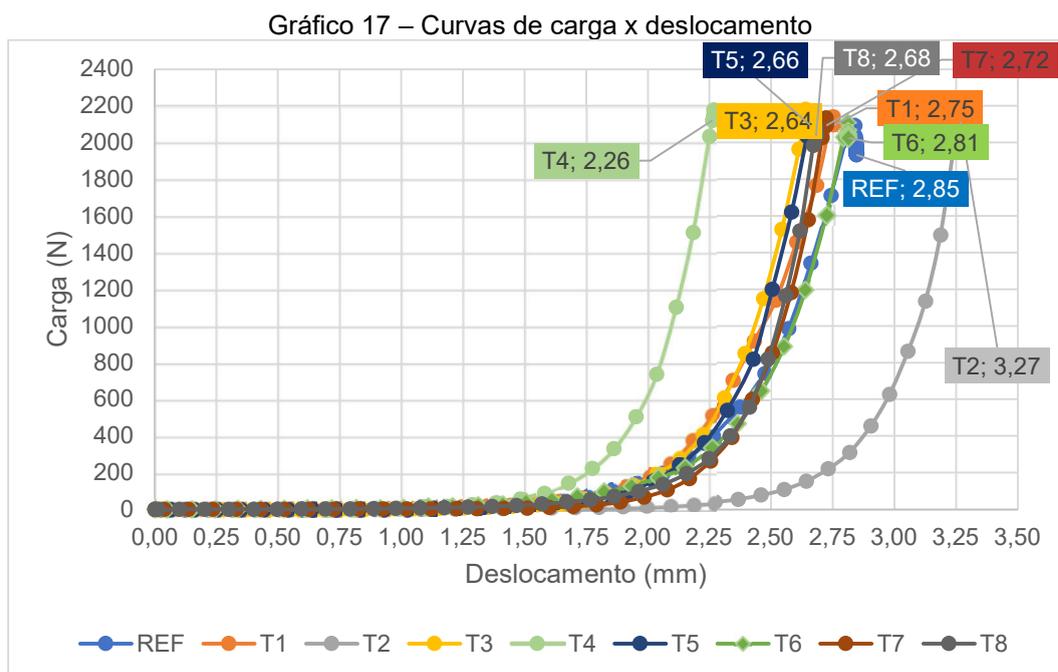
Observa-se uma pequena variação quando não há incorporação de EGAF nas matrizes. Nesses casos, quanto maior o percentual de substituição de FGD na mistura, maior é o percentual de retenção de água. Esse efeito pode estar associado a finura do material. Quanto maior a superfície específica, maior a quantidade de água adsorvida ao redor dos grãos, o que dificulta a saída dessa água, frente a um esforço externo de sucção.

A permeabilidade das misturas também pode favorecer a saída da água. Como mencionado em outras propriedades, a incorporação da EGAF nas misturas melhora a microestrutura, diminuindo o tamanho dos poros e reduzindo a permeabilidade. Esse efeito ocorre principalmente pela reação da EGAF com o CH.

#### **4.3.6 Squeeze Flow**

Com o intuito de explorar a trabalhabilidade das argamassas, realizou-se a técnica de squeeze-flow. Como os resultados do índice de consistência foram muito semelhantes e a técnica é considerada monoponto, uma vez que não há alteração da carga aplicada, adotou-se o squeeze flow na tentativa de melhorar o entendimento do comportamento das misturas frente a variação da aplicação de carga.

No gráfico 17 verifica-se as curvas de carga x deslocamento das amostras analisadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos gráficos apresentados na figura 17, não é possível identificar o estágio I (figura 9), onde há muita dispersão de tensão para uma taxa de deformação pequena, porém, de acordo com Min, Erwin e Jennings (1994) o fato de não identificar o estágio I pode ser atribuído a baixa precisão da célula de carga utilizada no ensaio para pequenas cargas.

O estágio II é bem perceptível e caracteriza a argamassa se deformando plasticamente. Todos os traços estudados apresentam curvas semelhantes de comportamento. Observou-se que o início do estágio III ocorreu em quase todos os traços estudados, com exceção do T2 e T4, próximo ao deslocamento de 2,00mm. O estágio III, ao contrário do observado no estágio anterior, é caracterizado por necessitar de elevadas cargas para promover qualquer deslocamento nas partículas, caracterizado pelo enrijecimento da argamassa por deformação.

Apesar da técnica do squeeze flow ser considerada mais assertiva, não verificou-se grandes diferenças no comportamento das amostras ensaiadas.

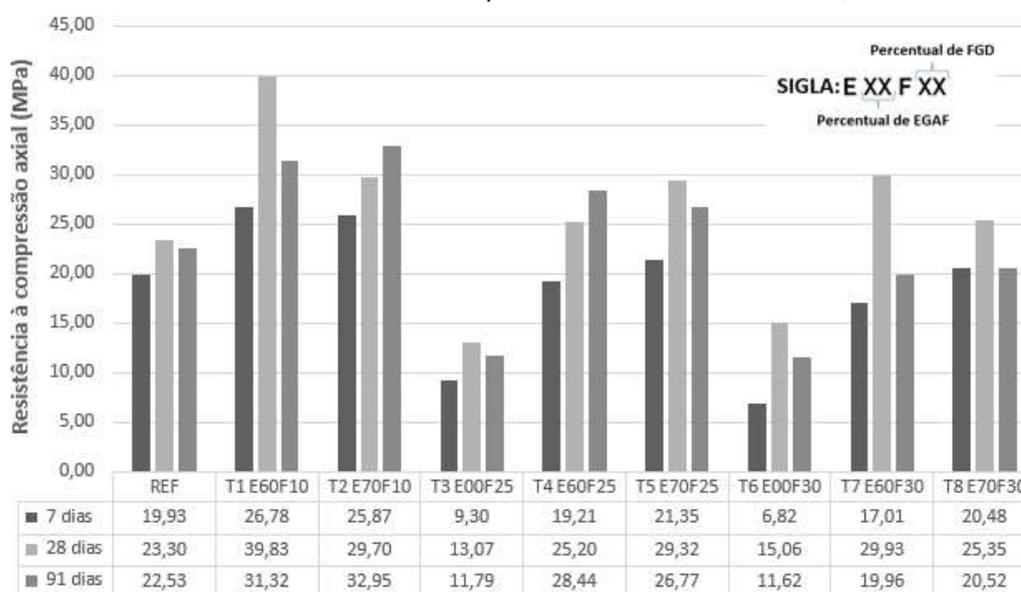
O traço T4 apresenta uma curva com menores deslocamentos, logo, necessita maiores cargas para sofrer um mesmo deslocamento, quando comparado aos demais. Dessa forma, pode-se dizer que apresenta uma mistura com maior viscosidade, logo, menos fluída. O traço T2 apresentou um comportamento oposto ao T4.

## 4.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

### 4.4.1 Resistência à Compressão Axial

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova moldados estão apresentados no gráfico 18.

Gráfico 18 – Médias de resistência à compressão axial nas idades de 7, 28 e 91 dias



Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos dados apresentados no gráfico 18, verificou-se que a maior resistência a compressão aos 28 dias é do traço T1 (E60F10), com 60 e 10% de EGAF e FGD, respectivamente. A menor resistência aos 28 dias ocorreu no traço T3 (E00F25) com composição com 0% de EGAF e 25% de FGD. No entanto, ao avaliar as resistências aos 91 dias, observa-se que a maior resistência pertence ao traço T2 (E70F10) e a menor permanece sendo T3 (E00F25).

Os valores obtidos nesta pesquisa no traço T7 (E60F30) se assemelham aos dados obtidos por Pang, Sol e Huang (2020) que também estudaram argamassas contendo substituição de FGD e EGAF. O traço FG3560, contendo 35% de FGD e 60% de EGAF desempenhou resistências semelhantes até os 28 dias de idade, conforme apresentado na tabela 20.

Tabela 20 – Comparativo de resistência à compressão axial de diferentes pesquisas

Idade	Resistência à compressão axial (MPa)	
	Pang, Sol e Huang (2020) 35%FGD/ 60%EGAF	Morelo (2023) 30%FGD/ 60%EGAF
3d	15,20	-
7d	-	17,01
28d	35,10	29,93

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores apresentados no gráfico 19 foram as médias das resistências nas diferentes idades. Contudo, para analisar se, de fato, as variáveis escolhidas nessas misturas representam uma variação no comportamento mecânico em relação às misturas de referência, foi realizada uma inferência estatística de análise de variância com o intuito de verificar quais variáveis seriam significativas no comportamento mecânico das misturas, com diferentes percentuais de incorporação dos coprodutos. Os dados obtidos estão apresentados na tabela 21.

Tabela 21 – Análise estatística – ANOVA

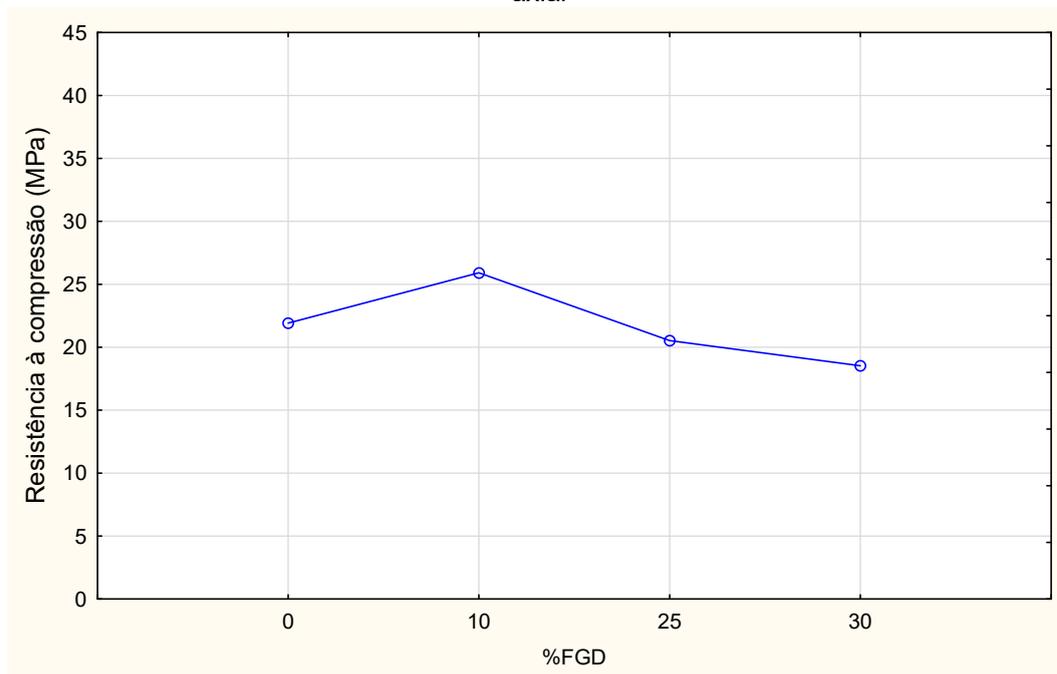
Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Probabilidade
%FGD	1312,44	2	656,22	152,69	0,000	100,00%
%EGAF	5642,38	2	2821,19	656,46	0,000	100,00%
Idade	1176,60	2	588,30	136,89	0,000	100,00%
%FGD*%EGAF	243,69	4	60,92	14,18	0,000	100,00%
%FGD*Idade	128,34	4	32,08	7,47	0,000	100,00%
%EGAF*Idade	111,82	4	27,95	6,50	0,000	99,99%
%FGD*%EGAF*Idade	266,84	8	33,35	7,76	0,000	100,00%
Erro	464,14	108	4,30			

Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise estatística dos dados obtidos, é possível verificar que todos as variáveis analisadas influenciaram na propriedade de resistência a compressão axial, uma vez que os valores de p são inferiores a 5%. Dessa forma, todos foram significativos e seus gráficos foram analisados.

No gráfico 19 observa-se o efeito isolado do percentual de FGD frente a propriedade de resistência à compressão.

Gráfico 19 – Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Elaborado pela autora.

Observou-se que a matriz cimentícia com incorporação de 10% de FGD apresentou resistência à compressão maior que o traço de referência, porém, nota-se uma diminuição da resistência à medida que temos um incremento na quantidade de incorporação desse resíduo.

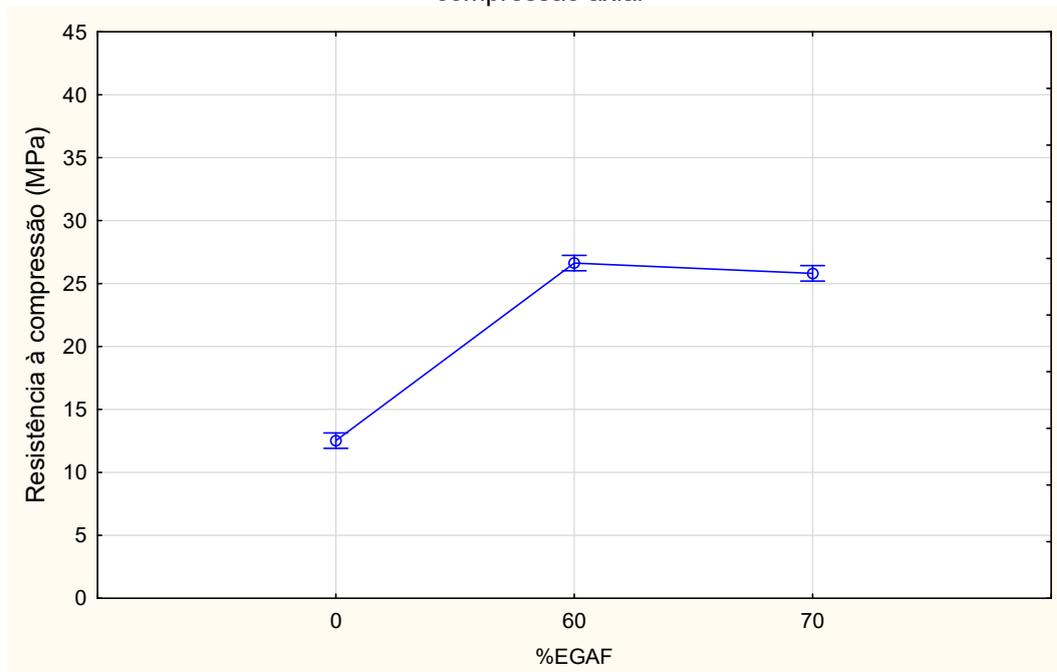
O mesmo comportamento foi identificado por Teixeira (2019), onde ao avaliar o efeito isolado do FGD, identificou que ao aumentar o nível de adição de FGD de 5% para 10 e 15%, ocorreu uma diminuição da resistência à compressão axial. Inclusive análogo ao encontrado nessa pesquisa, os traços com até 10% de incorporação apresentaram resistência à compressão superior ao traço de referência.

Jiang, Li et al. (2018) também estudaram a incorporação de FGD em matrizes cimentícias e assim como Teixeira (2019) verificaram que a incorporação de FGD contribuiu para o aumento da resistência à compressão nas primeiras idades, sendo que o valor ótimo de adição foi de 5% de FGD, pois, para percentuais superiores ocorreu uma inversão do comportamento.

Uma das possíveis causas tem relação com a diminuição dos produtos de hidratação do cimento que pode estar associada a alta taxa de liberação de sulfatos na solução, devido ao alto teor de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) contido no resíduo (JIANG, LI ET AL. 2018).

No gráfico 20 apresenta-se o efeito isolado do percentual de EGAF sobre a resistência à compressão para os diferentes percentuais de incorporação nas matrizes cimentícias

Gráfico 20 – Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Elaborado pela autora.

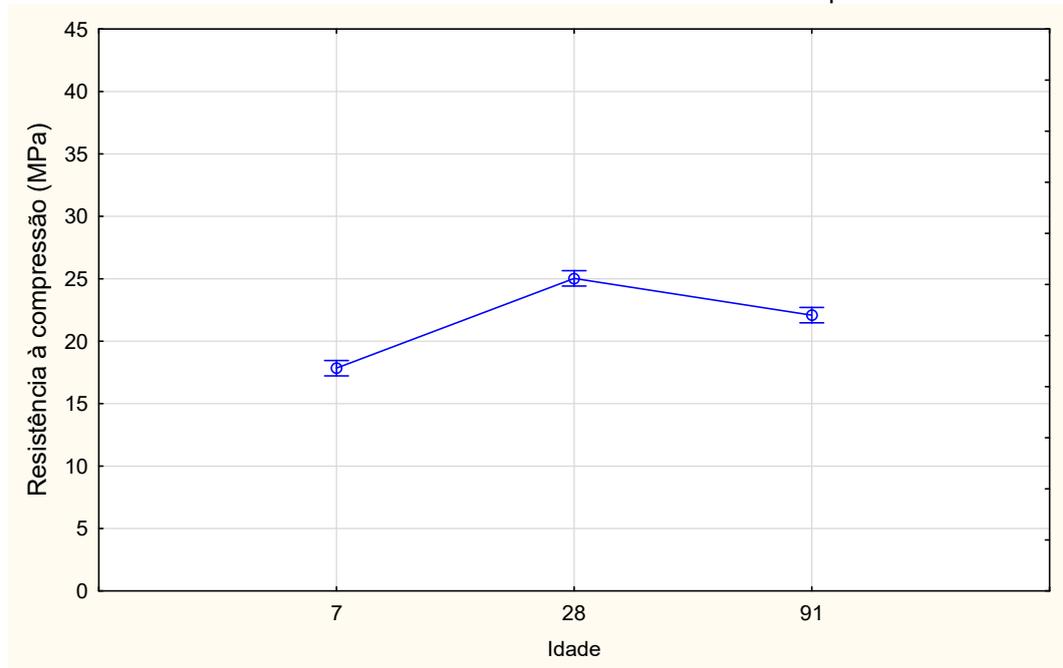
A incorporação de EGAF nas misturas aumentou expressivamente o desempenho a resistência à compressão axial.

Uma das características que justificam o aumento da resistência à compressão com a incorporação da EGAF é a diminuição do tamanho dos poros e da porosidade total. Essa diminuição ocorre porque há o preenchimento dos poros por produtos de hidratação. Guo Xiaolu et al. (2013), ao estudarem o aumento de 25 para 50% do percentual de substituição de EGAF, verificaram a diminuição de mais de 27% na porosidade total da mistura. Além disso, uma redução maior do que 60% no número de poros maiores de 500 angstrom (Å), sugerindo que a microestrutura da mistura contendo EGAF associada ao Cimento Portland é mais compacta.

Uma pequena redução da resistência foi observada quando o percentual de substituição de EGAF passa de 60 para 70%, conforme gráfico 21. Esse efeito pode ser atribuído à diminuição de reagente alcalino (Cimento Portland – CP), disponível na mistura para reagir com a escória. Uma vez que o CP hidratado fornece Hidróxido de Cálcio (CH) que provoca a dissolução da EGAF (RUBERT et al., 2018).

No gráfico 21 é possível verificar o efeito da idade no comportamento das matrizes frente a resistência à compressão.

Gráfico 21 – Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão axial

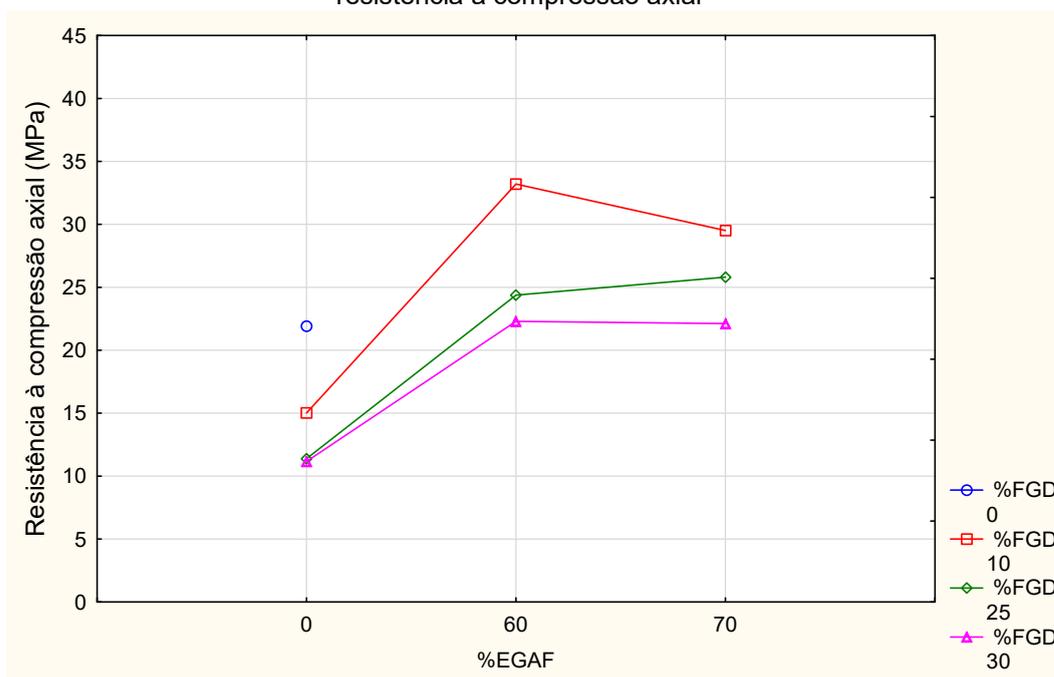


Fonte: Elaborado pela autora.

Como já citado no capítulo 2 desta dissertação, a incorporação de EGAF diminui a calor de hidratação da mistura, isso porque, ela demora um tempo maior para reagir e por isso apresenta menores resistências nas primeiras idades. Porém, é esperado que aos 28 dias, as resistências sejam iguais ou superiores ao traço referência. Aos 91 dias é observado uma diminuição da resistência quando comparado aos 28 dias, porém, ainda mantém resistências superiores aos 7 dias.

O comportamento da resistência à compressão baseada na interação entre os percentuais de incorporação do FGD e da EGAF pode ser observado no gráfico 22.

Gráfico 22 –Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD e EGAF sobre a resistência à compressão axial



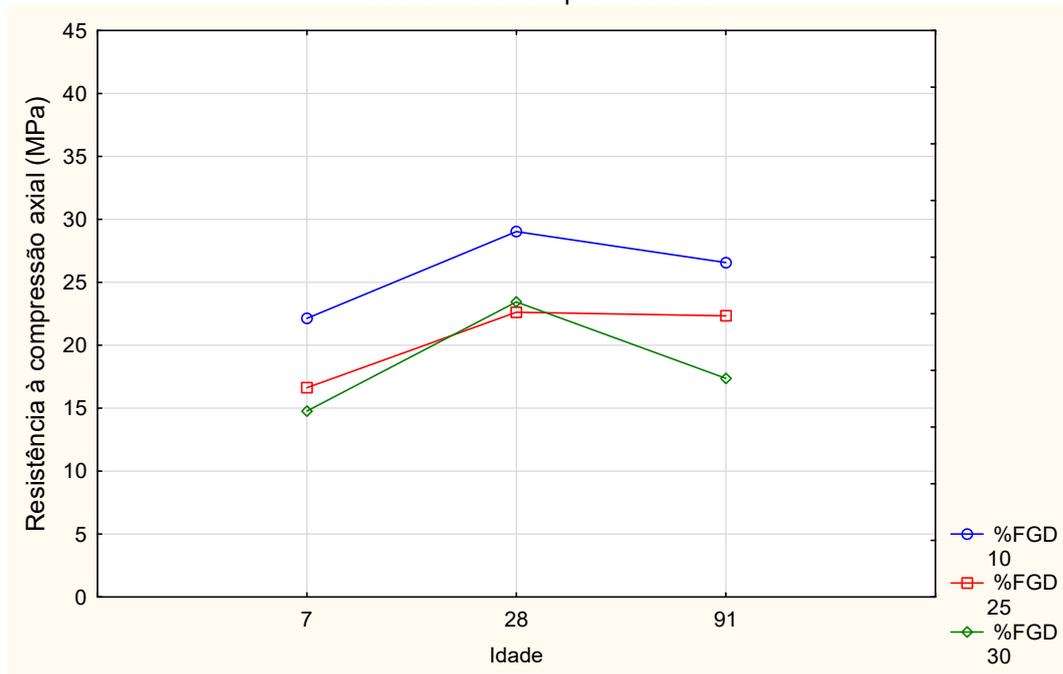
Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que para um mesmo percentual de EGAF, ocorre uma redução da resistência à compressão à medida que há o aumento da incorporação de FGD. Além disso, nota-se que a associação dos dois resíduos culminou em matrizes com maiores resistências do que as matrizes contendo apenas FGD.

Guo Xiaolu et al. (2013) verificaram que ao utilizar FGD associado a EGAF houve um aumento de resistência à compressão das misturas quando comparados a traços contendo apenas EGAF. Além disso, identificaram que algumas impurezas presentes no FGD, como  $\text{CaCO}_3$  (Carbonato de cálcio),  $\text{Ca(OH)}_2$  (Hidróxido de cálcio) e outros íons solúveis de Fe (Ferro), K (Potássio) e Na (Sódio), melhoraram a microestrutura das matrizes cimentícias e com isso, aumentaram a resistência a compressão.

No gráfico 23 observa-se o comportamento da resistência sob a interação da incorporação de FGD e a idade das misturas.

Gráfico 23 –Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD e a idade sobre a resistência à compressão axial

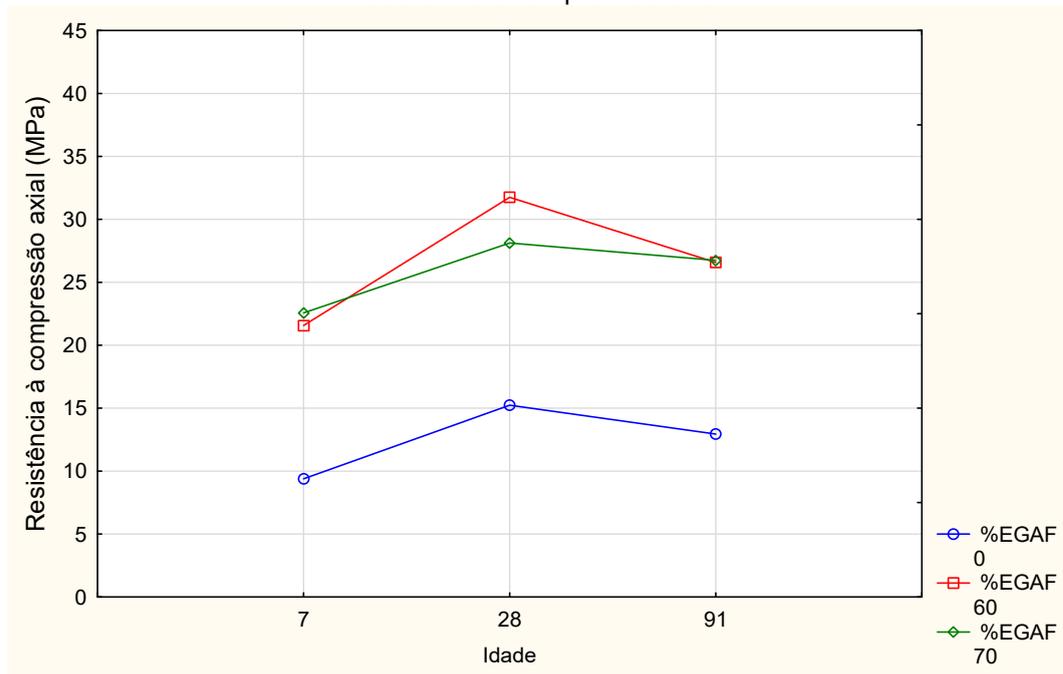


Fonte: Elaborado pela autora.

Independente do percentual de FGD as amostras apresentaram um aumento da resistência de 7 para 28 dias, porém, ocorreu uma redução da resistência de 28 para 91 dias. Como já mencionado, essa diminuição pode estar associada a liberação de uma grande quantidade de sulfatos na mistura provenientes do FGD.

No gráfico 24 está apresentado o comportamento das misturas avaliando o percentual de incorporação de EGAF e a idade.

Gráfico 24 –Efeito da interação entre o percentual de substituição de EGAF e a idade sobre a resistência à compressão axial

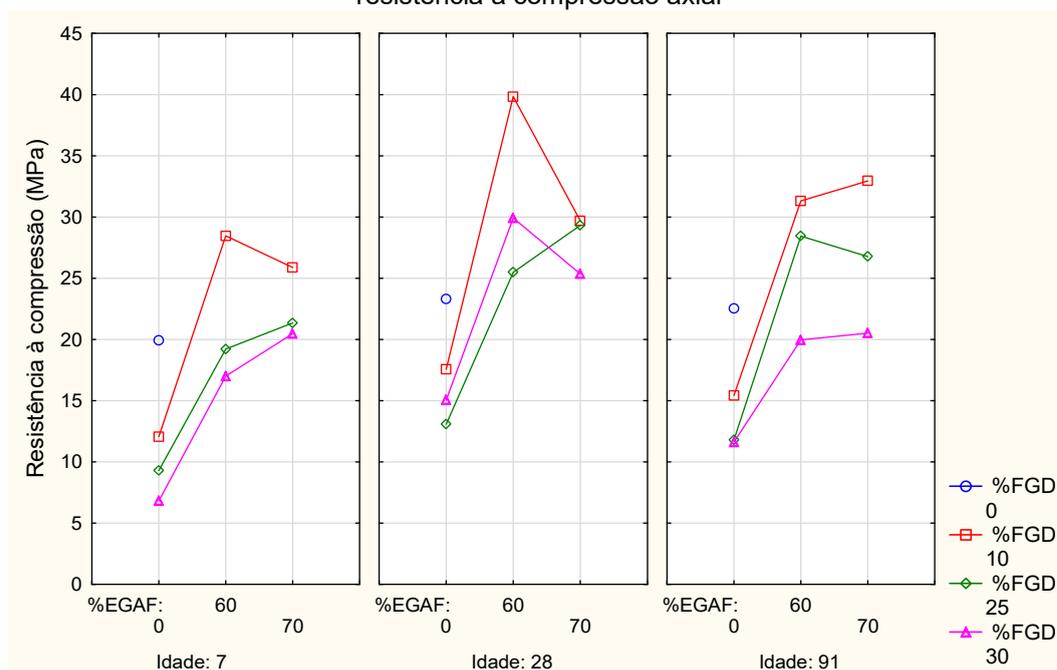


Fonte: Elaborado pela autora.

Análogo ao FGD, verifica-se que há um aumento da resistência à compressão axial de 7 para 28 dias e uma redução de 28 para 91 dias. No caso da EGAF, esse comportamento pode estar associado ao fato de o percentual de substituição ser muito alto, acarretando misturas com baixo percentual de cimento e conseqüentemente, baixo percentual de ativador alcalino, o que prejudica a dissolução da EGAF.

No gráfico 25 é possível verificar a interação de todos os fatores significativos (%FGD, %EGAF e idade) e sua influência na resistência.

Gráfico 25 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF e a idade sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Elaborado pela autora.

Em todas as idades, as maiores resistências alcançadas foram com percentual de FGD de 10% de substituição, independente do percentual de escória. Além disso, é possível observar que todos os traços obtiveram aumento de resistência de 7 para 28 dias, independente dos percentuais. O maior aumento observado de 7 para 28 dias foi no traço E00F30, onde sua resistência aumentou 121%, seguido por E60F30 com 76%.

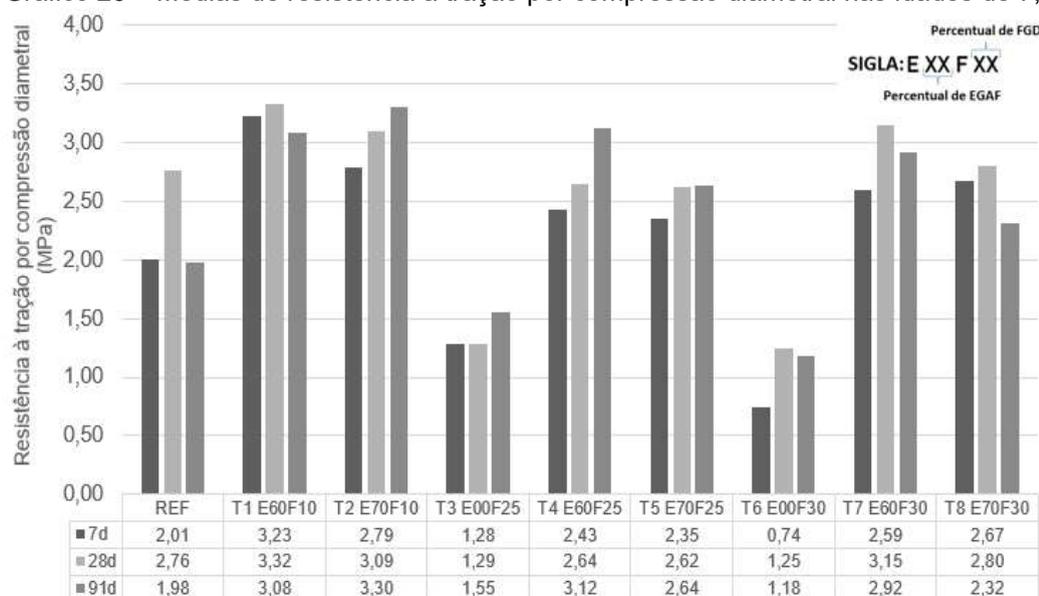
Aos 91 dias, alguns traços apresentaram uma redução na resistência a compressão axial. Porém, em todas as idades, a resistência teve um aumento significativo ao incrementar EGAF na mistura, dados também observados por Guo XiaoLu et al. (2013) que avaliaram que traços contendo FGD e EGAF simultâneos obtiveram resistências superiores quando comparados as argamassas contendo apenas EGAF e atribuíram esse comportamento ao fato de que algumas impurezas do FGD provavelmente estavam melhorando a microestrutura das matrizes.

Megat et al. (2011) descrevem que a incorporação de EGAF nas matrizes cimentícias acarretam redução da resistência inicial de concretos quando comparados as misturas de referência, contendo apenas CP. O desenvolvimento das resistências é mais lento. Tal comportamento é mais perceptível quando percentuais de inclusão são muito elevados. Esse efeito pode ser atribuído ao efeito de dissolução, uma vez que parte do cimento foi substituído por EGAF, bem como a reatividade da EGAF.

#### 4.4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados no gráfico 26.

Gráfico 26 – Médias de resistência à tração por compressão diametral nas idades de 7, 28 e 91 dias



Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral também foram analisados estatisticamente, método ANOVA com 95% de confiabilidade, conforme tabela 22. Os fatores isolados de percentual de incorporação de FGD e EGAF e a idade, foram significativos.

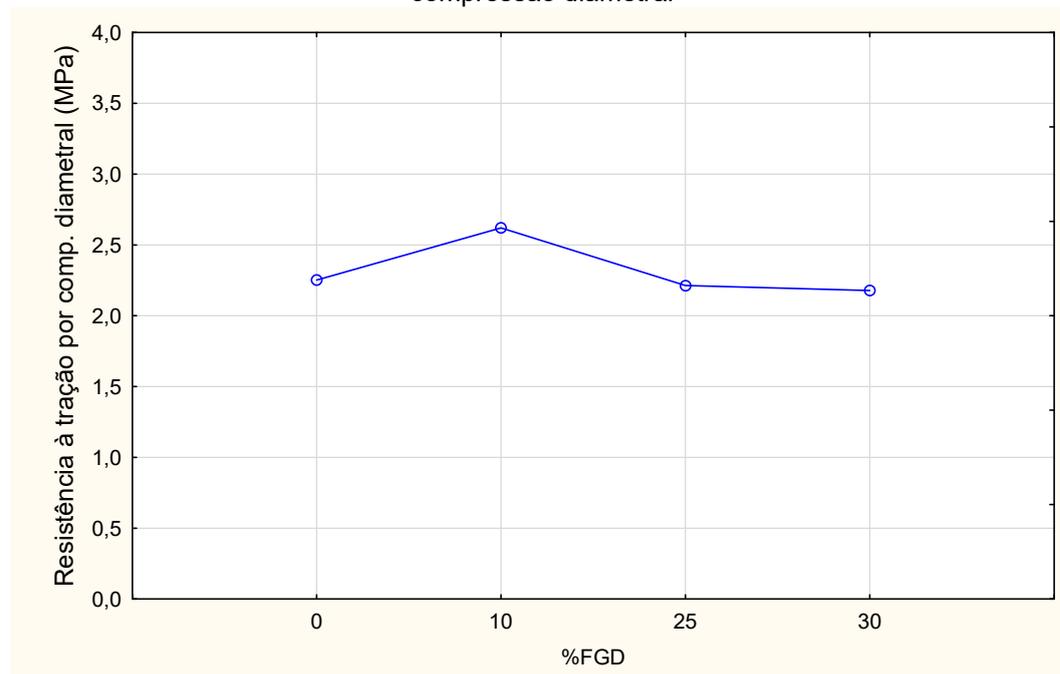
Tabela 22 - Análise estatística – ANOVA - tração

Fatores	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Variância	Valor de F	Valor de p	Probabilidade
%FGD	5,44	2	2,72	14,03	0,000	100,00%
%EGAF	68,18	2	34,09	175,78	0,000	100,00%
Idade	2,13	2	1,07	5,49	0,005	99,46%
%FGD*%EGAF	1,02	4	0,25	1,31	0,271	72,87%
%FGD*Idade	0,99	4	0,25	1,27	0,285	71,47%
%EGAF*Idade	0,13	4	0,03	0,17	0,954	4,61%
%FGD*%EGAF*Idade	1,91	8	0,24	1,23	0,288	71,18%
Erro	20,94	108	0,19			

Fonte: Elaborado pela autora.

O gráfico 27 apresenta o comportamento do efeito isolado do percentual de FGD incorporado às misturas.

Gráfico 27 – Efeito isolado do percentual de substituição de FGD sobre a resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pela autora.

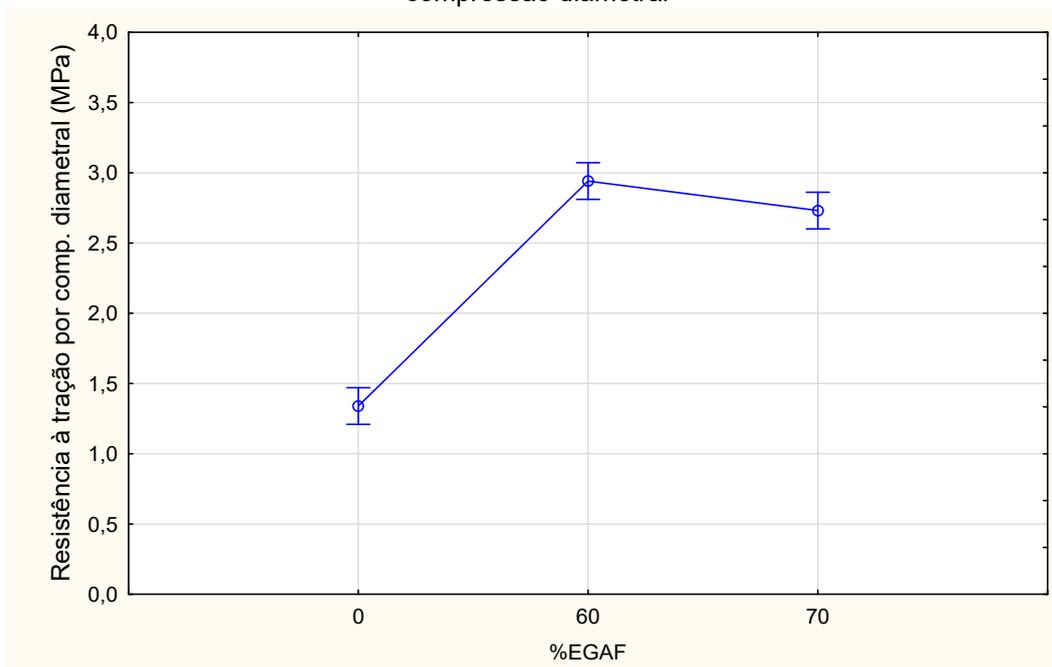
Analisando o efeito isolado do FGD, nota-se que ao aumentar o percentual de incorporação de 10 para 25% há uma redução da resistência à tração. É possível verificar, também, que os valores de resistência à tração quando o percentual de FGD variou de 25 para 30% permanecem no mesmo patamar de resistência à tração, indicando que o aumento de incorporação do FGD não contribuiu, para o aumento desta propriedade mecânica.

Essa redução da resistência pode estar associado ao fato de que a adição de FGD nas misturas favorece a formação de Portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que possui um formato pseudo-hexagonal, que ao se acomodarem, ficam com seus planos de clivagem paralelos a aplicação da carga, interferindo na Resistência à Tração, uma vez que favorece a ruptura nessas direções (TEIXEIRA 2019).

Houve um aumento expressivo da resistência à tração quando ocorreu a incorporação da EGAF na matriz, como foi observado no gráfico 29, logo, a análise desse efeito isolado foi de extrema importância para entender o comportamento das misturas.

O gráfico 28 apresenta o comportamento isolado da EGAF frente a propriedade mecânica de resistência à compressão.

Gráfico 28 – Efeito isolado do percentual de substituição de EGAF sobre a resistência à tração por compressão diametral



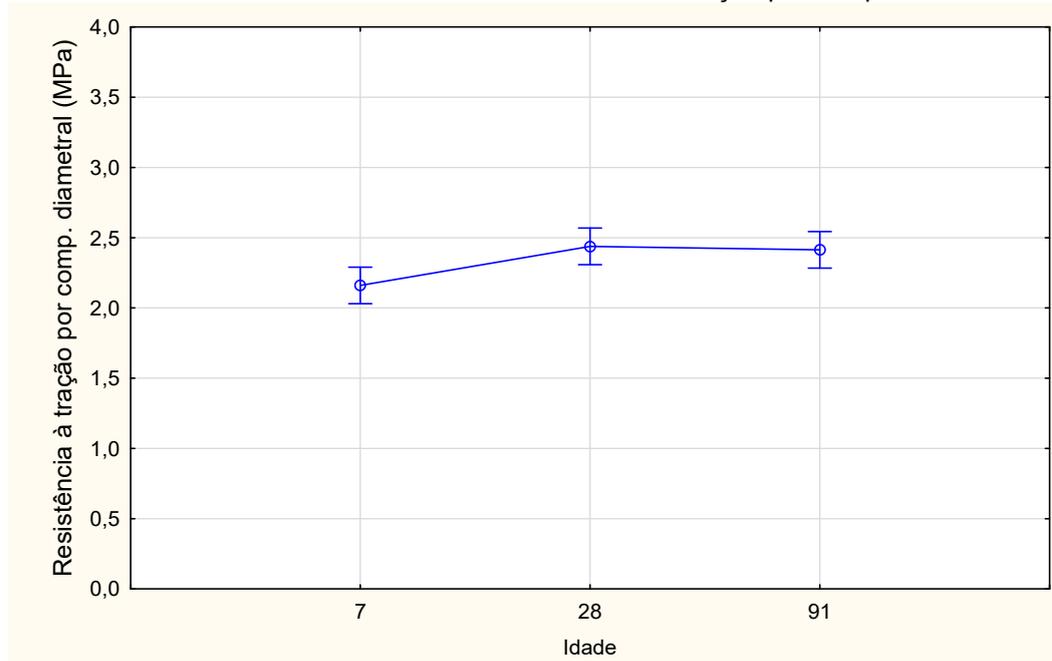
Fonte: Elaborado pela autora.

As resistências aumentaram significativamente com a incorporação da EGAF, porém, quando o percentual de EGAF ultrapassou os 60% de incorporação, houve uma pequena redução no valor da resistência à tração.

Como visto no item 4.4.1 quando os níveis de substituição são muito altos, e conseqüentemente, a quantidade de cimento fica muito baixa, a hidratação da EGAF fica prejudicada, uma vez que ela sendo básica necessita de um ambiente alcalino para iniciar suas reações, e o cimento, quando presente na mistura, faz o papel de ativador alcalino, favorecendo a dissolução dessa EGAF e acelerando as suas reações. Quando esse ativador alcalino está presente, porém, em menor quantidade, resulta em matrizes com resistências mecânicas menores, para uma mesma idade.

Como as reações de dissolução da EGAF é mais lenta, o efeito isolado da idade se torna muito importante, e pode ser observado no gráfico 29.

Gráfico 29 – Efeito isolado da idade sobre a resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pela autora.

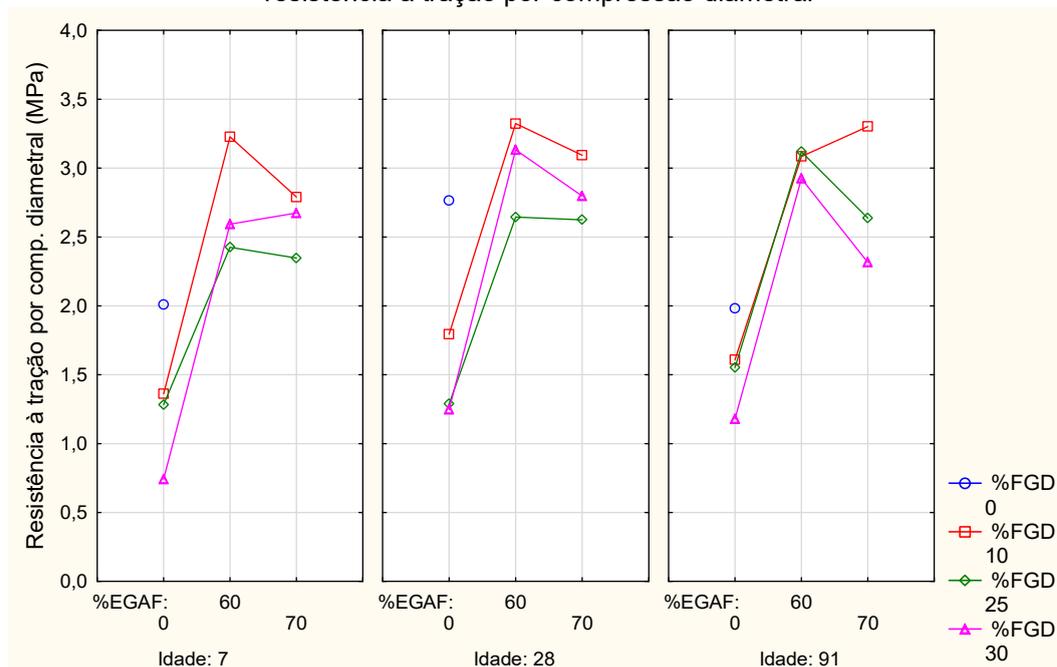
Como esperado, as resistências foram menores nas primeiras idades, devido principalmente ao fato das reações com a EGAF serem mais lentas. Nota-se um aumento da resistência de 7 para 28 dias, porém, a partir dos 28 dias, não houve um aumento da resistência, deixando o valor estável.

O fato de as resistências se manterem estáveis de 28 para 91 dias possivelmente está relacionado ao pouco volume de reações acontecendo, devido a menor quantidade de íons disponíveis na solução.

Comportamentos semelhantes foram encontrados em outras pesquisas, Oliveira Júnior (2009) e Teixeira (2019) também não observaram ganhos de resistências estatisticamente relevantes de 28 para 91 dias, confirmando uma baixa influência da incorporação de FGD nessa propriedade.

Apesar da interação dos fatores FGD, EGAF e a idade não ter sido significativa, os gráficos foram apresentados (gráfico 30), pois, facilitam o entendimento do comportamento de uma forma geral e foram úteis para as discussões que se sucederam.

Gráfico 30 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD, EGAF e a idade sobre a resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os gráficos dos três fatores (gráfico 30) foi possível verificar que independentemente da idade, os maiores valores de resistência à tração alcançados foram nos traços com incorporação de 10% de FGD, associado a incorporação de 60 e 70% de EGAF., conforme gráfico 28.

Observa-se que as resistências aos 91 dias, foram iguais para os traços contendo 60% de EGAF, independente do percentual de incorporação de FGD.

Lee e Yoon (2015) ao avaliar o efeito da incorporação de materiais cimentícios em concretos de alta resistência identificam a melhora da resistência à tração à medida que a incorporação de materiais cimentícios melhoram a propriedade de resistência à compressão, porém, observaram que ao variar o tipo e a composição do material cimentício não houve efeitos significativos na resistência à tração.

Dessa forma, o aumento da resistência à tração é justificado pela melhora no desempenho frente a resistência à compressão e não propriamente por função de alguma característica do material cimentício.

#### 4.4.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico foi realizado através da técnica de velocidade de propagação de onda ultrassônica. A distância entre os transdutores

era conhecida, uma vez que todos os corpos de prova tiveram suas medidas aferidas. Sabendo o tempo gasto para a onda percorrer essa distância, foi possível calcular a velocidade da propagação da onda ultrassônica e posteriormente o módulo de elasticidade dinâmico.

Na tabela 23 constam os resultados do ensaio de ultrassom de todos os traços ensaiados.

Tabela 23 – Valores de módulo de elasticidade dinâmico dos traços ensaiados

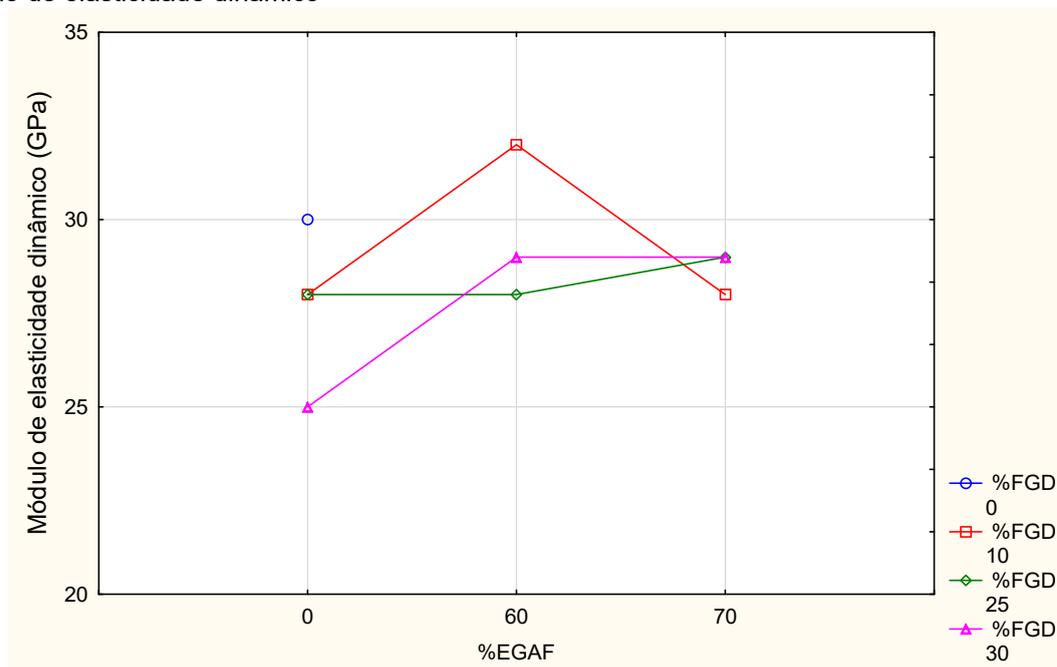
<b>Traço</b>	<b>%FGD</b>	<b>%EGAF</b>	<b>%CP*</b>	<b>Mód. Elasticidade (GPa)</b>
REF	0	0	100	30
E60F10	10	60	30	32
E70F10	10	70	20	28
E00F25	25	0	75	28
E60F25	25	60	15	28
E70F25	25	70	5	29
E00F30	30	0	70	25
E60F30	30	60	10	29
E70F30	30	70	0	29

Fonte: Elaborado pela autora.

O maior valor encontrado foi o do traço E60F10 e o menor do E00F30. O módulo de elasticidade dinâmico e a capacidade da argamassa de absorver deformações são grandezas inversamente proporcionais, logo, quanto menor o valor do módulo, maior será a capacidade de absorver deformações (SILVA, 2006).

O gráfico 33 foi elaborado para facilitar a visualização de todos os valores encontrados para essa propriedade, a medida que os percentuais de variação de FGD e EGAF foram alterados.

Gráfico 31 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD e EGAF sobre o módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Elaborado pela autora.

No gráfico 31, é possível verificar que a incorporação dos resíduos acarretou a diminuição do módulo de elasticidade. A exceção foi o traço T1 com incorporação de 10% de FGD e 60% de EGAF.

Ozbay, Erdogan, et al. (2016) fizeram uma revisão de importantes pesquisas que utilizaram a incorporação de EGAF em matrizes cimentícias, e destacam que a propriedade do Módulo de Elasticidade não sofre tanta interferência com essa incorporação, comparada a propriedade de resistência à compressão, por exemplo. Atribuíram esse efeito ao fato de a incorporação de EGAF ser responsável pela diminuição da porosidade das misturas e pela formação adicional de C-S-H como resultado da reação pozolânica.

Os resultados desta pesquisa corroboram com essa conclusão de Ozbay, Erdogan, et al. (2016), uma vez que as médias dos valores de Modulo de Elasticidade Dinâmico foram muito semelhantes, apesar dos diferentes percentuais de incorporação de EGAF e FGD nas misturas.

#### 4.4.4 Absorção de Água por Capilaridade

No ensaio de absorção de água por capilaridade, foram realizadas medições da massa dos corpos de prova com 10 e 90 minutos de ensaio. A variação da massa

corresponde ao Coeficiente de Capilaridade e os resultados constam na tabela 24.

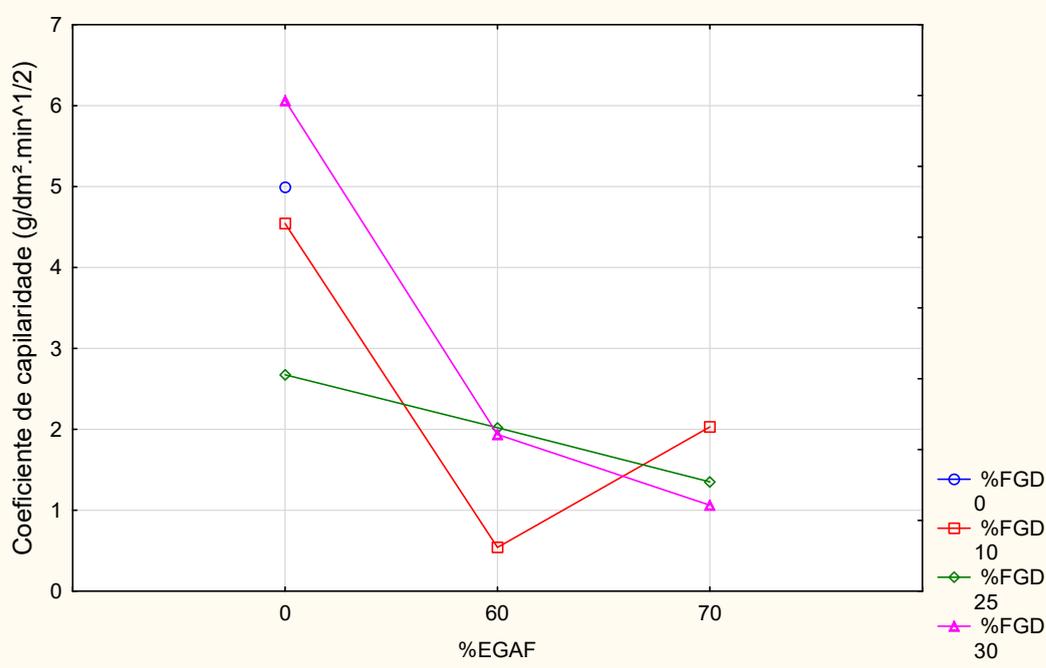
Tabela 24 - Coeficiente de capilaridade de cada traço

Traço	%FGD	%EGAF	Coef. Capilaridade
REF	0	0	4,99
E60F10	10	60	0,54
E70F10	10	70	2,03
E00F25	25	0	2,68
E60F25	25	60	2,02
E70F25	25	70	1,35
E00F30	30	0	6,07
E60F30	30	60	1,94
E70F30	30	70	1,06

Fonte: Elaborado pela autora.

Com os dados obtidos na tabela 24, elaborou-se o gráfico 32 para facilitar o entendimento do comportamento das matrizes.

Gráfico 32 – Efeito da interação entre o percentual de substituição de FGD e EGAF sobre o coeficiente de capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que os coeficientes das matrizes contendo apenas FGD são superiores as matrizes contendo o FGD e a EGAF simultaneamente. Fica evidente no gráfico 32 uma redução no coeficiente quando associado a incorporação da EGAF.

De acordo com Johari, M.A. Megat, et al. (2011) os materiais cimentícios suplementares (SCM) de uma forma geral, são responsáveis por uma diminuição do tamanho dos poros nas matrizes, acarretando uma distribuição mais fina dos poros. Por outro lado, alguns materiais terão um efeito mais expressivo do que outros, devido a reatividade de cada material e a capacidade de atuar como preenchedor dos poros.

Dessa forma, pode-se inferir que o FGD não possui a capacidade de melhorar a porosidade da mistura, mas quando incorporado simultaneamente com a EGAF, contribuiu para a melhora dessa propriedade.

Como já debatido anteriormente, a adição da EGAF torna as matrizes mais compacta, uma vez que reduz o tamanho dos poros.

#### 4.4.5 Teor de Cloretos Totais

Os resíduos utilizados nessa pesquisa são provenientes de um processo de queima de carvão. Conforme já tratado na seção 2.1.2, a composição química desse carvão é um dos fatores que influencia diretamente na composição dos resíduos. Por conta disso, nas pesquisas há uma preocupação com o percentual de cloretos e sulfatos das misturas.

Por meio dos resultados dos ensaios de caracterização do FGD, verificou-se que o percentual dessa propriedade possuía valor que poderia ser um dificultador no momento da produção de uma matriz cimentícia. O percentual de cloretos do FGD e da EGAF foram 4,080 e 0,005%, respectivamente. Portanto, a incorporação de EGAF não influenciou no total de cloretos das matrizes.

Na tabela 25 estão apresentados os teores de cloretos totais de cada um dos traços estudados.

Tabela 25 – Teor de cloretos totais – 28 dias

Traço	%FGD	%EGAF	Teor de cloretos totais (%)
REF	0	0	0,04%
E60F10	10	60	0,03%
E70F10	10	70	0,01%
E00F25	25	0	0,07%
E60F25	25	60	0,07%
E70F25	25	70	0,11%
E00F30	30	0	0,03%
E60F30	30	60	0,12%
E70F30	30	70	0,13%

Fonte: Elaborado pela autora.

O maior percentual encontrado de cloretos foi de 0,13%, muito inferior ao encontrado durante a caracterização do FGD, corroborando aos estudos que as matrizes cimentícias são eficientes para encapsular esses componentes.

Apesar do alto percentual de cloretos encontrados no ensaio de caracterização do FGD (4,08%), observa-se que ao incorporar o resíduo em matrizes cimentícias, esse percentual diminui drasticamente. O maior valor encontrado foi de 0,13%, com incorporação de 30% de FGD e 70% de EGAF. Portanto, mesmo em misturas com 0% de CP, há uma diminuição expressiva do percentual de cloretos totais da mistura.

Teixeira (2019) descreve em sua pesquisa um comportamento semelhante. O FGD apresentou durante a caracterização valores altos de percentual de cloretos (6,50%), porém, os resultados dessa propriedade nos concretos foram extremamente inferiores. Esse efeito é provavelmente resultado do encapsulamento dos cloretos pela matriz de concreto, provavelmente pela reação com os aluminatos, promovendo a redução dos cloretos livres, obtendo valores compatíveis com o concreto referência.

Como não existe uma normatização para o teor máximo de cloretos em argamassas, utilizou-se os limites determinados para concreto, para fins comparativos. Os teores podem ser verificados na figura 43.

Figura 43 Quadro do teor máximo de cloretos em concretos - NBR 12655:22

<b>Condições de serviço da estrutura</b>	<b>Teor máximo de íons cloreto (Cl<sup>-</sup>) no concreto % sobre a massa de cimento</b>
Concreto protendido	0,05
Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: Retirado da NBR 12655:22

No quadro da figura 43, verifica-se que o percentual total de cloretos livres em concreto armado para atender todas as classes de agressividade é de 0,15%, logo, se essa pesquisa fosse em concretos, todos os traços teriam percentual de cloretos dentro do máximo exigido pela norma.

O percentual de cloretos do resíduo varia de acordo com a planta de produção da indústria e principalmente da composição do carvão utilizado durante a queima. Por conta disso, diferente do que foi encontrado nesta pesquisa, o percentual de cloretos não era um fator significativo na maioria das pesquisas estudadas e por vezes esse fator nem sequer foi passível de estudo, uma vez que os valores encontrados eram muito baixos.

#### 4.4.6 Teor de Sulfatos

Como mencionado anteriormente, o processo de produção onde são gerados os resíduos utilizados nessa pesquisa, propiciam o surgimento de materiais com alto índice de cloretos e sulfatos. Durante a caracterização do FGD observou-se um valor bem expressivo de sulfatos, o que gerou uma preocupação de como esse elemento afetaria essa propriedade na matriz cimentícia.

As médias dos resultados encontrados no ensaio de teor de sulfatos estão apresentados na tabela 26.

Tabela 26 – Teor de sulfatos

Traço	%FGD	%EGAF	Teor de sulfatos (%)
REF	0	0	0,71%
E60F10	10	60	0,60%
E70F10	10	70	0,38%
E00F25	25	0	0,49%
E60F25	25	60	0,64%
E70F25	25	70	0,69%
E00F30	30	0	0,86%
E60F30	30	60	0,86%
E70F30	30	70	0,56%

Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre os valores encontrados, os traços T6 (E00F30) e T7 (E60F30) são os únicos que apresentaram teor de sulfatos superior ao traço referência, no entanto, independentemente do valor de incorporação de FGD, os resultados encontrados na matriz cimentícia são bem inferiores aos valores encontrados durante a caracterização dos resíduos. Dessa forma, foi possível inferir que parte desse sulfato pode ser da forma inerte e grande parte foi consumido para a formação de outros compostos.

Jiang, Li et al. (2018) também estudaram a incorporação de FGD em matrizes com alto teor de EGAF e concluíram que os sulfatos foram o principal fator de ativação

da EGAF nas primeiras idades, logo, parte dos sulfatos presentes na solução foram consumidos durante as reações de dissolução da EGAF.

D.-Y. Lei et al. (2017) identificaram que nas primeiras idades, os sulfatos se apresentam na forma de sulfoaluminato de cálcio hidratado monossulfatado (AFm) e que com o avanço da hidratação, é transformado em sulfoaluminato de cálcio hidratado trissulfatado (AFt), que preenche os poros, tornando a microestrutura da matriz mais compacta.

S. Zhong et al. (2012) avaliaram a liberação de sulfatos durante 3 semanas para analisar a quantidade de sulfatos liberados e concluiu que para argamassas com percentual de FGD igual ou inferior a 20%, essa liberação foi irrisória, podendo ser desconsiderada. Já para argamassas com percentual maior que 20% poderiam ocasionar um ataque moderado de sulfatos no concreto, sendo assim, recomendou a utilização da argamassa em materiais de baixa resistência, como rejuntamento, sub-base de estradas e concretos com baixa resistência.

#### **4.4.7 Lixiviação de Contaminantes**

Um dos critérios fundamentais de serem estudados no aspecto de incorporação de resíduos em matrizes cimentícias é a lixiviação de contaminantes. Afinal, não basta que a matriz cimentícia possua bons desempenhos mecânicos, por exemplo, se ao ser aplicada em alguma estrutura, ela esteja suscetível a lixiviação de algum contaminante agressivo ao meio ambiente. Portanto, é imprescindível a avaliação e classificação das matrizes cimentícias estudadas quanto ao aspecto ambiental.

As amostras do material lixiviado foram enviadas para análise e após o recebimento dos resultados, foram realizados o cálculo da taxa de lixiviação total  $E_i$  de cada elemento acumulada durante todo o período do ensaio (64 dias). Os dados calculados estão apresentados na tabela 27.

Tabela 27 – Taxa de lixiviação total de cada elemento, por traço, em mg/m<sup>2</sup>

Elem ento	Cálculo Ei acumulado de cada elemento (mg/m <sup>2</sup> )									Parâmetros (mg/m <sup>2</sup> )	
	REF	E60 F10	E70 F10	E00 F25	E60 F25	E70 F25	E00 F30	E60 F30	E70 F30	U1	U2
<b>As</b>	ND*	ND	40	300							
<b>Cd</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1	7,50
<b>Cr</b>	1,63	1,47	1,57	1,58	1,58	1,45	1,75	1,37	1,57	150	950
<b>Cu</b>	4,32	5,71	3,02	5,88	10,7 6	5,97	3,78	4,29	9,59	50	350
<b>Pb</b>	0,15	0,42	0,15	0,15	0,18	0,10	0,37	0,21	1,58	-	-
<b>Mn</b>	0,18	0,23	0,23	0,20	0,30	0,22	0,20	0,20	0,35	-	-
<b>Hg</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-	-
<b>Zn</b>	6,00	17,1 1	18,1 6	5,52	15,0 2	6,20	16,9 6	12,2 5	14,0 6	200	150 0

N D\* - Não detectável

Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda na tabela 23, estão apresentados os parâmetros U1 e U2, estabelecidos na NEN 7375 (NNI, 2004) que serão o critério de classificação das matrizes cimentícias.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que todos os componentes estão com taxas de lixiviação total inferiores a U1. Dessa forma, segundo a classificação definida pela própria norma e já descrita na seção 3.4.3.8, todos os traços das matrizes cimentícias analisadas nessa pesquisa podem ser utilizados com segurança, uma vez que não haverá lixiviação de nenhum contaminante em quantidade prejudicial. Isso significa que as argamassas pesquisadas com FGD e EGAF incorporadas em uma matriz cimentícia não acarretarão impactos ambientais negativos se forem utilizadas. Ou seja, os componentes químicos dos coprodutos que podem acarretar algum grau de periculosidade ambiental, apresentam um potencial de encapsulamento, quando incorporados em matrizes cimentícias de Cimento Portland.

O metal com maior representatividade nas amostras foi o Zinco, porém, com valores bem inferiores ao menor parâmetro da norma (U1). O mesmo comportamento foi encontrado por Teixeira (2019), onde o Zinco foi o elemento de maior percentual lixiviado, no entanto, inferiores aos limites mínimos estabelecidos na norma.

#### 4.4.8 Análise Microestrutural

A análise microestrutural foi realizada com o intuito de contribuir com a compreensão dos comportamentos das misturas, através da identificação dos compostos hidratados presentes nas argamassas.

As composições foram realizadas através de um EDS acoplado ao microscópio eletrônico de varredura. A composição apresentada é da respectiva imagem realizada em cada um dos traços. A limitação do microscópio utilizado era de uma ampliação de imagem de até 4000x, por conta disso, não foi possível identificar compostos em todos os traços baseados somente nas imagens. Nesses casos, a composição do EDS foi um contribuinte para essa análise.

A análise dos óxidos em maiores proporções de cada um dos traços, traz um indicativo dos compostos presentes nas amostras. Na tabela 28 estão os traços e os principais elementos da composição.

Tabela 28 – Composição determinada pelo EDS em cada traço

Traço	Composição EDS								Relação Ca/Si
	%FGD	%EGAF	Ca	Si	Al	Mg	S	Cl	
REF	0	0	8,77%	8,76%	0,39%	-	-	-	1,00
E60F10	10	60	10,44%	9,01%	0,99%	0,35%	-	-	1,16
E70F10	10	70	9,56%	8,60%	1,12%	0,47%	-	-	1,11
E00F25	25	0	10,63%	4,62%	0,58%	0,40%	-	-	2,30
E60F25	25	60	9,35%	8,16%	0,93%	0,28%	0,49%	-	1,15
E70F25	25	70	13,89%	3,41%	1,10%	0,30%	1,32%	0,22%	4,07
E00F30	30	0	10,17%	10,74%	0,69%	0,15%	1,37%	-	0,95
E60F30	30	60	4,94%	18,07%	0,68%	0,34%	0,39%	-	0,27
E70F30	30	70	13,52%	6,62%	1,49%	0,70%	1,20%	0,04%	2,04

Fonte: Elaborado pela autora.

Rosignolo (2009) propôs em seu trabalho uma metodologia descrita por Taylor e Newbury (1984), Wasserman e Bentur (1996) e Kjellsen, Wallevik e Fjällberg (1998), sobre a relação entre os óxidos presentes nas matrizes cimentícias, principalmente CaO (Ca - Óxido de cálcio) e SiO<sub>2</sub> (Si - Sílica). Baseado nas massas atômicas, foi encontrado uma correlação da razão Ca/Si e a presença de compostos hidratados nas matrizes. Se a relação Ca/Si estiver entre 0,80 e 2,50 há uma grande probabilidade de presença de C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Se a razão for entre 4 e 10, predomina a presença de AFt (etringita) e/ou AFm (monosulfoaluminato de

cálcio) e valores que vão acima de 10 é um indicativo de presença de CH (hidróxido de cálcio).

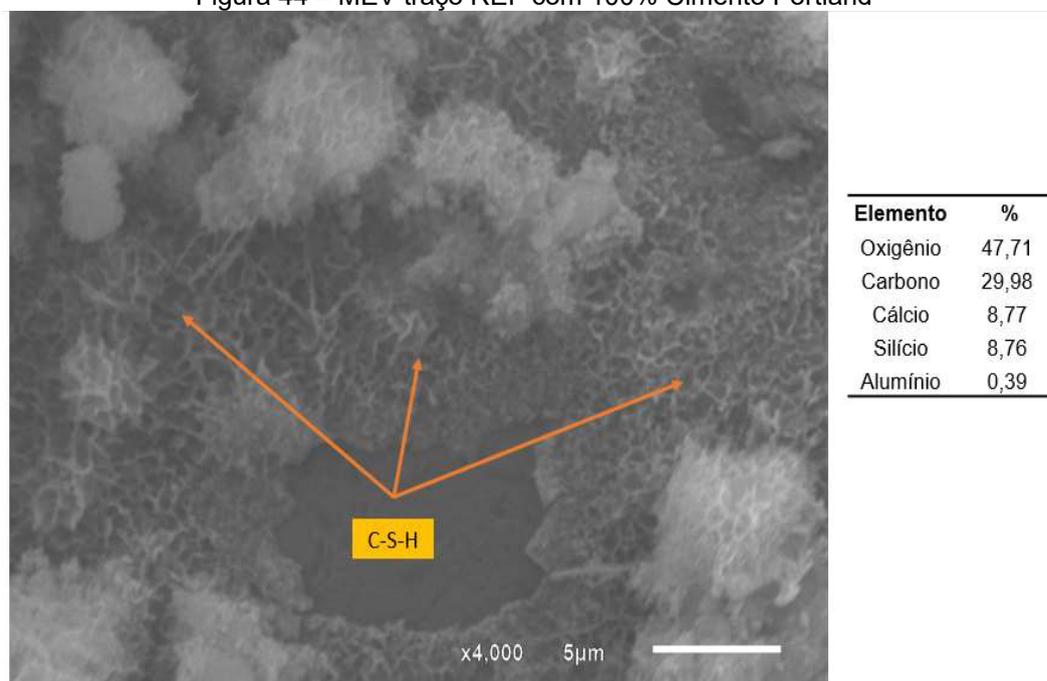
Na tabela 28 verifica-se que todos os traços, com exceção do E70F25 e do E60F30, apresentam valores entre 0,80 e 2,50, indicativo de presença de C-S-H. Já o E70F25, apresenta valor próximo de 4, indicando a presença de AFt e AFm. No caso do E60F30, onde o valor da razão Ca/Si é muito baixo, não há como indicar qual dos compostos hidratados estão presentes.

Rossignolo (2009) também apresentou uma relação entre  $Al_2O_3$  [Al],  $Fe_2O_3$  [Fe] e CaO [Ca], sendo a razão de (Al+Fe) sobre o Ca. No caso do traço E70F25, não há presença de Fe, logo, a razão Al/Ca é igual a 0,14. De acordo com a bibliografia, valores iguais e menores que 0,20 indicam a presença de C-S-H.

Nas figuras 44 a 52 constam as imagens do MEV com aproximação de 4000x e os resultados do EDS de cada amostra.

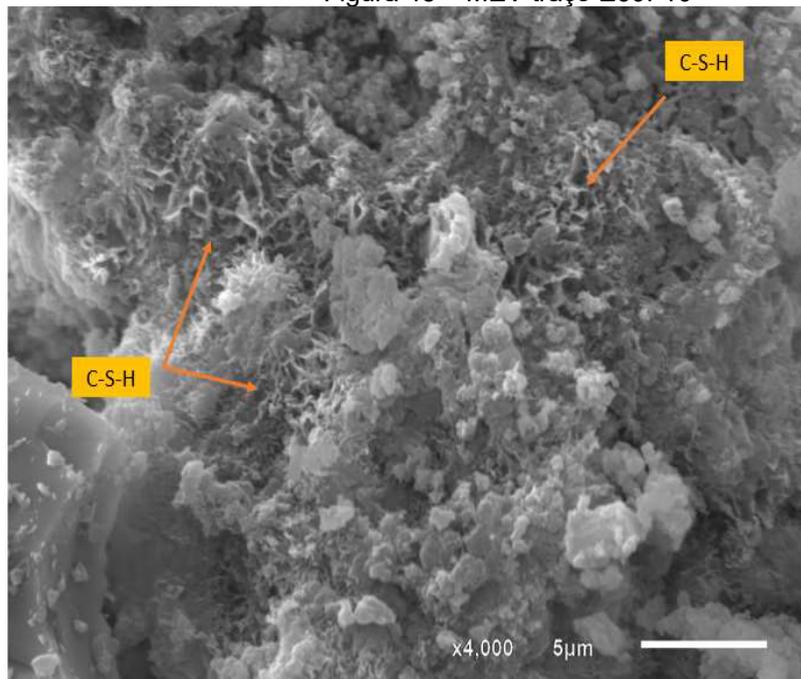
Nas figuras 44, 45 e 52, dos traços REF, E60F10 e E70F30, respectivamente, identificou-se a presença ramificações de C-S-H, apesar da baixa precisão do equipamento disponível para ensaio.

Figura 44 – MEV traço REF com 100% Cimento Portland



Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

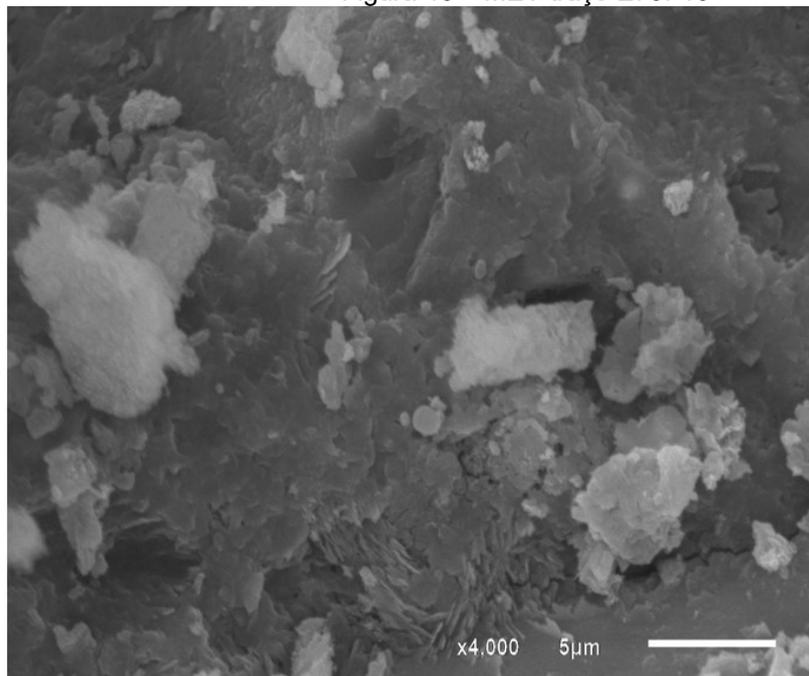
Figura 45 – MEV traço E60F10



Elemento	%
Oxigênio	55,68
Carbono	26,10
Cálcio	10,44
Silício	9,01
Alumínio	0,99
Magnésio	0,35

Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

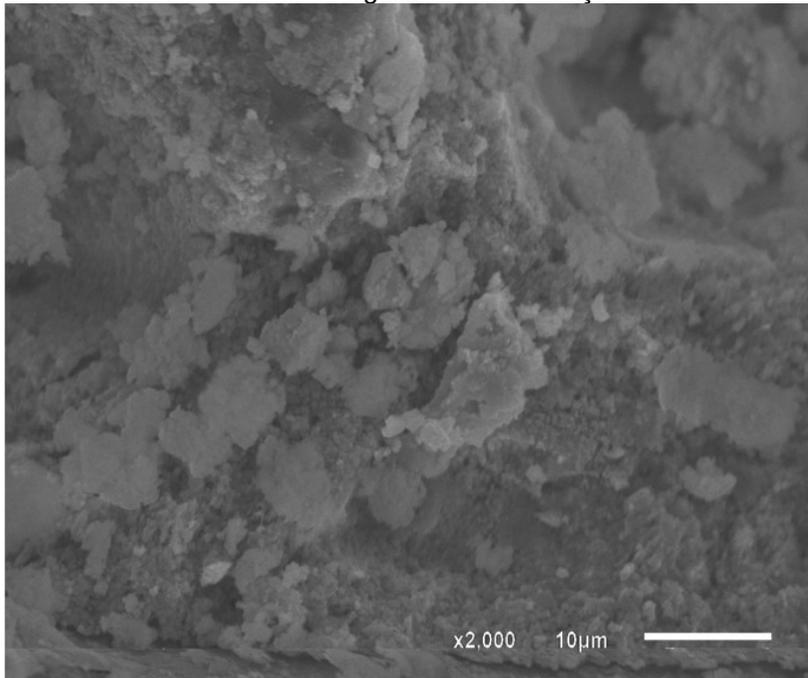
Figura 46 – MEV traço E70F10



Elemento	%
Oxigênio	43,94
Carbono	22,25
Cálcio	9,56
Silício	8,60
Alumínio	1,12
Magnésio	0,47

Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

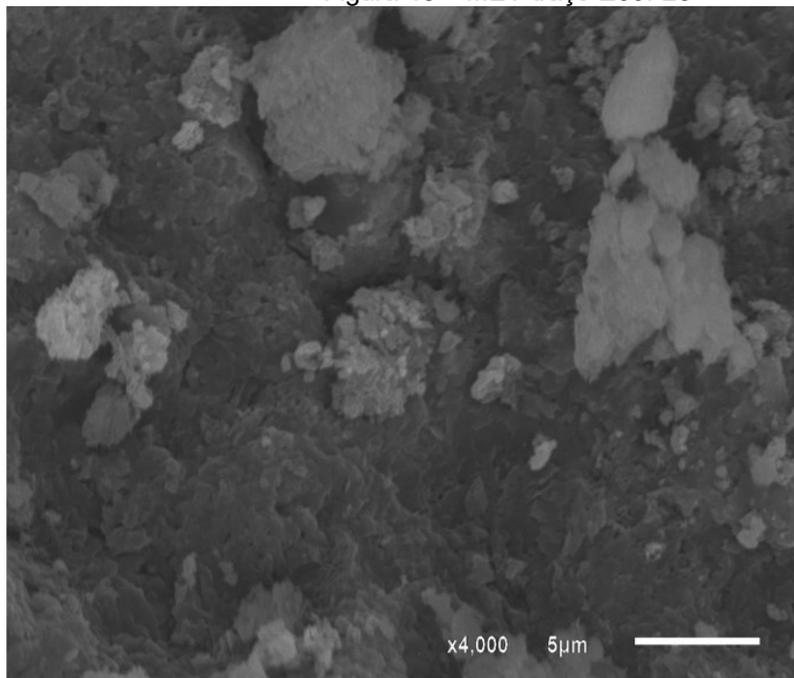
Figura 47 – MEV traço E00F25



Elemento	%
Oxigênio	70,80
Carbono	39,78
Cálcio	10,63
Silício	4,62
Alumínio	0,58
Magnésio	0,40

Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

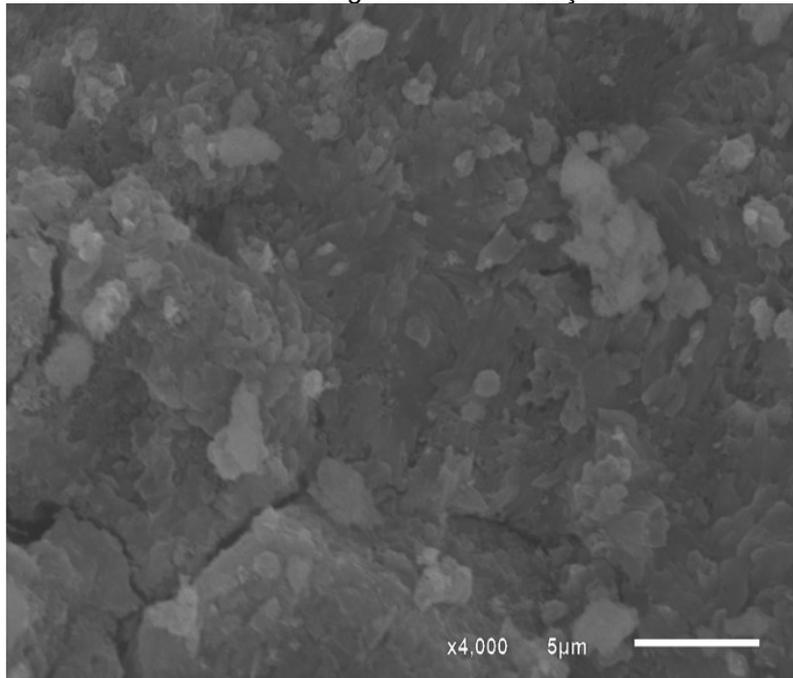
Figura 48 – MEV traço E60F25



Elemento	%
Oxigênio	39,65
Carbono	23,90
Cálcio	9,35
Silício	8,16
Alumínio	0,93
Magnésio	0,28
Enxofre	0,49

Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

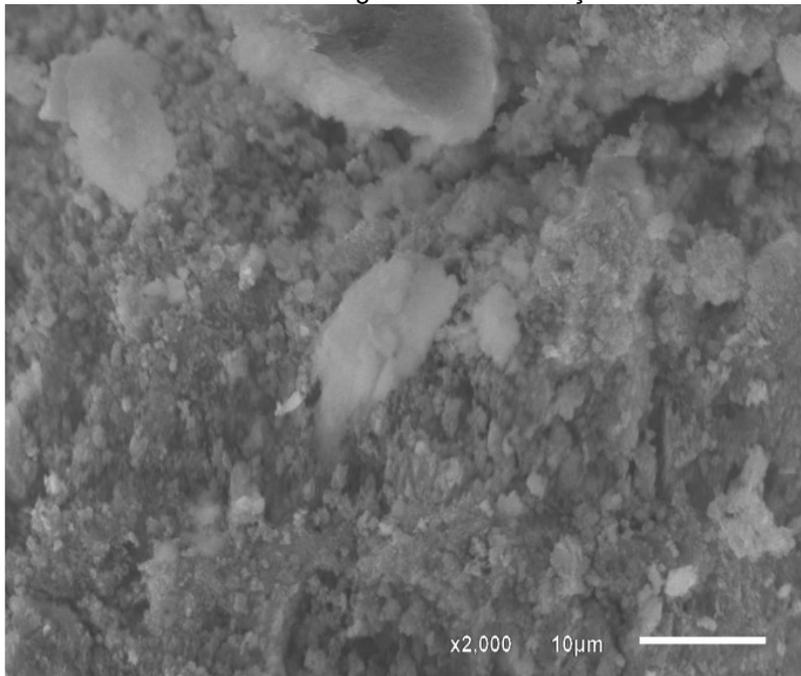
Figura 49 – MEV traço E70F25



Elemento	%
Oxigênio	38,67
Carbono	17,88
Cálcio	13,89
Silício	3,41
Alumínio	1,10
Magnésio	0,30
Enxofre	1,32
Cloro	0,22

Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

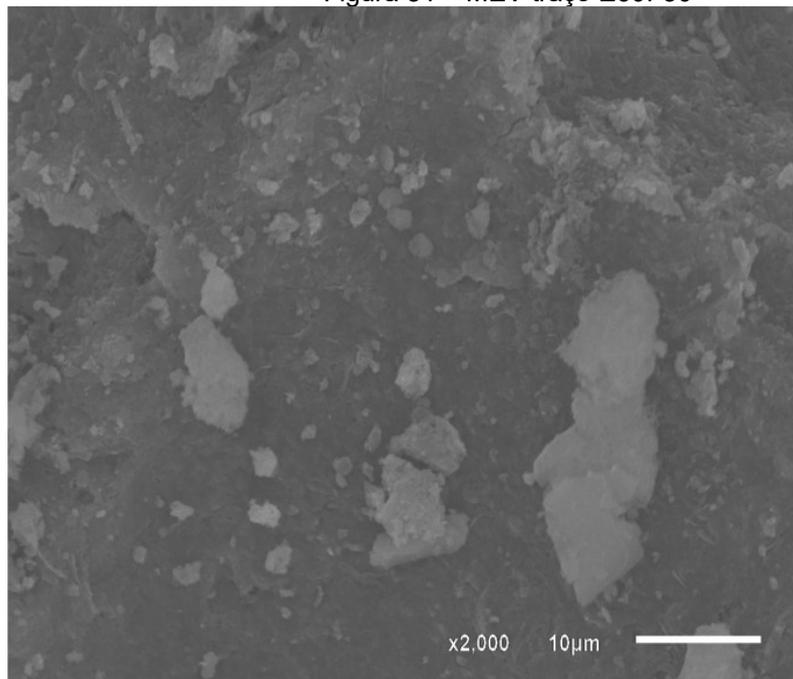
Figura 50 – MEV traço E00F30



Elemento	%
Oxigênio	55,82
Carbono	33,30
Cálcio	10,17
Silício	10,74
Alumínio	0,69
Magnésio	0,15
Enxofre	1,37

Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

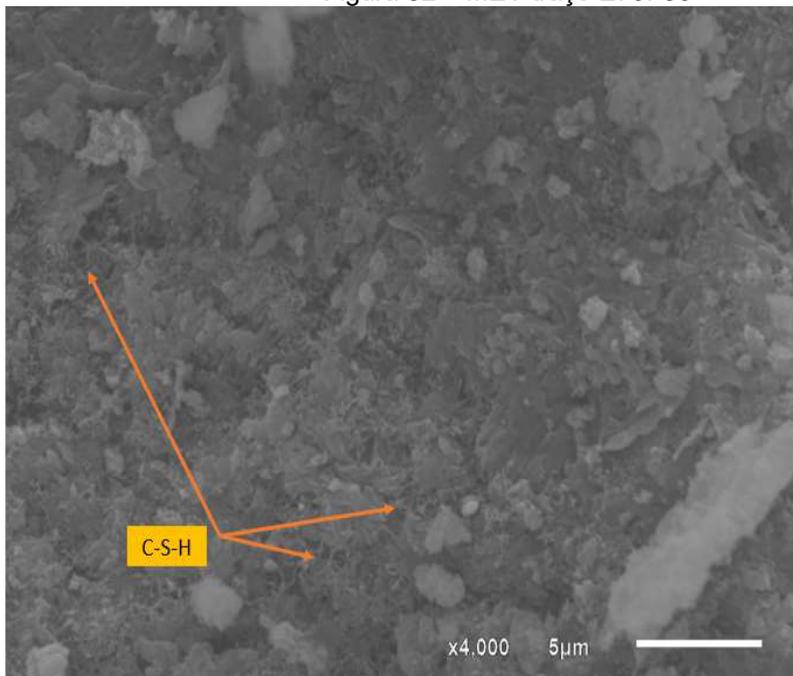
Figura 51 – MEV traço E60F30



Elemento	%
Oxigênio	53,89
Carbono	25,02
Cálcio	4,94
Silício	18,07
Alumínio	0,68
Magnésio	0,34
Enxofre	0,39

Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

Figura 52 – MEV traço E70F30



Elemento	%
Oxigênio	60,42
Cálcio	13,52
Silício	6,62
Alumínio	1,49
Magnésio	0,70
Enxofre	1,20
Cloro	0,04

Fonte: Ensaio realizado pelo laboratório LUCCAR – aproximação 4000x

Nas figuras 48 e 51 dos traços E70F25 e E60F30, respectivamente, nota-se uma superfície mais uniforme e densa, indicativo de que os compostos reagiram e formaram matrizes com superfícies mais lisas e homogêneas, possivelmente com boas resistências mecânicas e durabilidade.

L. Jiang et al. (2018) concluíram através de imagens de MEV com maiores precisões e com EDS que ao incorporar o FGD em matrizes cimentícias contendo alto percentual de EGAF, houve a formação de cristais de AFt (etringita), em formato de agulhas.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados durante a execução desta dissertação indicam que a substituição do cimento pelos resíduos EGAF e FGD, principalmente de forma simultânea, foram satisfatórios em diversas propriedades.

Com relação ao índice de consistência, notou-se que a incorporação do FGD de forma isolada reduziu o espalhamento das amostras, devido a maior área superficial do resíduo e conseqüentemente maior necessidade de água na mistura, como o fator água/aglomerante foi fixado, houve a diminuição do espalhamento. Por outro lado, a associação dos dois resíduos melhorou o desempenho das matrizes, parte por conta da menor absorção de água pela EGAF e a melhora na dispersão das partículas de cimento.

Os traços estudados apresentaram uma maior densidade de massa e conseqüentemente, um menor teor de ar incorporado nas misturas, com exceção dos traços contendo FGD isolado até 25%. A incorporação isolada do FGD até 25% não apresenta melhora dessas propriedades, porém, verifica-se que em maiores percentuais, o FGD se comporta como filler, preenchendo as zonas de transição e os poros das misturas, melhorando a densidade e conseqüentemente o teor de ar incorporado das matrizes cimentícias. Novamente, foi verificado uma melhora significativa do desempenho ao utilizar os dois resíduos simultaneamente.

Quanto aos tempos de pega das misturas, verificou-se através das técnicas de calorimetria que o FGD, quando avaliado isoladamente, não proporciona o prolongamento dos tempos de indução das misturas, porém, observou-se uma redução da taxa de calor liberado quando comparado à referência. As amostras contendo a incorporação dos resíduos simultaneamente acarretou maiores tempos de pega e menores taxas de liberação de calor.

Com relação a retenção de água, a substituição do cimento pelos resíduos não apresentou influencia nesta propriedade quando comparado ao traço contendo apenas Cimento Portland.

A incorporação simultânea dos resíduos em substituição ao cimento melhorou o desempenho mecânico das argamassas. No que diz respeito a resistência à compressão, os melhores resultados foram encontrados nas argamassas E60F10 e E70F10 de EGAF, o aumento das resistências foi de 40 e 46%, respectivamente, quando comparadas ao traço contendo somente cimento.

No que tange a resistência à tração, os melhores desempenhos também foram encontrados nos traços E60F10 e E70F10, apresentando um incremento de 55 e 66% de resistência, respectivamente, quando comparados ao traço de referência. O traço com 0% de cimento, traço E70F30, obteve resistências superiores ao traço referência aos 28 dias, aumento de 8,5% de resistência à compressão e 17% de resistência à tração

O ganho de desempenho mecânico nas argamassas com incorporação dos resíduos corrobora com os resultados encontrados de aumento da densidade de massa, a diminuição do teor de ar incorporado, a consequente redução do tamanho de poros e a porosidade total das misturas. Além disso, a menor taxa de liberação de calor de hidratação.

Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, todos os traços contendo substituição obtiveram valores menores que o de referência, com exceção do traço E60F10 que obteve módulo de 32 GPa. A incorporação isolada de FGD apresentou ótimo desempenho nessa propriedade, o traço E00F30, com substituição de 30% de FGD apresentou uma redução de mais de 16% no módulo, o que aponta para um traço com maior capacidade de absorver deformações.

Com relação a propriedade de absorção e água por capilaridade, a incorporação isolada do FGD até 25% proporciona uma melhora nessa propriedade, com resultados de absorção de água por capilaridade inferiores ao de referência. Ao incorporar a EGAF simultaneamente com o FGD, o desempenho das argamassas é melhorado de forma expressiva. O menor valor de absorção de água foi obtido no traço E60F10.

Nos ensaios de cloretos e sulfatos, todos os traços apresentaram bom desempenho. Com relação aos cloretos, caso essa pesquisa fosse em concretos, todos os traços poderiam ser utilizados em elementos estruturais, pois, apresentaram o percentual de cloretos inferior a 0,15%. Dos valores que foram encontrados no ensaio de sulfatos os traços 00F30) e E60F30 são os únicos que apresentaram teor de sulfatos superior ao traço referência, no entanto, independentemente do valor de incorporação de FGD, os resultados encontrados na matriz cimentícia foram bem inferiores aos valores encontrados durante a caracterização do FGD.

A utilização simultânea dos resíduos apresentou valores com menor módulo de elasticidade e menor absorção de água por capilaridade, resultando em matrizes cimentícias com maior durabilidade, uma vez que é menos propensa a formação de

fissuras e menor a chance de penetração de qualquer agente agressivo. Além disso, todas as amostras apresentaram ótimo desempenho frente aos ensaios de cloretos totais e sulfatos.

Os resultados de lixiviação de contaminantes demonstraram que todos os traços propostos podem ser utilizados com segurança, uma vez que não houve lixiviação de nenhum contaminante em quantidade prejudicial ao meio ambiente.

As imagens obtidas no MEV não foram suficientes para a identificação de compostos hidratados em todos os traços, devido à baixa resolução do equipamento. Porém, através do EDS acoplado ao microscópio, foi possível estabelecer a relação Ca/Si das amostras e verificar que todos os traços apresentavam potencial presença de C-S-H, com exceção do traço E70F25, onde os valores encontrados apontavam para presença de AFt (etringita) e/ou AFm (monosulfoaluminato de cálcio).

Portanto, os estudos apresentados demonstram que a utilização de FGD e EGAF simultâneos para substituir o Cimento Portland são extremamente satisfatórios, obtendo desempenhos mecânicos e de durabilidade superiores aos de referência, além de segurança ambiental, viabilizando a utilização desses resíduos na produção de matrizes cimentícias com baixo teor de cimento.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a continuação do estudo para formulação de uma argamassa com a substituição de Cimento Portland por FGD e EGAF objetivando o desenvolvimento de novos estudos para fomentar o conhecimento e possibilitar a aplicação real das misturas nas edificações. Para tanto, recomenda-se os seguintes trabalhos:

- Estudar o comportamento das resistências mecânicas das argamassas, principalmente, resistência à compressão, em idades superiores a 91 dias, objetivando a verificação do comportamento a longo prazo.
- Estudar novos traços das argamassas, como o traço E00F10, para verificar se a substituição isolada de FGD, porém, em baixos percentuais, também ocasionam a diminuição dos tempos de pega. Dessa forma, o resíduo pode ser utilizado como um aditivo acelerador de pega nas misturas.
- Realizar ensaios microestruturais (MEV) com maior precisão, possibilitando uma identificação e análise mais assertiva dos compostos hidratados formados, inclusive a identificação de formação de etringita tardia.
- Avaliar a morfologia das partículas de resíduo por meio de coeficiente de forma, angularidade e rugosidade para verificar em quais propriedades, principalmente no estado endurecido, essas características morfológicas podem ter influenciado.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. ABNT, 2018. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. ABNT, 2019. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico**. Rio de Janeiro. ABNT, 2011. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro. ABNT, 2016. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro. ABNT, 2005. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro. ABNT, 2005. 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13528: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas — Determinação da resistência de aderência à tração. Parte 3: Aderência superficial**. Rio de Janeiro. ABNT, 2019. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro. ABNT, 2005. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica**. Rio de Janeiro. ABNT, 2008. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro. ABNT, 2018. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 16: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico**. Rio de Janeiro. ABNT, 2005. 3p.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 09: Concreto e argamassa – Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração.** 2002.

**ACI 116R00**, Cement and Concrete Terminology, Detroit, Michigan, 2005.

**Aço & Sustentabilidade.** Instituto Aço Brasil. 2020.

**A Indústria do Aço no Brasil.** Confederação Nacional da Indústria (CNI). Instituto Aço Brasil. Brasília. 2017.

ANGULSKI DA LUZ, C., HOOTON, R. D. **Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age**, Cement and Concrete Research, v. 77, pp. 69-75, 2015.

CABRERA-MADRID, J. A.; ESCALANTE-GARCÍA, J. I.; CASTRO-BORGES, P. **Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado.** Revista ALCONPAT, Volumen 6, Abril 2016, Páginas 64 – 83.

CAILLAHUA, M. C. **Avaliação Técnica para Uso do Gesso FGD como Aditivo Retardador do Tempo de Pega em Cimento Portland.** 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2013.

CAILLAHUA, M. C.; MOURA, FRANCISCO JOSÉ. **Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for Portland cement.** Journal of Materials Research And Technology, 2018.

CARDOSO, Fábio Alonso. **Método de formulação de argamassa de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

CARPENTER, A. M. **Low water FGD Technologies.** London: IEA Clean Coal Centre. Nov. 2012. 73 p.

CARPENTER, A. M. **Advances in multi-pollutant control.** London: IEA Clean Coal Centre. Nov. 2013. 82 p.

CARVALHO, ADRIANO DOS GUIMARÃES. **Energia de ativação dos concretos: experimentação e modelagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Nacional Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

DAMINELI, BRUNO LUÍS. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2013.

DIVSHOLI, B. S.; LIM, T. Y. D.; TENG, S. **Durability Propoerties and Microestructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete.**Internacional Journal of Concrete Structures and Materials. v. 8. Pag. 157-164. 2014

FRANÇA, Ítalo W. L. de. **Avaliação do efeito de aditivos na dessulfuração de gases de combustão (FGD) em unidade piloto de DAS.** 2019. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química. Área de concentração: Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

GRACIOLI, B.; VARELA.; M.V. F., BEUTLER, C.S.; FRARE, A.; LUZ, C.A.; PEREIRA FILHO, J.I. **Considerações sobre a resistência mecânica e o processo de hidratação de cimentos supersulfatados (CSS) formulados com fosfogesso.** Revista Matéria, v.22, n.1, 2017.

GRUSKOVNJAK, A.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; FIGI, R.; KO, S.-C.; ADLER, M.; MÄDER, U. **Hydration mechanisms of super sulphated slag cement.** Cement and Concrete Research, V 38, 2008, p 983–992.

GUO, XIAOLU; SHI, HUISENG. **Influence of Thermally Treated Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum on Performance of the Slag Powder Concrete.** Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2013.

IPCC, 2014: **Climate Change 2014: Synthesis Report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

JIANG, LINHUA; LI, CHENZHI; WANG, CHAO; XU, NING; CHU, HONGQIANG. **Utilization of flue gas desulfurization gypsum as an activation agent for high-volume slag concrete** Journal of Cleaner Production 205 (2018).

JOHARI, M. A. M.; BROOKS, J. J.; KABIR, S.; RIVARD, P. **Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete.** Construction and Building Materials. p. 2639-2648. 2011.

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

KHATIB, JAMAL M.; MANGAT, PRITPAL S.; WRIGHT LEE. **Early age porosity and pore size distribution of cement paste with flue gas desulphurisation (FGD) waste.** Journal of Civil Engineering and Management (Vol. 19, Issue 5). 2021.

KOUKOUZAS, Nikolaus; VASILATOS, Charalampos. **Mineralogical and chemical properties of FGD gypsum from Florina, Greece.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology, v. 83, p. 20-26, 2008.

LEE, J. and LEE, T. **Durability and Engineering Performance Evaluation of CaO Content and Ratio of Binary Blended Concrete Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag.** Applied Sciences, v. 10, 2020.

LEI, D.-Y.; GUO, L. -P.; SUN, W.; LIU, J. -P.; MIAO, C. -W. **Study on properties of untreated FGD gypsum-based high-strength building materials.** Construction and Building Materials, v. 153, 2017, p. 765–773.

LIU, S., WANG, L., GAO, Y., YU, B., & TANG, W. **Influence of fineness on hydration kinetics of supersulfated cement.** *Thermochimica Acta*, v.V 605, 2015, p. 37–42.

MASOUDI, R. and HOOTON, R. D. **Examining the hydration mechanism of supersulfated cements made with high and low-alumina slags.** *Cement and Concrete Composites*, v. 103, 2019, p. 193–203.

MIN, B.H., ERWIN, L. & JENNINGS, H.M. **Rheological behaviour of fresh cement paste as measured by squeeze flow.** *J Mater Sci* 29, 1374–1381 (1994).

MUN, K. J.; HYOUNG, W. K., LEE, C.W; SO, S. Y.; SOH, Y. S. **Basic properties of non-sintering cement using phosphogypsum and waste lime as activator.** *Construction and Building Materials*, v. 21, 2007, p. 1342–1350.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 5ª edição. São Paulo. Bookman. 2016.

OZBAY, ERDOGAN, et al. **Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties--a review.** *Construction and Building Materials*, vol. 105, 15 Feb. 2016, pp. 423+.

PANG, M.; SUN, Z.; HUANG, H. **Compressive Strength and Durability of FGD Gypsum-Based Mortars Blended with Ground Granulated Blast Furnace Slag.** *Materials*, v.13, 2020, 3383.

POULLIKKAS, ANDREAS. **Review of Design, Operating, and Financial Considerations in Flue Gas Desulfurization Systems.** *Energy Technology & Policy* (2015) 2, 92–103.

**ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050.** Coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. 64 p. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

RUBERT, S.; ANGULSKI DA LUZ, C.; VARELA, M. V. F.; PEREIRA FILHO, J. I.; HOOTON, R. D. **Hydration mechanisms of supersulfated cement.** *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 1, p. 1-10, 2018.

RUST, D.; RATHBONE, R.; MAHBOUB, K. C. *et al.* **Formulating Low-Energy Cement Products.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, v. 24(9), p. 1125-1131.

SCRIVENER, K.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. **Eco-efficient cements: Potential, economically viable, solutions for a low-CO<sub>2</sub>, cement-based materials industry.** Paris: UN Environment, 2016.

SILVA F.B., CLETO F.R., DIESTELKAMP E.D., YOSHIDA O.S., OLIVEIRA L.A., SAADEM. R.M., SILVA V.G., MORAGA G.L., PASSUELLO A.C.B., SILVA M.G., MYERS N., GMÜNDER S., (2018). **Life Cycle Inventories of Cement, Concrete and Related Industries - Brazil.** Ecoinvent association, Zürich, Switzerland.

SILVA, Maristela G.; BATTAGIN, Arnaldo F.; GOMES, Vanessa. **Cimentos Portland com Adições Minerais**. Capítulo 25. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais*. IBRACON 2017.

SUN, H.; QIAN, J.; YANG, Y.; FAN, C; YUE, Y. **Optimization of gypsum and slag contents in blended cement containing slag**. *Cement and Concrete Composites*, v. 112, 2020.

T. CERULLI, C. PISTOLESI, C. MALTESE, D. SALVIONI, **Durability of traditional plasters with respect to blast furnace slag-based plaster**. *Cement and Concrete Research*. Volume 33, Issue 9. 2003. Pages 1375-1383.

TENG, SUSANTO; LIM, TZE YANG DARREN; DIVSHOLI, BAHADOR SABET. **Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag**. *Construction and Building Materials* 40 (2013) p. 875–881.

TEIXEIRA, Roberta Arlêu. **Concretos produzidos com adição de resíduo proveniente do sistema de dessulfurização de gases (FGD): Avaliação de aspectos mecânicos, ambientais e de durabilidade**. 2019. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

TRENTIN, P. O; MAGRO, I. C.; SOUZA, L. R. M. N.; HOMRICH, J. T. O.; ALGULSKI DA LUZ, C.; BONINI, J. S. **Comparativo entre cimento Portland e cimento supersulfatado submetidos ao ataque por sulfato de sódio: resistência mecânica e variação dimensional**. 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (4º SPPC), artigo 4SPPC130, p. 282 – 290, 2019.

UNEP (2019). **Emissions Gap Report 2019. Executive summary**. United Nations Environment Programme, Nairobi.

UYSAL, M.; SUMER, M. **Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures**. *Construction and Building Materials*, v. 25, 2011, p. 4112–4120.

ZHONG, Shiyun; NI, Kun; LI, Jinmei. **Properties of mortars made by uncalcined FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder**. *Waste Management*, v. 32, 2012, p.1468–1472.