

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

WALTER JACOBELIS NETO

**ESCÓRIA DE FERRO-NÍQUEL COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR
EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CLÍNQUER PORTLAND EM PASTAS E
ARGAMASSAS DE ALTA RESISTÊNCIA**

Vitória - ES

2024

WALTER JACOBELIS NETO

**ESCÓRIA DE FERRO-NÍQUEL COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR
EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CLÍNQUER PORTLAND EM PASTAS E
ARGAMASSAS DE ALTA RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, na área de concentração Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Pilar

Vitória - ES

2024

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

J15e Jacobelis Neto, Walter, 1996-
Escória de ferro-níquel como material cimentício suplementar
em substituição parcial ao clínquer Portland em pastas e
argamassas de alta resistência / Walter Jacobelis Neto. - 2024.
107 p. : il.

Orientador: Ronaldo Pilar.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Cimento Portland. 2. Argamassa. 3. Escória (Metalurgia). I.
Pilar, Ronaldo. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624



Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Credenciamento/CFE/parecer n. 487/2018, portaria n. 609 de 14/03/2019.

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Às nove horas e trinta minutos do dia vinte e seis de março do ano de dois mil e vinte e quatro, **por meio de videoconferência**, teve início a sessão pública de defesa da dissertação intitulada “**Escória de Ferro-Níquel como Material Cimentício Suplementar em Substituição Parcial ao Clínquer Portland em Pastas e Argamassas de Alta Resistência**”, do aluno **Walter Jacobelis Neto**, candidato ao título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Construção Civil, perante a Banca Examinadora composta pelos seguintes professores: **Prof. Dr. Ronaldo Pilar**, Doutor em Engenharia Civil, Orientador do aluno e Presidente da banca; **Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires**, Doutor em Engenharia Civil; **Prof. Dr. Eduardo Pereira**, Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais e **Prof. Dr. Rafael Dors Sakata**, Doutor em Engenharia Civil. Concluída a apresentação oral, o aluno foi arguido por todos os membros da Banca Examinadora e, a seguir, foi facultada a palavra ao público presente. Terminada a arguição do aluno, a Banca Examinadora reuniu-se, em separado, para deliberação. Ao final, o Presidente comunicou aos presentes que a dissertação havia sido **APROVADA**. Encerrada a sessão, eu, Prof. Dr. Ronaldo Pilar, presidente da banca examinadora, lavrei a presente Ata, que, depois de lida, foi assinada pelos outros membros da Banca Examinadora e por mim.

Vitória-ES, 26 de março de 2024

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Orientador – UFES

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

Prof. Dr. Eduardo Pereira
Examinador Externo - UEPG

Prof. Dr. Rafael Dors Sakata
Examinador Externo - UFRRJ



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Escória de Ferro-Níquel como Material Cimentício Suplementar em Substituição Parcial ao Clínquer Portland em Pastas e Argamassas de Alta Resistência

Walter Jacobelis Neto

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 **26 de março de 2024** por:

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Doutor em Engenharia Civil
Orientador – UFES

Prof. Dr. Patricio José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Interno – UFES

Prof. Dr. Eduardo Pereira
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Examinador Externo – UEPG

Prof. Dr. Rafael Dors Sakata
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Externo - UFRRJ

Vitória – ES, março de 2024





DOCUMENTOS DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO ALUNO WALTER JACOBELIS NE

Data e Hora de Criação: 02/05/2024 às 08:14:43

Documentos que originaram esse envelope:

- ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO.docx (Documento Microsoft Word) - 1 página(s)
- FOLHA DE ROSTO.docx (Documento Microsoft Word) - 1 página(s)



Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: 8971c0b35d21f40b0edba5ddb8ce2462d59849756155679011987f03868c8e4

[SHA512]: 5e794aff9707baa850944dbacfe6fa17a6351df7f600a4984263f85d9b406ebb9ff5dcd3f9f261ff06c59316511e8bd0f22312d38baec2904784d6267c2fd9a

Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope



ASSINADO - Eduardo Pereira (eduardopereira@uepg.br)

Data/Hora: 02/05/2024 - 10:13:18, IP: 177.57.199.39, Geolocalização: [-13.003403, -38.532867]

[SHA256]: 796ba941a07e8e90d1a95398db34b5ead37a7a20020a7804d4ba3349c3f4ddcb



ASSINADO - Patrício José Moreira Pires (patricio.pires@gmail.com;patricio.pires@ufes.br;)

Data/Hora: 02/05/2024 - 14:53:44, IP: 200.137.65.104

[SHA256]: 7f7ff468edfa2d3518baa2b0d4b3a9c7085fcd521c411ed91198e8471c3ee998



ASSINADO - Rafael Dors Sakata (rafaelsakata@ufrj.br)

Data/Hora: 02/05/2024 - 19:35:36, IP: 138.204.213.59, Geolocalização: [-22.704947, -43.715788]

[SHA256]: ff72ca5907caf4f55c3ee9d3cd0795100942fb14f9785507fd429382a5bfb83e



ASSINADO - Ronaldo Pilar (ronaldo_pilar@hotmail.com; ronaldo.pilar@ufes.br)

Data/Hora: 03/05/2024 - 18:58:27, IP: 179.234.229.209, Geolocalização: [-20.289239, -40.294345]

[SHA256]: 9a32a8d636cadf8c6fe5d40920fd5a4f2e2e9f314eadedeb750f5727ba89f97e

Histórico de eventos registrados neste envelope

- 03/05/2024 18:58:27 - Envelope finalizado por ronaldo_pilar@hotmail.com; ronaldo.pilar@ufes.br, IP 179.234.229.209
- 03/05/2024 18:58:27 - Assinatura realizada por ronaldo_pilar@hotmail.com; ronaldo.pilar@ufes.br, IP 179.234.229.209
- 02/05/2024 19:35:36 - Assinatura realizada por rafaelsakata@ufrj.br, IP 138.204.213.59
- 02/05/2024 19:35:31 - Envelope visualizado por rafaelsakata@ufrj.br, IP 138.204.213.59
- 02/05/2024 14:53:44 - Assinatura realizada por patricio.pires@gmail.com;patricio.pires@ufes.br;, IP 200.137.65.104
- 02/05/2024 14:53:41 - Envelope visualizado por patricio.pires@gmail.com;patricio.pires@ufes.br;, IP 200.137.65.104
- 02/05/2024 10:13:18 - Assinatura realizada por eduardopereira@uepg.br, IP 177.57.199.39
- 02/05/2024 10:13:14 - Envelope visualizado por eduardopereira@uepg.br, IP 177.57.199.39
- 02/05/2024 10:11:11 - Envelope registrado na Blockchain por sidney.barbara@ufes.br, IP 200.137.65.106
- 02/05/2024 10:11:11 - Envelope encaminhado para assinaturas por sidney.barbara@ufes.br, IP 200.137.65.106
- 02/05/2024 08:14:51 - Envelope criado por sidney.barbara@ufes.br, IP 200.137.65.106

RESUMO

A escória de ferro-níquel (EFN) é um subproduto industrial, sendo o uso deste material na construção civil, como potencial agregado ou aglomerante, tema de pesquisas em que se busca melhorar propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos e argamassas. Este trabalho objetivou avaliar o efeito da incorporação de EFN no desempenho no estado fresco e endurecido de pastas e argamassas. A EFN foi incorporada ao clínquer moído com gipsita em teores de 10%, 20% e 30% em massa, com finura de 5.900 cm²/g, bem como no teor de 20% com finura de 9.300 cm²/g, avaliando paralelamente a influência da área superficial. Foram produzidas também amostras contendo 20% de fíler calcário. As pastas tiveram suas propriedades no estado fresco avaliadas a partir de ensaios reológicos e de calorimetria. Em argamassas para concretos autoadensáveis, foram realizados ensaios tecnológicos de espalhamento, tempo de escoamento por mini funil V, massa específica e ar incorporado, no estado fresco, bem como a resistência à compressão em argamassas no estado endurecido. Os ensaios reológicos demonstraram redução das tensões de cisalhamento estáticas, de 20%, e dinâmicas, de 18%, aos 10 min, da média das amostras contendo a EFN 5.900 cm²/g. Percebeu-se redução nos picos de liberação de calor das amostras contendo EFN, de até 22% na amostra P-E30. As composições contendo EFN com finura *Blaine* de 5.900 cm²/g apresentaram valores de espalhamento 16% a 29% maiores do que a referência, aos 10 min. Esta maior fluidez se manteve aos 60 min. A amostra com EFN com área superficial de 9.300 cm²/g obteve um espalhamento 6% maior do que a referência, aos 10 min. Todas as amostras com materiais cimentícios suplementares obtiveram menor tempo de escoamento por mini funil V, com uma redução média aos 10 min e 60 min de 38% e 44%, respectivamente. As argamassas contendo EFN apresentaram uma redução de resistência à compressão de 5% a 13%, com reduções maiores conforme o teor da escória aumentou. Os índices de intensidade do cimento diminuíram em média 13%.

Palavras-chave: Trabalhabilidade; resistência à compressão; argamassas; pastas cimentícias; escória de ferro-níquel; material cimentício suplementar.

ABSTRACT

Ferronickel slag (FNS) is an industrial by-product, and it's used in construction as a potential aggregate or binder. This material is subject of research aimed at improving the mechanical properties and durability of concrete and mortar. This study aimed to evaluate the effect of incorporating FNS on the fresh and hardened state performance of pastes and mortars. FNS was incorporated to ground clinker with gypsum at mass proportions of 10%, 20%, and 30%, with a fineness of 5,900 cm²/g, as well as at 20% with a fineness of 9,300 cm²/g, to simultaneously evaluate the influence of surface area. Samples containing 20% limestone filler were also produced. The pastes were evaluated in terms of fresh state properties through rheological tests and calorimetry. In self-compacting concrete mortars, technological tests including slump flow, flow time through a mini V-funnel, density, and air content were conducted in the fresh state, as well as compressive strength in hardened state mortars. Rheological tests showed a reduction in static and dynamic shear stresses of 20% and 18%, respectively, at 10 minutes, on average, for samples containing FNS with specific surface area of 5,900 cm²/g. Reductions in heat release peaks were observed in samples containing FNS, up to 22% in sample P-E30. Compositions containing FNS with specific surface area of 5,900 cm²/g showed slump flow values 16% to 29% higher than the reference at 10 minutes. This increased fluidity was maintained at 60 minutes. The sample with FNS with a specific surface area of 9,300 cm²/g showed only a 6% higher flow than the reference at 10 minutes. All samples with supplementary cementitious materials had shorter flow times through the mini V-funnel, with an average reduction at 10 minutes and 60 minutes of 38% and 44%, respectively. Mortars containing FNS exhibited a proportional reduction in compressive strength of 5% to 13%, higher when the FNS content was higher. The cement intensity index was on average 13% lower with the use of FNS.

Keywords: Workability; compressive strength; mortars; cement pastes; ferronickel slag; supplementary cementitious material.

Soli Deo Gloria

AGRADECIMENTOS

A Deus, ao qual seja dada glória para todo o sempre.

À Rafaela, amor da minha vida, e ao nosso pequeno Joaquim, pelo amor, apoio, motivação e compreensão.

Aos meus pais, Junior e Fernanda, e ao meu irmão, Carlos Eduardo, por todo o amor, suporte e parceria, e a toda nossa família, próxima ou distante.

A João, Denise, Isabela, toda esta família que amo e também é minha.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ronaldo, por todo o conhecimento compartilhado e instrução.

Às Profas. Dras. Rudiele e Maristela, aos técnicos de laboratório, especialmente do LEMAC, aos colegas de mestrado e graduação, e a todos que contribuíram direta ou indiretamente a este trabalho.

À UFES e à Anglo American, pelo apoio material à pesquisa.

SUMÁRIO

1.	Introdução	21
1.1.	Contexto	21
1.2.	Justificativa.....	23
1.3.	Objetivo geral	24
1.4.	Objetivos específicos	24
1.5.	Problema de Pesquisa	24
1.6.	Estrutura da dissertação	25
1.7.	Contribuição técnica/científica.....	25
2.	Revisão bibliográfica	27
2.1.	Materiais cimentícios suplementares	27
2.2.	Hidratação do cimento Portland e reologia de materiais cimentícios ..	28
2.2.1.	Hidratação do cimento Portland	28
2.2.2.	Reologia de materiais cimentícios	29
2.3.	Escória de ferro-níquel	31
2.3.1.	Características e propriedades.....	32
2.3.2.	Periculosidade	34
2.3.3.	Utilização como agregado miúdo	35
2.3.4.	Utilização como material cimentício suplementar.....	36
2.3.4.1.	Propriedades reológicas e trabalhabilidade.....	37
2.3.4.2.	Calor de hidratação e tempo de pega	38
2.3.4.3.	Resistência à compressão	41
3.	Abordagem metodológica	43
3.1.	Planejamento experimental.....	48
3.2.	Caracterização dos materiais.....	49
3.3.	Estudos em pastas.....	50
3.3.1.	Composição e procedimento das misturas.....	51

3.3.2.	Ensaio reológico	52
3.3.3.	Ensaio de calorimetria de condução	54
3.4.	Estudos em argamassas.....	54
3.4.1.	Composição e procedimento das misturas.....	55
3.4.2.	Ensaio tecnológico no estado fresco	57
3.4.2.1.	Ensaio de espalhamento	57
3.4.2.2.	Ensaio de mini funil V	58
3.4.2.3.	Densidade de massa e ar incorporado.....	59
3.4.3.	Resistência à compressão das argamassas	61
4.	Resultados	63
4.1.	Caracterização	63
4.1.1.	Granulometria.....	64
4.1.2.	Fluorescência de raios X.....	65
4.1.3.	Microscopia eletrônica de varredura	66
4.2.	Ensaio em pastas	68
4.2.1.	Reologia	68
4.2.1.1.	Ensaio reológico aos 10 min.....	68
4.2.1.2.	Ensaio reológico aos 60 min.....	72
4.2.2.	Calorimetria	76
4.3.	Ensaio em argamassas.....	80
4.3.1.	Teor de aditivo.....	80
4.3.2.	Ensaio no estado fresco	80
4.3.3.	Resistência à compressão de argamassas	86
5.	Considerações finais.....	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	APÊNDICES.....	98
A)	Reologia.....	98

B)	Ensaio no estado fresco em argamassas.....	106
C)	Ensaio de resistência à compressão.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland	29
Figura 2 - DRX de três amostras de EFN.....	34
Figura 3 - Relação entre tensão e taxa de cisalhamento	37
Figura 4 - Taxa exotérmica (a) e calor de hidratação acumulado (b)	39
Figura 5 - Variação de tempo de pega com diferentes teores de EFN.....	40
Figura 6 - Desenvolvimento de resistência à compressão de concreto com EFN	41
Figura 7 - Resistência à compressão em diferentes finuras, teores e relação a/ag	42
Figura 8 - Areia natural.....	44
Figura 9 – Moinho de bolas	45
Figura 10 - Fluxograma metodológico.....	47
Figura 11 – Nomenclatura das pastas.....	51
Figura 12 - Reômetro rotacional Haake Mars III, com geometria <i>vane</i>	53
Figura 13 – Nomenclatura das argamassas.....	55
Figura 14 - Argamassadeira	56
Figura 15 - Cone e mesa de espalhamento	57
Figura 16 – Esquema do ensaio de espalhamento	58
Figura 17 - Mini Funil V	58
Figura 18 – Dimensões do Mini Funil V.....	59
Figura 19 – Recipiente para ensaio de densidade de massa e balança	60
Figura 20 - Curvas de distribuição granulométrica dos materiais.....	64
Figura 21 - MEV da amostra de clínquer. a) x100 b) x500 c) x1.000 d) x2.000	67
Figura 22 - MEV da amostra de EFN. a) x100 b) x500 c) x1.000 d) x2.000.....	67
Figura 23 - Curvas de tensão de cisalhamento versus tempo para determinação da tensão de escoamento estática aos 10 min	69
Figura 24 - Tensão de escoamento estática aos 10 min.....	70
Figura 25 - Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento aos 10 min	71
Figura 26 – Determinação da tensão de escoamento estática aos 60 min	73
Figura 27 - Tensão de escoamento estática aos 60 min.....	74
Figura 28 - Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento aos 60 min	75
Figura 29 - Taxa de calor liberado por calorimetria isotérmica de condução ...	77

Figura 30 - Calor total liberado por calorimetria de condução isotérmica.....	79
Figura 31 – Espalhamento	82
Figura 32 - Tempo de escoamento pelo mini funil V	83
Figura 33 - Ensaio de mini funil V.....	83
Figura 34 - Espalhamento A-REF 10 min.....	84
Figura 35 - Espalhamento A-REF 60 min.....	84
Figura 36 - Espalhamento A-E10 10 min	84
Figura 37 - Espalhamento A-E10 60 min	84
Figura 38 - Espalhamento A-E20 10 min	85
Figura 39 - Espalhamento A-E20 60 min	85
Figura 40 - Espalhamento A-E30 10 min	85
Figura 41 - Espalhamento A-E30 60 min	85
Figura 42 - Espalhamento A-F20 10 min.....	85
Figura 43 - Espalhamento A-F20 60 min.....	85
Figura 44 - Espalhamento A-EFI20 10 min	86
Figura 45 - Espalhamento A-EFI20 60 min	86
Figura 46 - A-REF com superfície regularizada	87
Figura 47 - A-E10 com superfície regularizada	87
Figura 48 - CPs A-REF e A-E10 rompidos.....	87
Figura 49 - A-E20, A-E30 e A-F20 com superfície regularizada.....	87
Figura 50 - CPs A-E20, A-E30 e A-F20 rompidos.....	87
Figura 51 - A-EFI20 com superfície regularizada	87
Figura 52 - Resistência à compressão média das composições aos 28 dias de idade	88
Figura 53 - Redução na resistência à compressão em relação à argamassa de referência	89
Figura 54 - Índice de intensidade do aglomerante	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de materiais cimentícios suplementares.....	27
Tabela 2 - Compostos principais do cimento Portland	28
Tabela 3 - Modelos reológicos	30
Tabela 4 - Composição parcial de diferentes amostras de EFN	33
Tabela 5 - Características físicas de diferentes amostras de EFN.....	33
Tabela 6 - Lixiviação de metais pesados aos 28 dias	35
Tabela 7 - Tempo de pega de matrizes cimentícias com EFN.....	40
Tabela 8 - Nomenclatura relativa ao material incorporado.....	46
Tabela 9 - Variáveis independentes	48
Tabela 10 - Variáveis de resposta.....	49
Tabela 11 - Ensaio em pastas e argamassas.....	49
Tabela 12 – Proporção unitária, em massa, entre os materiais constituintes das pastas.....	51
Tabela 13 – Proporção unitária, em massa, entre os materiais constituintes das argamassas.....	55
Tabela 14 - Peso específico e área específica dos materiais	63
Tabela 15 - d_{10} , d_{50} e d_{90}	64
Tabela 16 - Composição química dos materiais.....	65
Tabela 17 - Propriedades reológicas aos 10 min	71
Tabela 18 - Coeficientes de correlação aos 10 min	72
Tabela 19 - Propriedades reológicas aos 60 min	75
Tabela 20 - Coeficientes de correlação aos 60 min	76
Tabela 21 - Massa de material utilizada no calorímetro	76
Tabela 22 - Período de indução das misturas	76
Tabela 23 - Calor total liberado em 72h	79
Tabela 24 - <i>Slump flow</i> da argamassa A-REF a partir de diferentes teores de aditivo.....	80
Tabela 25 - Resultados dos ensaios no estado fresco em argamassas	81
Tabela 26 - Ensaio reológico aos 10 min – P-REF, P-E10 e P-E20	98
Tabela 27 - Ensaio reológico aos 10 min – P-E30, P-F20 e P-EFI20	100
Tabela 28 - Ensaio reológico aos 60 min – P-REF, P-E10 e P-E20	102
Tabela 29 - Ensaio reológico aos 60 min – P-E30, P-F20 e P-EFI20	104

Tabela 30 - Ensaio no estado fresco, com medidas intermediárias de <i>slump flow</i>	106
Tabela 31 - Resistência à compressão das argamassas	107

1. Introdução

1.1. Contexto

A produção global de cimento, aglomerante empregado na produção de argamassas e concretos, é de aproximadamente 4 bilhões de toneladas por ano, e representa cerca de 8% do total de emissões antropogênicas de CO₂ (HABERT et al., 2020). Na tentativa de mitigar estas emissões, fontes de materiais cimentícios suplementares, usualmente subprodutos de diversas atividades industriais, têm sido utilizados e estudados há décadas como uma maneira de providenciar valor agregado e reduzir o consumo de energia referente ao processo de produção do cimento (CHEN et al., 2020). Estes materiais cimentícios suplementares, que se tratam de adições minerais, dependem da disponibilidade local, e a fonte de alguns deles, como a cinza volante, tende a diminuir progressivamente, o que demonstra a importância do estudo de materiais alternativos para este fim (DUCHESNE, 2021).

A escória de ferro-níquel (EFN), um subproduto industrial proveniente majoritariamente de fornos de arco elétrico, é um material composto predominantemente por SiO₂, MgO e Fe₂O₃, com fração amorfa que pode exceder 50% (KOMNITSAS et al., 2013). A produção pode chegar a até 14 toneladas de escória para 1 tonelada de liga de ferro-níquel (SAHA e SARKER, 2016). Isso se deve, principalmente, ao baixo teor de níquel no minério, de 1-2% de acordo com Saha et al. (2018).

O Brasil possui uma reserva de níquel estimada em 11.000.000 toneladas (USGS, 2020), e dados da indústria nacional em 2022 indicam, por exemplo, que os complexos industriais localizados nos municípios de Barro Alto e Niquelândia (Goiás) têm uma geração anual de EFN de aproximadamente 2.000.000 toneladas por ano, na proporção de 6 toneladas de escória para 1 tonelada de liga de ferro-níquel. Em perspectiva, foram vendidas cerca de 60 milhões de toneladas de cimento no Brasil em 2020 (DA SILVA, 2022).

Atualmente, a maior parte da EFN produzida ainda é depositada a céu aberto. A estocagem, apesar de não necessitar de processos especiais devido à sua classificação como resíduo não perigoso (SAHA et al., 2018; COSME et al., 2021), gera custos com manejo das pilhas, além de possíveis impactos ambientais, como o carreamento de finos para o leito de rios.

Vários autores têm demonstrado a viabilidade do uso da escória de ferro-níquel como agregado miúdo, obtendo resultados promissores em termos de trabalhabilidade e resistência à compressão (SAHA E SARKER, 2017). Nuruzzaman et al. (2020) obtiveram resultados de trabalhabilidade condizentes com os critérios da EFNARC (2002) para concretos autoadensáveis com até 40% de EFN como agregado miúdo, assim como um aumento de 30% na resistência à compressão aos 28 dias com este mesmo teor de substituição. Substituições de 60%, por outro lado, resultaram na piora da fluidez e resistência.

Como material cimentício suplementar, Kim et al. (2019) estudaram a influência do uso de EFN em relação às emissões de carbono. Os autores verificaram que uma substituição de 30% por EFN em concretos pode resultar em uma redução de 24% nas emissões totais de CO₂, em comparação ao concreto de cimento Portland comum, além de resultar em uma economia potencial de USD \$15 por tonelada no preço de venda no mercado sul-coreano.

Concretos produzidos com EFN têm mostrado resistências à compressão que podem se aproximar aos concretos de cimento Portland comum sem adições minerais, além de baixa lixiviação de metais pesados e maior resistência à penetração de íons cloreto (HUANG et al., 2017; KIM et al., 2019; CHEN et al., 2020).

Lemonis et al. (2015) verificaram que a incorporação de EFN, conjuntamente com proporções variadas entre EFN e pozolanas naturais, contribuíram para o desenvolvimento da resistência em idades mais avançadas, atendendo aos requisitos da norma EN 197-1. Os autores destacam ainda que a EFN melhora a trabalhabilidade da argamassa, devido à redução de produtos de hidratação nos estágios iniciais.

Com relação à taxa de enrijecimento de misturas cimentícias contendo EFN, Rahman et al. (2017) não observaram um aumento do tempo de pega

significativo em pastas com teor de 50% de EFN. Kim et al. (2019) identificaram que o tempo de pega em argamassas com até 30% de EFN é dependente da finura da escória, com maiores atrasos utilizando-se escórias menos finas.

As características de reatividade da EFN permitem também sua utilização parcial como fíler, uma vez que parte deste material pode permanecer inerte. Substituir o fíler por outro material reativo como a EFN tem como vantagem o ganho de resistência proporcionado pela escória. O uso de materiais com desempenho similar ou superior ao calcário como fíler é uma alternativa que reduz o consumo de cimento e providencia destino adequado a resíduos industriais (DE MATOS et al., 2020).

1.2. Justificativa

Atualmente, poucos estudos se propõem a entender o desempenho da EFN como material cimentício suplementar, seja no estado endurecido, mas sobretudo no estado fresco de pastas, argamassas e concretos. Destaca-se que o comportamento no estado fresco interfere em uma série de etapas do processo construtivo, como o processo de mistura, transporte, lançamento e adensamento, além de interferir na estabilidade da mistura, incorporação de ar, dentre outras. Nota-se, portanto, que o comportamento reológico de composições à base de cimento Portland pode influenciar diretamente as propriedades mecânicas e de durabilidade. Verifica-se que a incorporação de EFN pode aumentar a fluidez de pastas de cimento, como na amostra de Zhou e Shi (2021), com teor de 30% de EFN.

Portanto, este trabalho busca aumentar o entendimento do efeito da escória de ferro-níquel no comportamento reológico, de trabalhabilidade e da resistência mecânica de misturas à base de cimento, bem como a manutenção de fluidez e a cinética de hidratação nas primeiras horas. A metodologia utilizada neste trabalho não foi observada na literatura, pois busca entender o comportamento da escória como parte de um cimento composto a partir do clínquer moído em oposição à substituição ao cimento Portland comum, como realizado pela maioria dos estudos no tema.

Destaca-se que a abordagem de substituir o cimento Portland por EFN em argamassas ou concretos tem sérias implicações nos resultados de reologia, uma vez que toda a incorporação do novo material altera o esqueleto granular, interferindo nos teores de aditivos redutores de água empregados, alteração no balanceamento de sulfatos, efeito físico-químico concomitante de outras adições minerais, dentre outros aspectos.

Neste sentido, a abordagem metodológica proposta neste trabalho tem como propósito entender de forma isolada os efeitos do uso da EFN, principalmente nas propriedades do estado fresco de pastas e argamassas produzidas com estes cimentos compostos, bem como na resistência à compressão.

1.3. Objetivo geral

Avaliar o efeito da incorporação da escória de ferro-níquel no desempenho no estado fresco e endurecido de pastas e argamassas.

1.4. Objetivos específicos

- Avaliar o efeito da incorporação de EFN como material cimentício suplementar no comportamento reológico de pastas;
- Avaliar o efeito da incorporação de EFN como material cimentício suplementar na cinética de hidratação nas primeiras idades;
- Avaliar a trabalhabilidade de argamassas produzidas com EFN ao longo do tempo;
- Avaliar os efeitos na resistência à compressão de argamassas produzidas com EFN.

1.5. Problema de Pesquisa

Este estudo se propôs a investigar os efeitos da incorporação de escória de ferro-níquel (EFN) como material cimentício suplementar nas propriedades

de pastas e argamassas, tanto em seu estado fresco quanto endurecido. No decorrer da pesquisa, foram formuladas as seguintes indagações:

- De que forma a EFN impacta na reologia dos materiais cimentícios quando utilizada como adição mineral?
- Como a presença da EFN como material cimentício suplementar altera a cinética de hidratação das pastas?
- De que forma a incorporação de EFN afeta a manutenção da trabalhabilidade das argamassas?
- Qual o impacto das diferentes adições minerais em relação à referência na resistência mecânica?

1.6. Estrutura da dissertação

A dissertação foi dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo, trata-se da introdução, providenciando-se contexto e justificativa e delineando os objetivos que se pretendem alcançar.

No segundo capítulo foi feita uma revisão bibliográfica sobre os conceitos que foram tratados nesta dissertação, sendo eles os materiais cimentícios suplementares, a hidratação e reologia de materiais cimentícios e a escória de ferro-níquel em si, com seus usos e propriedades.

No terceiro capítulo foi descrita a abordagem metodológica utilizada, com a apresentação dos ensaios que foram realizados em pastas e argamassas.

No quarto capítulo foram abordados os resultados dos ensaios e a discussão dos mesmos. O quinto capítulo traz a conclusão, e foi seguido das referências bibliográficas.

1.7. Contribuição técnica/científica

Pretende-se compreender o efeito da escória de ferro-níquel, incorporada como adição mineral, nas propriedades de pastas e argamassas, no que se

refere a fluidez, incorporação de ar, manutenção de trabalhabilidade, liberação de calor e resistência à compressão.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo, será analisada a literatura existente sobre materiais cimentícios suplementares, hidratação e reologia de pastas cimentícias e escória de ferro-níquel.

2.1. Materiais cimentícios suplementares

Cimentos compostos são formados por cimento Portland e pelo menos um fíler ou um material cimentício suplementar (adição mineral), em teores acima de 5%. As adições são usualmente mais finas do que os grãos de cimento Portland e podem ter origens, composições químicas e características físicas diversas (NEVILLE, 2016). Na Tabela 1 é apresentado um resumo das propriedades cimentícias de alguns materiais consolidados na produção de cimento Portland composto.

Tabela 1 - Características de materiais cimentícios suplementares	
Material	Característica cimentícia
Clínquer de cimento Portland	Totalmente cimentício (hidráulico)
Escória granulada de alto forno	Hidraulicidade latente, algumas vezes hidráulica
Pozolana natural Cinza volante	Hidraulicidade latente com cimento Portland
Sílica ativa	Ação física, em grande parte, e hidraulicidade latente com cimento Portland
Fíler calcário	Ação física, mas leve hidraulicidade latente com cimento Portland
Outros fílers [inertes]	Quimicamente inertes, somente ação física

Fonte: Adaptado de Neville (2016)

Mehta e Monteiro (2008) destacam que adições minerais, em substituição parcial ao cimento Portland, podem retardar a resistência mecânica inicial, porém atuam nas reações em idades mais avançadas, com redução da porosidade da matriz cimentícia e da zona de transição, melhorando a resistência mecânica final e a estanqueidade. Pilar et al. (2016) destacam ainda que o mecanismo de interação das partículas pozolânicas na pasta de cimento

pode resultar em sua maior densificação e homogeneização, para além do consumo de hidróxido de cálcio.

Além da contribuição para a resistência mecânica, materiais como escória de alto forno, cinza volante, pozolanas artificiais e fíler calcário podem ter como vantagens técnicas, aumento da durabilidade, redução da permeabilidade das misturas, aumento da resistência à migração de íons cloreto e sulfatos e podem atuar na prevenção de reações álcali-agregado (SILVA; BATTAGIN; GOMES, 2017).

2.2. Hidratação do cimento Portland e reologia de materiais cimentícios

2.2.1. Hidratação do cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, que reage com a água, para produzir hidratos com propriedades aglomerantes. Trata-se de um processo contínuo e exotérmico. Os principais compostos anidros do clínquer Portland estão descritos na Tabela 2, sendo constituído principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio.

Tabela 2 - Compostos principais do cimento Portland

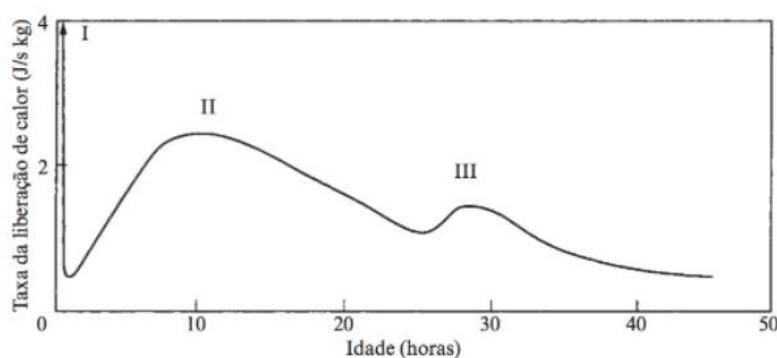
Composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville (2016)

Após uma fase inicial de reações rápidas dos sulfatos e aluminatos, que marcam o primeiro pico da taxa de liberação de calor, têm-se o período de indução, com baixa velocidade de hidratação. A explicação mais aceita para este período se dá pela teoria de dissolução de C_3S controlada pela subsaturação (SCRIVENER et al., 2019). Esta teoria relaciona o aumento da concentração de cálcio, silicatos e hidróxidos com a diminuição do grau de subsaturação e, portanto, da taxa de liberação de calor.

O fim do período de indução pode ser determinado pela intersecção da extrapolação do seu trecho horizontal e da linha de regressão do período de aceleração da taxa de liberação de calor (BETIOLI et al., 2009). O fim da aceleração culmina no segundo pico da taxa de liberação de calor, marcando o fluxo máximo de calor pós indução, associado principalmente à reação do C_3S . Em sequência, têm-se uma redução da velocidade de hidratação, seguido de um período de reações lentas e um terceiro pico, menor do que os demais, associado à retomada da reação do C_3A (NEVILLE, 2016). O perfil de liberação de calor de uma pasta com relação água/cimento de 0,4 pode ser observada na Figura 1, na qual são ilustrados estes picos (I, II e III, respectivamente).

Figura 1 - Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland



Fonte: Neville (2016)

2.2.2. Reologia de materiais cimentícios

O desempenho no estado fresco de materiais à base de cimento e o efeito de aditivos químicos e adições minerais na trabalhabilidade pode ser avaliado a partir do estudo de seus parâmetros reológicos (COSTA et al., 2020). É possível verificar estas propriedades de forma indireta por meio de métodos simples, como o abatimento de tronco de cone ou de espalhamento, bem como por reômetros, que possibilitam obter as curvas de fluxo do material (CASTRO et al., 2011).

Neste sentido, as propriedades reológicas de pastas de cimento podem, de forma geral, ser correlacionadas com a reologia de concretos e argamassas (OLIVEIRA, 2017). A caracterização destas propriedades permite avaliar a

trabalhabilidade, a fluidez e a moldagem do concreto fresco, mitigando perdas de materiais e falhas prematuras (CHIDIAC E MAHMOODZADEH, 2009).

O concreto no estado fresco tem duplo caráter, podendo se comportar como um sólido, quando aplicada uma tensão de cisalhamento menor que o valor crítico, ou como um líquido, capaz de fluir indefinidamente enquanto a tensão é mantida (COUSSOT, 2012).

A avaliação das propriedades reológicas pode contribuir na aferição da viabilidade de um material como fíler ou material cimentício suplementar. Zhou e Shi (2021), por exemplo, postulam que as menores tensões de escoamento e viscosidades plásticas obtidas em pastas contendo EFN podem ser relacionadas com melhorias na trabalhabilidade destas pastas.

A Tabela 3 apresenta os modelos reológicos de Bingham e Herschel-Bulkley, equações comumente utilizadas para descrever as curvas de fluxo de misturas à base de cimento Portland, bem como o modelo de Newton, que não considera na equação a tensão de escoamento.

Tabela 3 - Modelos reológicos

Modelo reológico	Equação do modelo
Newton	$\tau = \mu \dot{\gamma}$
Bingham	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$

τ = tensão de cisalhamento
 τ_0 = tensão de escoamento
 μ = viscosidade [plástica]
 $\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento
 K = constante

Fonte: Ferraris (1999)

Fluidos newtonianos apresentam proporcionalidade entre a tensão aplicada e sua taxa de deformação. A viscosidade é a constante de proporcionalidade. O concreto fresco pode suportar tensões sem escoar, ou seja, demanda uma tensão inicial, chamada tensão de escoamento, para iniciar o fluxo. Esta é resultado do atrito intergranular durante o cisalhamento do concreto (DE LARRARD; SEDRAN, 2002). O modelo de Herschel-Bulkley não considera a viscosidade como parâmetro, considerando-a como dinâmica a partir da taxa de cisalhamento, descrevendo curvas de fluxo não lineares.

Para avaliar o comportamento reológico dos materiais à base de cimento, pode-se fazer uso de reômetros. Os reômetros possuem duas formas de funcionamento, através de controle do torque aplicado ao fluido, indicado para avaliação da tensão de escoamento, e de controle do cisalhamento, indicado para avaliação da viscosidade em diferentes taxas de cisalhamento (CASTRO et al., 2011).

Utilizando-se o reômetro rotacional, é possível avaliar a tensão de escoamento e viscosidade aparente de fluidos e suspensões em função de variáveis como tempo e temperatura (CASTRO, 2007).

2.3. Escória de ferro-níquel

A escória de ferro-níquel é obtida como subproduto da indústria do níquel, através do resfriamento com água ou ar, sendo a quarta maior escória em quantidade produzida por fundição depois das escórias de ferro e aço e lama vermelha (NGUYEN et al., 2020).

A extração de níquel através de garnierita gera grandes quantidades de escória, devido às baixas quantidades de níquel presentes no minério (SAHA et al., 2018). Sua disposição, portanto, tem gerado uma série de desafios ambientais, e, ao mesmo tempo, despertando o interesse de pesquisadores em encontrar meios de valorização desse resíduo. Neste sentido, estudos têm proposto o uso da EFN como agregado ou como material cimentício suplementar.

Segundo Liu et al. (2020), o refino da escória de ferro-níquel é dificultado pela presença elevada de óxidos de ferro e sílica. Além disso, segundo os autores, a alta quantidade de óxido de magnésio no material pode levar a riscos estruturais nos estágios mais avançados de uso na edificação, sendo estes dois fatores os responsáveis por esta escória não ser utilizada em larga escala na engenharia.

Saha et al. (2018) destacam que a hidratação do MgO produz $Mg(OH)_2$, o que pode levar a expansões da ordem de até 17% e, conseqüentemente, perda

de resistência mecânica e instabilidade estrutural, sendo necessário avaliar a reatividade deste material.

2.3.1. Características e propriedades

Silva, Battagin e Gomes (2017) destacam que escórias de níquel possuem alto teor de sílica e magnésio e baixos teores de cálcio. Segundo os autores, a EFN pode apresentar alguma atividade pozolânica em função do seu teor de amorfo, grau de moagem e teor de sílica, neste último caso, próximos a 40%. É necessário, porém, comprovar reatividade pozolânica para uso na fabricação de cimentos pozolânicos, dada a variedade do minério de entrada e do processo de fabricação da liga ferro-níquel.

O minério contendo níquel é fundido predominantemente em fornos de arco elétrico, e a escória resultante do processo pode ser resfriada com água ou pelo ar. Devido aos diferentes processos de fundição empregados e à fonte de matéria prima, é esperada uma grande variação nos percentuais dos principais óxidos que compõem a EFN, além dos minerais formados.

Por exemplo, Katsiotis et al. (2015) identificaram uma composição, em massa, superior a 80% de óxidos de ferro e silício na EFN, sendo que o percentual total, em massa, de sílica reativa foi determinado em 40,71%. Huang et al. (2017), Kim et al. (2019) e Zhou e Shi (2021), por sua vez, encontraram teor semelhante de SiO_2 e uma quantidade significativamente maior de MgO . As amostras analisadas por Rahman et al. (2017) possuíam cerca de 50% de óxido de silício e 30% de óxido de magnésio.

Com relação ao teor de óxido de cálcio, destaca-se o trabalho de Chen et al. (2020). Os autores trabalharam com uma EFN com elevado teor de CaO (32,15%) e menor teor de sílica (24,89%), quando comparado com as EFN encontradas na literatura. Esta escória é proveniente do processo de fundição da liga de ferro níquel a partir de minério de laterita, em forno de arco elétrico.

As composições em termos de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO e MgO encontradas em amostras selecionadas nos estudos citados estão descritas na

Tabela 4. Notadamente, o teor de CaO tende a ser muito baixo, com a exceção mencionada de Chen et al. (2020).

Tabela 4 - Composição parcial de diferentes amostras de EFN

Composição parcial das escórias de ferro níquel (% peso)						
Óxidos	Katsiotis et al. (2015), Lemonis et al. (2015)	Rahman et al. (2017)	Huang et al. (2017) ¹	Kim et al. (2019) ²	Chen et al. (2020)	Zhou e Shi (2021)
SiO ₂	41,18	53,29	46,10	40,46	24,89	45,26
Al ₂ O ₃	5,98	2,67	4,46	3,64	17,46	5,43
Fe ₂ O ₃	40,02	11,90	12,25	6,87	2,66	18,91
CaO	4,12	0,42	6,75	6,60	32,15	1,41
MgO	7,79	31,60	27,12	40,45	9,61	25,58

¹Amostra EFS1 do estudo

²Referente à amostra com área superficial específica de 4.660 cm²/g

Fonte: O autor

Com o objetivo de melhorar o desempenho da EFN como um material cimentício suplementar, a escória passa por um processo de moagem. Na Tabela 5 é apresentado um resumo com os dados de área específica e a massa específica encontrados na literatura. De modo geral, a escória tem sido estudada com uma finura média entre 4.000 cm²/g e 5.000 cm²/g. Entretanto, existem estudos com EFN com elevada finura, próxima à da sílica ativa, na ordem de 26.300 cm²/g, no caso de uma das amostras de Kim et al. (2019).

Tabela 5 - Características físicas de diferentes amostras de EFN

Características físicas das escórias de ferro níquel						
	Katsiotis et al. (2015), Lemonis et al. (2015)	Rahman et al. (2017)	Huang et al. (2017)	Kim et al. (2019)	Chen et al. (2020)	Zhou e Shi (2021)
Origem	Grécia	Nova Caledônia	China (RPC)	Coreia (RDC)	China (RPC)	China (RPC)
Área específica (cm ² /g)	3985	5000	4360	4660	4256	4200 5500 ¹
Massa específica (g/cm ³)	3,18	2,95	2,97	3,05	2,86	NI

¹Amostras de mesma composição

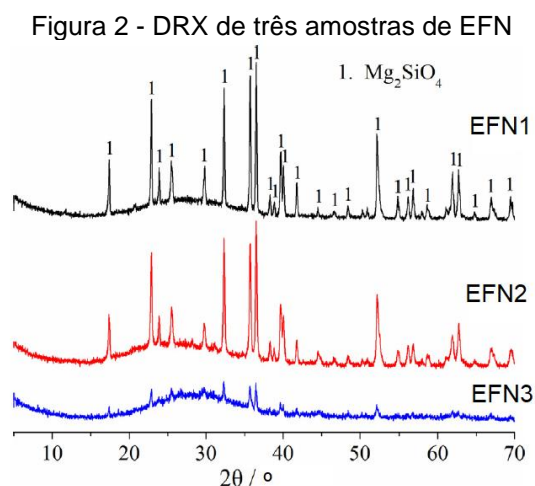
NI - Não informado

Fonte: O autor

Por se tratar de um material relativamente pouco explorado como material cimentício suplementar, em termos de teor de substituição do cimento por EFN, são observados na literatura estudos exploratórios em que o nível de substituição atingiu valores de até 70% de cimento Portland por EFN. Por exemplo, Kim et al.

(2019) utilizaram teores de 30% de EFN com área específica de 4.660 cm²/g, teor também utilizado por Huang et al. (2017). Katsiotis et al. (2015) usaram teores de substituição de 5 a 20%, Rahman et al. (2017) de 20 a 65%, e Chen et al. (2020) de 10 a 70%. Zhou e Shi (2021) utilizaram teores de 15 a 45% para as duas finuras estudadas.

Conforme Huang et al. (2017), o padrão da difração de raios X (DRX) da EFN demonstra sua natureza predominantemente amorfa, com faixas difusas e largas. Entre as fases mineralógicas cristalinas encontradas com mais frequência, destaca-se predominantemente a forsterita (Mg₂SiO₄), como pode ser observado na Figura 2, podendo-se encontrar também espinela, silicato de ferro, e quartzo (KATSIOTIS et al., 2015; HUANG et al., 2017; RAHMAN et al. 2017; KIM et al., 2019; CHEN et al., 2020; ZHOU E SHI, 2021).



Fonte: Huang et al. (2017)

2.3.2. Periculosidade

Katsiotis et al. (2015) identificaram pelo teste TCLP que a lixiviação de metais pesados em argamassas trituradas produzidas com 20% de substituição do cimento por EFN (C20), aos 28 dias, é inferior aos limites regulatórios da US EPA (2009), conforme pode ser observado na Tabela 6. Portanto, os autores concluem que a escória não é perigosa quando utilizada como material

cimentício suplementar, apresentando benefícios para o meio ambiente através da gestão de resíduos.

Tabela 6 - Lixiviação de metais pesados aos 28 dias

Metais de interesse	EFN (mg/L)	C20 (mg/L)	Limites regulatórios EPA TCLP (mg/L)
Cr	0,15	0,22	5,00
Ni	5,83	1,16	SLR
Co	0,62	0,12	SLR
Zn	0,48	0,57	SLR
Pb	0,75	0,21	5,00
As	0,04	0,03	5,00
Cd	NO	NO	1,00

SLR - Sem limites regulatórios disponíveis

NO - Não obtido

Fonte: Katsiotis et al. (2015)

Saha e Sarker (2017) verificaram, para amostras utilizando a EFN como agregado miúdo em substituição de até 100%, que a concentração de metais pesados nos lixiviados é também inferior aos limites da US EPA (2009), sendo considerado não tóxico e não perigoso.

Huang et al. (2017) estudaram o conteúdo de cromo lixiviado em argamassas produzidas com 30% de substituição do cimento com 28 dias. O limite da norma chinesa GB 30760 (2014) para a concentração de íon de cromo lixiviado é de 0,2 mg/L. As amostras utilizadas pelos autores atenderam a este critério, tendo concentração máxima menor do que 0,07 mg/L.

2.3.3. Utilização como agregado miúdo

A exploração de areia natural para uso como agregado miúdo em concretos tem causado a diminuição da disponibilidade deste recurso, bem como problemas ambientais. Esta exploração afeta a fauna e flora locais, bem como emite gases de efeito estufa através da extração e transporte (GAVRILETEA, 2017). A EFN possui propriedades físicas que justificam seu uso como substituto à areia, tendo baixa absorção de água, alta densidade e dureza, bem como melhoria de propriedades mecânicas como resistência à compressão e módulo de elasticidade (SAHA et al., 2018).

Saha et al. (2018) revisaram estudos avaliando o uso da escória de ferro-níquel como agregado no concreto, em termos de propriedades no estado fresco e endurecido. Percebeu-se que o uso de até 50% de EFN em substituição à areia permitiu maior fluidez às argamassas (SAHA E SARKER, 2017b), o que não foi verificado com a substituição total da areia pela escória, justificado pelos autores em função do tamanho e irregularidade superficial dos grãos de EFN comparados com o agregado de referência.

Em termos de resistência à compressão, Togawa et al. (1996), Shoya et al. (1999) e Saha e Sarker (2017a) observaram ganhos de resistência mecânica quando substituída 50% da areia por EFN, em relação à mistura de referência e à mistura com substituição total. Neste caso, Saha e Sarker (2017a) verificaram valores de resistência à compressão 8% maiores em relação à referência, e 49% maiores em relação à substituição total.

Similar resultado foi observado quando avaliado o módulo de elasticidade. Segundo Saha e Sarker (2017a), misturas contendo 50% de substituição de areia por EFN obtiveram os maiores valores de módulo de elasticidade. Uma hipótese que pode explicar esses ganhos em termos de desempenho mecânico é levantada por Saha et al. (2018) em função da densidade e distribuição granulométrica. Segundo os autores, há melhor graduação entre os agregados, reduzindo os vazios do esqueleto granular.

Em termos de durabilidade, Saha e Sarker (2016) verificaram que a EFN é reativa e pode permitir a ocorrência de reação álcali-agregado (RAA), e que o uso de uma pozolana como material cimentício suplementar é efetiva para a mitigação deste efeito.

2.3.4. Utilização como material cimentício suplementar

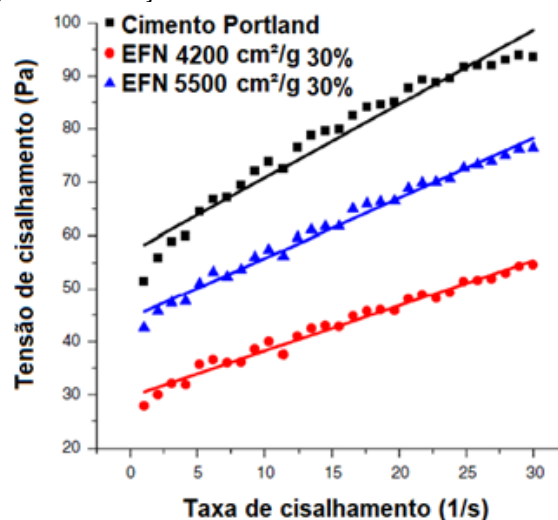
A composição química da escória de ferro-níquel, particularmente a presença de SiO₂ amorfa, possibilitam o estudo de seu uso como material cimentício suplementar (LEMONIS et al., 2015). Em outras palavras, é esperado que ocorram reações químicas com os produtos da hidratação do cimento

Portland para formar novos compostos estáveis que contribuam para tornar mais densa a matriz cimentícia. A seguir, são apresentadas propriedades no estado fresco e no estado endurecido de materiais cimentícios que utilizaram EFN como adição mineral.

2.3.4.1. Propriedades reológicas e trabalhabilidade

Em termos de comportamento reológico, Zhou e Shi (2021) avaliaram pastas contendo 30% de EFN, com substituição em massa e relação água / aglomerante de 0,35, granulada em 4.200 cm²/g e 5.500 cm²/g, com o uso de reômetro rotacional. Os autores utilizaram o modelo de Bingham e observaram que as pastas com incorporação de EFN obtiveram os menores valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica, quando comparadas com a pasta de referência contendo apenas cimento Portland, como pode ser observado na Figura 3, que demonstra a relação entre a tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento das pastas.

Figura 3 - Relação entre tensão e taxa de cisalhamento



Fonte: Zhou e Shi (2021)

O motivo deste aumento de fluidez, segundo os autores, é a redução da fricção das partículas de aglomerante. Zhou e Shi (2021) também explicaram a maior tensão de escoamento e viscosidade plástica na mistura contendo EFN mais fina, quando comparada à mistura contendo EFN mais grossa, devido ao maior contato que ocorre entre as partículas.

Nuruzzaman et al. (2022) estudaram concretos autoadensáveis contendo 30% de substituição do cimento Portland por EFN e por cinza volante. Os autores observaram uma variação marginal nos valores de *slump flow*, em que o concreto contendo EFN obteve 750 mm de espalhamento, enquanto os concretos contendo cinza volante alcançaram 785 mm. Quando avaliado o tempo para escoar pelo funil V, foram reportados tempos de 9 s e 7 s, para os concretos contendo EFN e cinza volante, respectivamente. De acordo com os autores, estes resultados são suficientes para classificar as amostras como concretos autoadensáveis, segundo a EFNARC (2002).

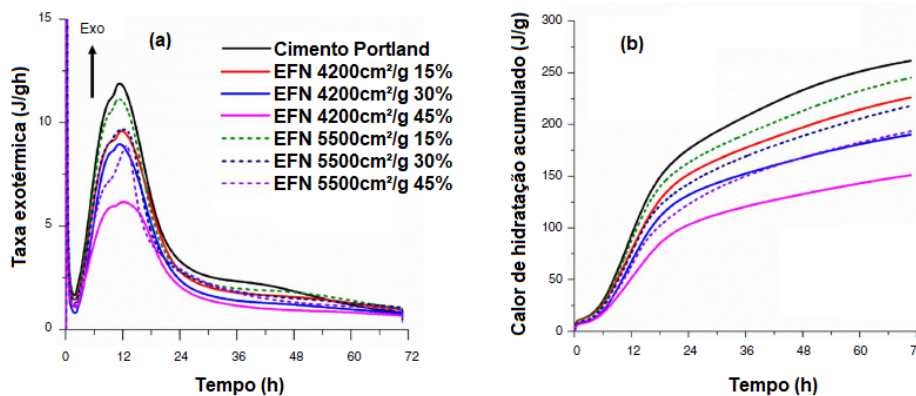
2.3.4.2. Calor de hidratação e tempo de pega

A incorporação de EFN em misturas à base de cimento Portland, em substituição ao cimento, causa uma redução do pico de liberação de calor (após o período de indução), devido à redução dos componentes mais reativos das composições (HUANG et al., 2017; KIM et al., 2019; ZHOU E SHI, 2021), quando a finura da escória está próxima a 4.000 cm²/g. No entanto, Kim et al. (2019) observaram que a temperatura máxima aumenta com um aumento da finura da EFN. Por exemplo, misturas contendo EFN com área superficial de 8.600 cm²/g em substituição de 10% de cimento alcançam temperaturas próximas às misturas contendo apenas cimento Portland comum.

Zhou e Shi (2021) observaram, similarmente, por meio do ensaio de calorimetria isotérmica de condução de pastas a 25°C, que o pico da taxa de liberação de calor diminui conforme o teor de substituição de EFN aumenta, o que pode ser observado na Figura 4a. Também foi observado um maior pico de taxa de liberação de calor de pastas com o aumento da finura da EFN, o que pode estar relacionado a uma maior reatividade.

Zhou e Shi (2021) justificam também que as baixas concentrações de CaO e Al₂O₃ são as possíveis causas da menor atividade inicial e menor calor de hidratação acumulado em maiores teores de incorporação, o que pode ser observado na Figura 4b.

Figura 4 - Taxa exotérmica (a) e calor de hidratação acumulado (b)

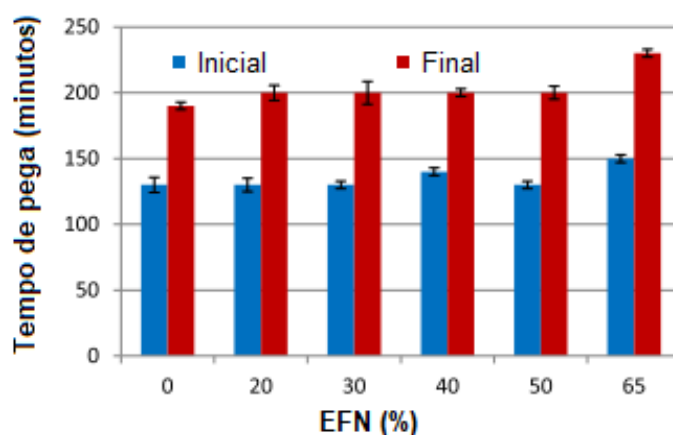


Fonte: Zhou e Shi (2021)

Lemonis et al. (2015) identificaram um retardo no processo de hidratação diretamente proporcional ao teor de substituição de EFN em pastas, aumentando os tempos de início e fim de pega em até 35 minutos, no caso de um teor de 20% de EFN. Kim et al. (2019) também encontraram resultados similares, com aumentos significativos no início e fim de pega de argamassas, principalmente para amostras com menor finura (4.660 cm²/g, 30% de substituição), com incremento de 100 minutos e 140 minutos em relação à referência, respectivamente.

No entanto, Rahman et al. (2017) observaram tempos de pega em pastas similares à referência, em teores de substituição de até 50%, conforme pode ser observado na Figura 5. A partir de 65%, foi observado um aumento de 20% no valor de início de pega e 40% no valor de fim da pega, o que os autores atribuem à diminuição de produtos hidratados provenientes da reação do C₃S e C₃A. Ressalta-se, porém, que esta amostra possui área superficial específica de aproximadamente 5.000 cm²/g, em oposição à EFN utilizada por Lemonis et al. (2015) e Katsiotis et al. (2015), que possui área superficial específica de 3.985 cm²/g.

Figura 5 - Variação de tempo de pega com diferentes teores de EFN



Fonte: Rahman et al. (2017)

A Tabela 7 apresenta os tempos de início e fim de pega de algumas matrizes cimentícias contendo EFN. Nota-se que os tempos de início e fim de pega, por óbvio, são fortemente influenciados pelas propriedades físicas e químicas da escória, não clarificando uma tendência.

Tabela 7 - Tempo de pega de matrizes cimentícias com EFN

Autores	Ano	Matriz	EFN (%)	Tempo de pega (min)	
				Inicial	Final
Katsiotis et al.	2015	Pasta	REF	145	185
			5	150	195
			10	160	200
			15	170	215
			20	175	220
Rahman et al.	2017	Pasta	REF	131	191
			20	131	200
			30	131	200
			40	140	200
			50	130	200
			65	150	230
Kim et al.	2019	Argamassa	REF	392	541
			5	433	557
			10	485	612
			30	493	680
Bouasria et al.	2021	Argamassa	REF	233	320
			10	225	310
			15	213	326
			30	235	334

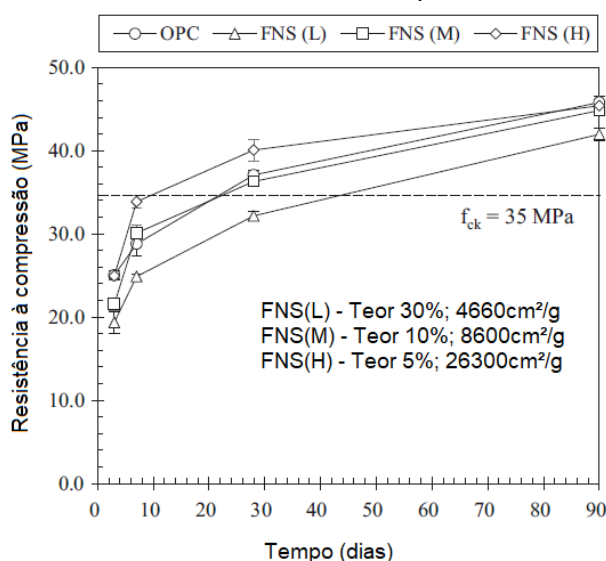
Fonte: O autor

2.3.4.3. Resistência à compressão

Notadamente, um dos parâmetros mais utilizados para especificar misturas à base de cimento é a resistência à compressão. Em alguns casos, inclusive, é empregada, indiretamente, como parâmetro de durabilidade. De modo geral, assim como observado em outras escórias (NEVILLE, 2016), o ganho de resistência à compressão até os 28 dias de idade em composições à base de cimento Portland com incorporação de escória de ferro-níquel (em finuras de até 5.000 cm²/g) é geralmente menor do que os observados em composições contendo apenas cimento Portland comum (KATSIOTIS et al., 2015; HUANG et al., 2017; RAHMAN et al. 2017; KIM et al., 2019).

Lemonis et al. (2015) destacam que há uma contribuição na resistência à compressão das misturas, em idades mais avançadas, em decorrência de uma possível reação pozolânica. Essa reação se deve pela dissolução da sílica amorfa no ambiente alcalino da solução de poros e, conseqüentemente, a formação de gel de C-S-H secundário, em reação com a portlandita, gerando maior densidade microestrutural. Kim et al. (2019) observaram ainda que o desenvolvimento de resistência à compressão em concretos é altamente dependente da finura e teor de substituição, como é possível observar na Figura 6.

Figura 6 - Desenvolvimento de resistência à compressão de concreto com EFN



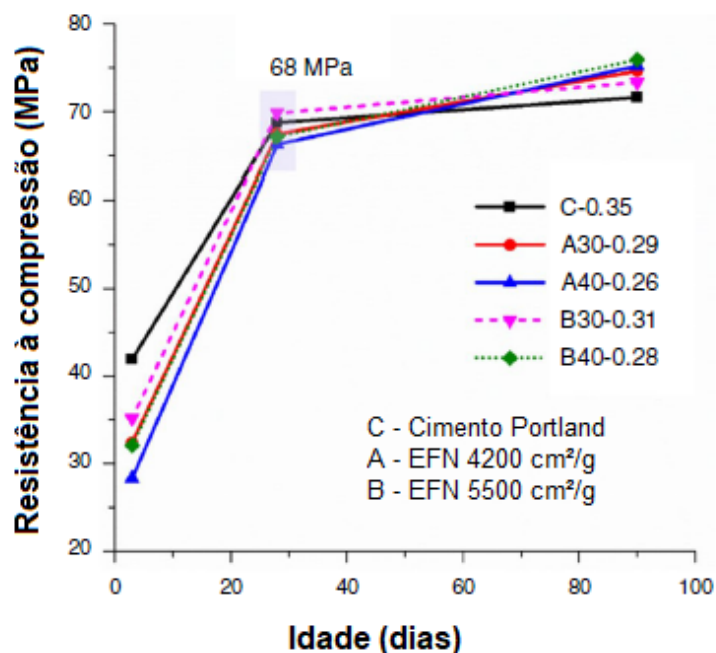
Fonte: Kim et al. (2019)

Chen et al. (2020) encontraram valores maiores de resistência à compressão aos 28 dias em concretos com substituições de 10 a 30% por EFN, em relação à referência, considerando-se, porém, que esta amostra possui composição diversa às demais, conforme mostrado na Tabela 4, com teores de CaO de 32,15%.

Qi et al. (2020), com 20% de substituição do aglomerante por EFN em concreto, e Li et al. (2022), com 30% de substituição em argamassas, alcançaram um acréscimo de 11% na resistência à compressão aos 28 dias.

Zhou e Shi (2021) verificaram que a resistência à compressão de concretos com 90 dias de idade era maior quando incorporado 30% e 40% de EFN em substituição ao cimento, conforme mostrado na Figura 7. Aos 28 dias, somente a composição com 30% de escória, com área superficial de 5.500 cm^2/g , superou a referência, para concretos de alto desempenho.

Figura 7 - Resistência à compressão em diferentes finuras, teores e relação a/ag



Fonte: Zhou e Shi (2021)

3. Abordagem metodológica

Com o intuito de alcançar os objetivos traçados inicialmente, neste capítulo são abordados os materiais e métodos propostos para este trabalho, especificando as variáveis de pesquisa, locais de ensaios, dentre outros pontos relevantes para realização do planejamento experimental proposto.

Os ensaios tecnológicos no estado fresco e endurecido das argamassas e das pastas foram realizados no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). A caracterização dos materiais foi realizada no LEMAC e em laboratórios especializados citados no decorrer do texto.

Em resumo, o principal material utilizado nesta pesquisa foi a escória de ferro-níquel, obtida em Barro Alto, estado de Goiás, fornecida pela empresa Anglo American. Esta foi recebida *in natura*, com grãos com aspecto semelhante a uma areia grossa, sendo necessária a moagem em moinho de bolas para o uso como material cimentício suplementar.

O clínquer foi fornecido pela empresa Mizu, localizada em Vitória, estado do Espírito Santo, bem como a gipsita. Ambos precisaram passar pelo processo de moagem, em moinho de bolas e de argolas, respectivamente. O fíler calcário foi fornecido pela empresa SB mineração, de Cachoeiro do Itapemirim, estado do Espírito Santo, sendo utilizado da forma que foi recebido. Todos os materiais utilizados na composição do cimento foram caracterizados conforme o item 3.2 deste trabalho.

A areia utilizada como agregado miúdo em argamassas é uma areia natural de cava quartzosa, originária de Linhares, estado do Espírito Santo, retratada na Figura 8. Esta foi submetida a secagem e peneiramento para remoção de impurezas. O aditivo superplastificante base policarboxilatos utilizado nas argamassas foi o ADVA, da marca *Grace Construction Products*.

Figura 8 - Areia natural



Fonte: O autor

Destaca-se inicialmente que esta pesquisa está inserida em um convênio institucional desenvolvido pelo grupo de pesquisa no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFES, com um dos objetivos sendo avaliar o desempenho da escória de ferro-níquel como um material cimentício suplementar. Como primeira fase do convênio, foram propostos três temas de dissertação de mestrado. Novelli (2024) fez uma avaliação mecânica e de durabilidade de compósitos cimentícios de alto desempenho contendo EFN como material cimentício suplementar, enquanto Berghe (2024) fez uma análise da incorporação de escória de ferro-níquel para produção de cimentos Portland, ambos defendidos no PPGEC/UFES. Por fim, tem-se o presente trabalho, em que se buscou avaliar os efeitos no estado fresco de pastas e argamassas, bem como na resistência à compressão de argamassas, da incorporação de EFN na matriz cimentícia.

Para tal, inicialmente, foram produzidos dois tipos de cimento Portland. O primeiro (cimento de referência), contendo apenas clínquer e gipsita. O segundo tipo, podendo ser enquadrado como um cimento Portland composto, contendo clínquer, gipsita, e diferentes teores de EFN, similares em concepção aos empregados por Berghe (2024), com diferenças nas composições das amostras.

Para atingir a reatividade desejada, todos os materiais passaram por um beneficiamento mecânico. Tanto o clínquer Portland, como a EFN, foram moídos em moinho de bolas até alcançarem uma finura *Blaine* de 4.280 cm²/g e de 5.900 cm²/g, respectivamente. Foi produzido também um segundo lote de EFN moída com finura *Blaine* de 9.300 cm²/g, para avaliar o efeito do aumento da área superficial da EFN nas composições estudadas. O moinho de bolas empregado

na pesquisa é mostrado na Figura 9. A metodologia de moagem, com relação a massa de material, carga abrasiva, tempo de moagem e homogeneização dos lotes, seguiu a proposta por Novelli (2024). Por fim, a gipsita também passou por um processo de moagem até atingir finura *Blaine* similar à do clínquer, entretanto, em moinho de argolas. O filer calcário utilizado já estava na granulometria desejada.

Figura 9 – Moinho de bolas



Fonte: O autor

Para todas as composições estudadas, seja argamassa ou pasta, foi utilizada a mesma proporção entre clínquer moído e gipsita, em massa, na ordem de 94,5% clínquer e 5,5% gipsita. Este teor de gipsita foi obtido por meio de um estudo preliminar, em pasta, em que foi analisado o perfil de liberação de calor em condição isotérmica, para diferentes teores de incorporação de gipsita. Os detalhes da metodologia empregada para otimização de sulfatos foram publicados por Berghe (2024), sendo que os mesmos materiais foram empregados em ambas as pesquisas.

Com relação à proporção entre os materiais usados na produção de argamassas, foi adotada uma composição já empregada em outros trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa, em que foram avaliados os efeitos de diferentes materiais cimentícios suplementares no comportamento no estado fresco e endurecido dessas misturas (DE MATOS et al., 2020). Considerou-se adicionalmente uma amostra de referência contendo apenas clínquer e gipsita no aglomerante, bem como uma amostra com EFN de maior finura. Com relação ao aditivo superplastificante utilizado nas argamassas, o teor foi ajustado para a

argamassa de referência e, então, fixado o percentual, em relação à massa de aglomerante, para as demais argamassas estudadas.

Resumidamente, o programa experimental consistiu na produção de uma composição de referência (sem EFN), seja pasta ou argamassa, e outras contendo 10%, 20% e 30% de substituição em massa do cimento de referência por EFN com finura de 5.900 cm²/g. Foram também estudadas mais duas composições contendo 20% de substituição. A primeira, contendo fíler calcário (FC), em substituição ao cimento de referência (sem EFN), de forma a avaliar o efeito físico da escória na matriz cimentícia, quando comparado com um material inerte. A segunda, uma composição contendo 20% de EFN mais fina (“ultrafina”), com *Blaine* de 9.300 cm²/g, com o objetivo de avaliar o efeito do aumento da área superficial nas propriedades das composições. A nomenclatura utilizada nas composições das pastas e/ou argamassas estão descritas na Tabela 8.

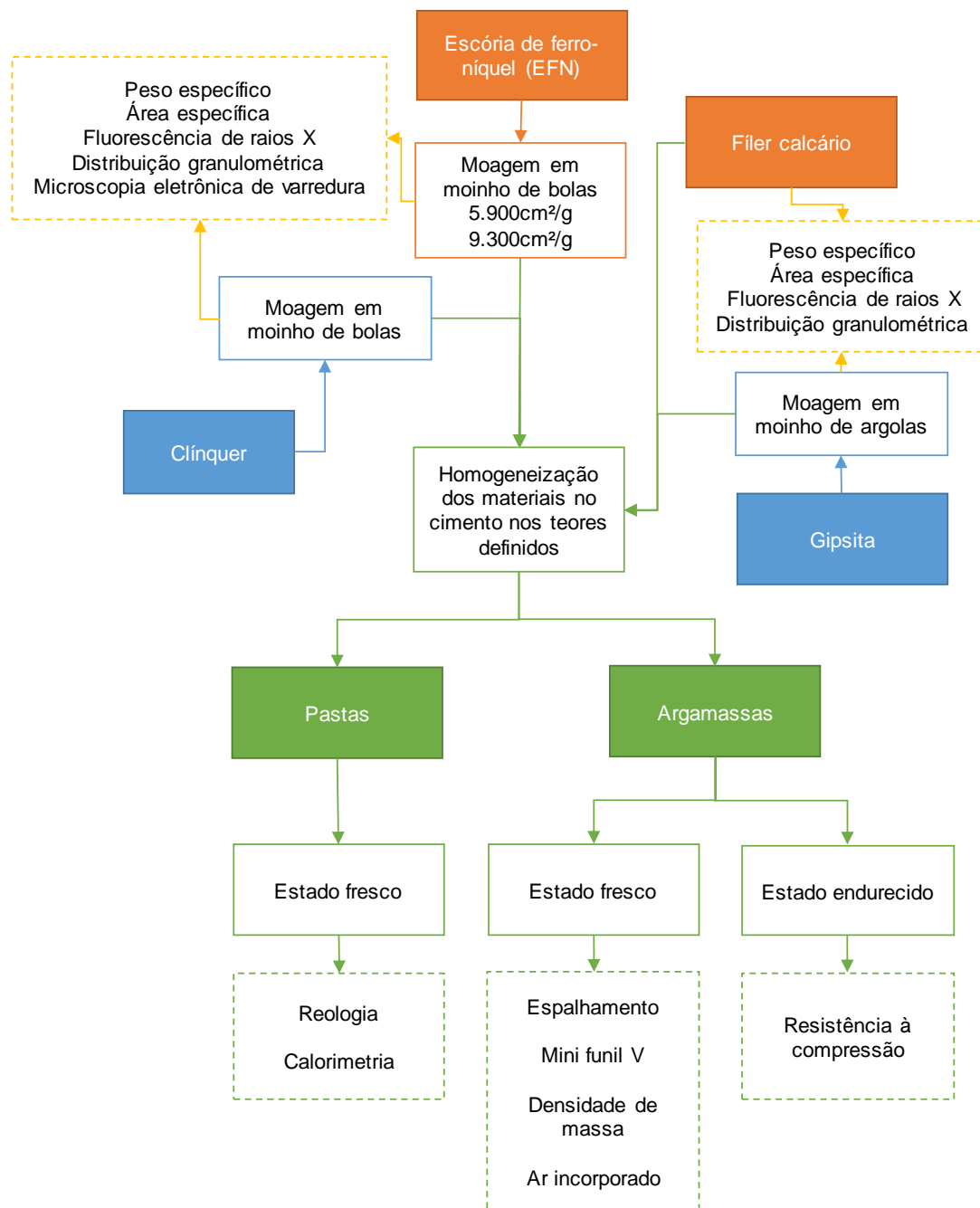
Tabela 8 - Nomenclatura relativa ao material incorporado

Nomenclatura	Incorporação
REF	Somente clínquer e gipsita
E10	10% de EFN com 5.900 cm ² /g
E20	20% de EFN 5.900 cm ² /g
E30	30% de EFN com 5.900 cm ² /g
F20	20% de FC com 5.700 cm ² /g
EFI20	20% de EFN com 9.300 cm ² /g

Fonte: O autor

Ao total, foram produzidas 6 composições distintas, para argamassas e pastas. A relação água/aglomerante foi de 0,39 para argamassas e de 0,35 para pastas. O fluxograma descrevendo o programa experimental está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma metodológico



Fonte: O autor

3.1. Planejamento experimental

A partir da estrutura do trabalho, foram definidas variáveis independentes, fatores constantes e variáveis de resposta, relacionadas à execução dos ensaios e seus resultados.

As variáveis independentes (Tabela 9) são estabelecidas para identificar a relação da variação de determinados fatores com os fatores constantes e resultados dos ensaios.

Tabela 9 - Variáveis independentes

Fatores controláveis	Nº níveis	Níveis
Finura da EFN	2	>5.000 cm ² /g e >9.000 cm ² /g
Idade da amostra	2	10 e 60 min
Teor de substituição por material e finura	6	0; 10% E ¹ ; 20% E; 30% E; 20% F ² ; 20% EFI ³

¹ E - Escória de ferro-níquel com >5.000 cm²/g

² F - Fíler calcário

³ EFI - Escória de ferro-níquel com >9.000 cm²/g

Fonte: O autor

Os fatores constantes que influenciam nas variáveis independentes incluem moagem do clínquer, teor de gipsita e idade do corpo de prova.

As variáveis de resposta (Tabela 10) são obtidas de acordo com os resultados dos ensaios, e dependem da variação dos fatores controláveis (independentes). Neste estudo, foram divididas de acordo com o tipo de material, pasta ou argamassa, bem como a partir da sua realização no estado fresco, caso da maioria dos ensaios, ou endurecido, no caso do ensaio de resistência à compressão.

Os ensaios que foram realizados nas amostras de cada teor estabelecido em função do tipo de adição (escória ou fíler) e finura (escória), as idades nas quais eles foram executados, a quantidade de amostras por nível (repetições), bem como o número total de amostras por ensaio e o total geral de amostras estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 10 - Variáveis de resposta

Produto		Variáveis de resposta
		Fluorescência de raios X (FRX)
		Distribuição granulométrica
		Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
Pastas	Estado fresco	Propriedades reológicas
		Perfil de calorimetria
		Espalhamento
		Tempo de escoamento
Argamassas	Estado fresco	Densidade de massa
		Ar incorporado
Estado endurecido		Resistência à compressão

Fonte: O autor

Tabela 11 - Ensaios em pastas e argamassas

Teor / Finura	Material	Estado	Ensaio	Idade da amostra	Amostras por nível	Amostras totais
P-REF P-E10 P-E20 P-E30 P-F20 P-EFI20	Pasta	Fresco	Reologia (ASTM C1749, 2017)	10 min 60 min	1	12
Calorimetria			-	1	6	
A-REF A-E10 A-E20 A-E30 A-F20 A-EFI20	Argamassa	Fresco	Espalhamento (EFNARC, 2002)	10 min 60 min	1	12
			Tempo de escoamento (EFNARC, 2002)	10 min 60 min	1	12
			Densidade de massa (NBR 13278, 2005)	-	1	6
			Ar incorporado (NBR 13278, 2005)	-	1	6
		Endurecido	Resistência à compressão (NBR 7215, 2019)	28 dias	6	36
					TOTAL	90

Fonte: O autor

3.2. Caracterização dos materiais

Foram realizados os ensaios de peso específico e área específica por ensaio *Blaine* do fíler, do clínquer, da gipsita e da escória de ferro níquel com moagem normal, mais próxima ao clínquer, e moagem “ultrafina”, no LEMAC da UFES.

Os demais procedimentos de caracterização físico-química, mineralógica e microestrutural foram realizados nos materiais componentes das misturas a partir dos ensaios de fluorescência de raios X (FRX), distribuição granulométrica e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A fluorescência de raios X (FRX) consiste em incidir raios X sobre uma amostra para determinar a composição química da mesma, sendo este ensaio realizado pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. O espectrômetro de FRX é da marca Malvern Panalytical, modelo Zetium.

O ensaio de granulometria a laser permite a obtenção de informações sobre o tamanho das partículas, resultando na geração de curvas granulométricas. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (Nanotec-Lab) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com o granulômetro a laser Microtrac, modelo S3500.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) produz imagens em alta resolução das amostras, através do direcionamento de um feixe de elétrons (GOLDSTEIN et al., 2003), permitindo obter informações sobre a morfologia, estrutura e composição destes materiais. Este ensaio foi realizado em amostras de clínquer e gipsita, sendo realizados no Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins (LUCCAR) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). O equipamento utilizado é da fabricante JEOL, modelo JSM6610LV.

3.3. Estudos em pastas

Os estudos de reologia foram realizados em pastas devido à relação entre esta propriedade com as partículas finas dos aglomerantes, podendo-se obter uma avaliação mais adequada da influência da escória de ferro-níquel. Similarmente, os estudos de calorimetria de condução isotérmica também foram realizados em pastas cimentícias.

3.3.1. Composição e procedimento das misturas

Todas as pastas estudadas foram dosadas para uma relação água / aglomerante (a/ag) de 0,35 em massa. Esse valor, embora arbitrário, foi obtido por um estudo preliminar em que se constatou que o valor de 0,35 era o limite de água a ser adicionada nas composições sem que houvesse exsudação estática.

As composições partiram de um cimento de referência, o qual continha 94,5% de clínquer moído e 5,5% de gipsita moída, em massa, com o qual produziu-se a pasta de referência. Na sequência, as pastas foram produzidas substituindo uma fração do cimento de referência (clínquer com gipsita), em massa, por EFN em diferentes teores e finuras. Por fim, uma composição contendo fíler calcário também foi produzida. A nomenclatura das pastas adotada no texto foi definida a partir dos materiais empregados, da finura, e do teor de substituição, conforme mostrado na Figura 11. A proporção entre os materiais das pastas estudadas é mostrada na Tabela 12.

Figura 11 – Nomenclatura das pastas

<p>P-REF</p> <ul style="list-style-type: none"> •Pasta •Sem substituição 	<p>P-E10</p> <ul style="list-style-type: none"> •Pasta •EFN 5.900 cm²/g •10% EFN 	<p>P-E20</p> <ul style="list-style-type: none"> •Pasta •EFN 5.900 cm²/g •20% EFN
<p>P-E30</p> <ul style="list-style-type: none"> •Pasta •EFN 5.900 cm²/g •30% EFN 	<p>P-F20</p> <ul style="list-style-type: none"> •Pasta •20% FC 	<p>P-EFI20</p> <ul style="list-style-type: none"> •Pasta •EFN 9.300 cm²/g •20% EFN

Fonte: O autor

Tabela 12 – Proporção unitária, em massa, entre os materiais constituintes das pastas

Amostra	Aglomerante	FC	EFN 5.900 cm ² /g	EFN 9.300 cm ² /g	Água	Gipsita (5,5%)	Clínquer
P-REF	1,000	-	-	-	0,350	0,055	0,945
P-E10	1,000	-	0,095	-	0,350	0,055	0,851
P-E20	1,000	-	0,189	-	0,350	0,055	0,756
P-E30	1,000	-	0,284	-	0,350	0,055	0,662
P-F20	1,000	0,189	-	-	0,350	0,055	0,756
P-EFI20	1,000	-	-	0,189	0,350	0,055	0,756

Fonte: O autor

A preparação da pasta foi feita com base na ASTM C1738 (2018), simulando o cisalhamento no interior do concreto em um misturador de alta energia. Segue-se o procedimento, adaptado de Pilar (2017):

- Adicionar água aos materiais secos e misturar manualmente por 1 min e 30 s;
- Ligar o misturador por 30 s;
- Raspar o fundo e as laterais do misturador por 1 min;
- Aciona o misturador por mais 1 min, totalizando até esta fase 4 min desde a adição de água.
- Por fim, para preparação dos procedimentos do ensaio reológico, preencher o copo e fixar a geometria no reômetro e deixar o ensaio em *stand by* até totalizar 10 min, após a adição de água na pasta;
- Para segunda leitura do ensaio reológico, 60 min, foi realizada uma mistura manual por 60 s no próprio copo do misturador e, na sequência, preencheu-se o copo do reômetro, fixou-se a geometria e respeitados os mesmos intervalos de tempo de repouso da primeira leitura (10 min), antes de iniciar o ensaio.

3.3.2. Ensaios reológicos

Os ensaios reológicos e parâmetros de tensão e viscosidade foram realizados com base na norma ASTM C1749 (2017), no Laboratório de Reologia (LabReo), do Centro Tecnológico da UFES. Foi utilizado reômetro rotacional (Figura 12), Haake Mars III, fabricado pela Thermo Scientific, configurado com geometria *vane* de quatro lâminas, com 16 mm de diâmetro e 22 mm de altura, de forma a evitar deslizamento na parede. O copo utilizado foi o de 27,22 mm de diâmetro e foi preenchido com 25 mL de pasta. A temperatura do copo foi mantida em $23 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$, ajustado pelo Peltier. Os intervalos de leitura foram definidos em 10 min e 60 min, contado a partir da adição de água na mistura. A rotina do reômetro foi configurada da seguinte forma, adaptado com base em Pilar (2017) e de Matos et al. (2021):

- Pré cisalhamento na taxa de 100 s^{-1} durante 60 s;

- Período de repouso de 30 s;
- Cisalhamento constante em 0,01 s⁻¹ por 60 s;
- Curva de aceleração e desaceleração, ampliando e posteriormente reduzindo o cisalhamento entre 0,1 a 100 s⁻¹ em doze patamares de 20 s, em escala logarítmica.

Os valores obtidos na etapa de cisalhamento constante foram dispostos em gráfico, obtendo-se a tensão de escoamento estática a partir do seu valor de pico. Os dados da curva de fluxo descendente foram ajustados pelo modelo de Herschel-Bulkley (1), obtendo-se também a viscosidade aparente μ_{app} (2), conforme as respectivas equações:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

$$\mu_{app} = \frac{3K}{n+2} * \dot{\gamma}_{max}^{n-1} \quad (2)$$

Em que τ , τ_0 , μ_{app} , $\dot{\gamma}$, K e n são, respectivamente, tensão de cisalhamento (Pa), tensão de escoamento (Pa), viscosidade aparente (Pa.s), taxa de cisalhamento (s⁻¹), índice de consistência e índice de pseudoplasticidade.

Figura 12 - Reômetro rotacional Haake Mars III, com geometria vane



Fonte: O autor

3.3.3. Ensaio de calorimetria de condução

Os perfis de liberação de calor das pastas foram avaliados por meio do ensaio de calorimetria de condução isotérmica, no calorímetro TAM Air de 8 canais, fabricado pela TA Instruments, localizado no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LabGeo) da UFES. O perfil de fluxo de calor foi monitorado em 72 h de hidratação, assim como o calor total acumulado. Foi utilizada uma amostra de 6 g, aproximadamente, de pastas, sob temperatura constante de 23°C. processo de mistura para produção das pastas e, então, retirada das amostras, respeitou o mesmo procedimento definido no item 3.3.1.

Foram obtidas curvas de calor em função do tempo relativas ao fluxo de calor e calor total liberado, por unidade de massa de aglomerante. Através destas curvas, foram obtidos a duração do período de indução e o calor total liberado em determinado momento do ensaio (MOSTAFA; BROWN, 2005), bem como a taxa máxima de liberação de calor após o período de indução.

O período de indução é o intervalo no qual não ocorrem reações significativas, após o primeiro pico imediato após a molhagem dos grãos de cimento e solubilização inicial do cimento, e antes do período de aceleração na taxa de liberação de calor. Seu início é obtido graficamente no encontro entre a reta extrapolada da desaceleração inicial e o trecho horizontal da indução, e seu fim, na extrapolação da reta de regressão da aceleração e o trecho horizontal, conforme proposto por Betioli et al (2009). Neste trabalho, a referência utilizada foi o fim do período de indução, obtido graficamente conforme exposto. A taxa máxima de liberação de calor se dá por meio da leitura direta nos dados, no segundo pico, ou seja, após o período de indução.

3.4. Estudos em argamassas

Foram realizados ensaios em argamassas, no estado fresco e endurecido, de forma a avaliar questões de trabalhabilidade e resistência mecânica. Todos os ensaios em argamassas foram realizados no LEMAC da UFES. Foram realizados os ensaios de espalhamento, de mini funil V (medida

indireta da viscosidade pelo tempo de escoamento), de densidade de massa e ar incorporado, bem como de resistência à compressão.

3.4.1. Composição e procedimento das misturas

A nomenclatura foi também definida a partir dos materiais, da finura, e do teor de substituição, seguindo o padrão da Figura 13.

Figura 13 – Nomenclatura das argamassas

<p>A-REF</p> <ul style="list-style-type: none"> •Argamassa •Sem substituição 	<p>A-E10</p> <ul style="list-style-type: none"> •Argamassa •EFN 5.900 cm²/g •10% EFN 	<p>A-E20</p> <ul style="list-style-type: none"> •Argamassa •EFN 5.900 cm²/g •20% EFN
<p>A-E30</p> <ul style="list-style-type: none"> •Argamassa •EFN 5.900 cm²/g •30% EFN 	<p>A-F20</p> <ul style="list-style-type: none"> •Argamassa •20% FC 	<p>A-EFI20</p> <ul style="list-style-type: none"> •Argamassa •EFN 9.300 cm²/g •20% EFN

Fonte: O autor

A proporção das argamassas autoadensáveis, em massa, foi de 1:1,5:0,39, com substituição da EFN e FC, também em massa, conforme mostrado na Tabela 13. O teor de aditivo superplastificante foi obtido de acordo com o ensaio de espalhamento, em que foi aceita uma abertura entre 24 e 26 cm, conforme prescrito pela EFNARC (2002) como adequado para argamassas que compõem os concretos autoadensáveis. A partir da amostra de referência (A-REF) o teor de aditivo foi, então, fixado para as demais amostras.

Tabela 13 – Proporção unitária, em massa, entre os materiais constituintes das argamassas

Amostra	Aglomerante	FC	EFN 5.900 cm ² /g	EFN 9.300 cm ² /g	Areia	Água	Gipsita (5,5%)	Clínquer	Aditivo (0,34%)
A-REF	1,000	-	-	-	1,500	0,390	0,055	0,945	0,0034
A-E10	1,000	-	0,095	-	1,500	0,390	0,055	0,851	0,0034
A-E20	1,000	-	0,189	-	1,500	0,390	0,055	0,756	0,0034
A-E30	1,000	-	0,284	-	1,500	0,390	0,055	0,662	0,0034
A-F20	1,000	0,189	-	-	1,500	0,390	0,055	0,756	0,0034
A-EFI20	1,000	-	-	0,189	1,500	0,390	0,055	0,756	0,0034

Fonte: O autor

Os procedimentos de mistura e ensaios no estado fresco foram realizados em sala climatizada a 23°C e umidade relativa do ar próxima a 60%. Os materiais

foram pesados no dia anterior e mantidos na temperatura definida. Foram necessários os seguintes aparelhos: balança com resolução de 0,1 g; misturador mecânico; proveta; cronômetro com resolução de 0,01 s; e espátula. O misturador, uma argamassadeira, está ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Argamassadeira



Fonte: O autor

A preparação da argamassa foi realizada com base na NBR 16541 (2016), com adaptações. Foram preparados aproximadamente 2 L de cada mistura. Foram pesados o material seco e a água, de acordo com a composição estabelecida, bem como o aditivo superplastificante. O processo, então, se deu da seguinte forma:

- Homogeneizar o clínquer, a gipsita e as adições, quando presentes, por 30 s na argamassadeira em velocidade baixa;
- Adicionar água por 30 s na argamassadeira em velocidade baixa;
- Adicionar aditivo superplastificante por 30 s na argamassadeira em velocidade baixa;
- Adicionar areia por 60 s na argamassadeira em velocidade baixa;
- Misturar por 60 s na argamassadeira em velocidade alta;
- Descansar a mistura por 6 min com a argamassadeira desligada;
- Misturar por 30 s na velocidade alta.

A duração de todo o processo inicial de mistura foi de 10 minutos. Logo antes da realização dos ensaios no estado fresco aos 60 minutos, a amostra foi novamente misturada na argamassadeira por 30s em velocidade baixa.

3.4.2. Ensaios tecnológicos no estado fresco

Foram procedidos os ensaios de espalhamento e mini funil V (EFNARC, 2002), densidade de massa e ar incorporado (ABNT NBR 13278, 2005). O ensaio de espalhamento foi realizado logo após a mistura, com os demais procedimentos em sequência.

3.4.2.1. Ensaio de espalhamento

Foi realizado o ensaio de espalhamento (mini *slump flow*), de acordo com a EFNARC (2002). Foi preenchido um cone com argamassa até o topo, retirando-se o cone em sequência e verificando o adensamento sobre a mesa de abatimento. Obtém-se depois como resultado a média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro de abertura das placas. A medição foi realizada em argamassas com 10 e 60 minutos de idade, após adicionado água na mistura. O cone utilizado neste ensaio e a mesa para medição do espalhamento estão ilustrados na Figura 15.

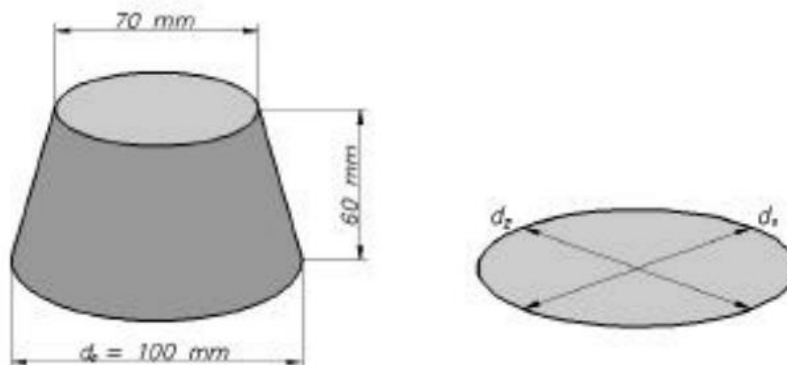
Figura 15 - Cone e mesa de espalhamento



Fonte: O autor

A Figura 16 esquematiza as dimensões do cone utilizado no ensaio e a forma de determinação do espalhamento.

Figura 16 – Esquema do ensaio de espalhamento



Fonte: EFNARC (2002)

3.4.2.2. Ensaio de mini funil V

O tempo de escoamento, como forma de determinação indireta da viscosidade, foi determinado pelo mini funil V (Figura 17), também com base na EFNARC (2002). Este foi limpo e umedecido para que não houvesse absorção, e então o funil foi preenchido uniformemente com argamassa. A comporta então foi aberta e o tempo de escoamento foi cronometrado. Similarmente, a medição foi realizada em argamassas com 10 e 60 minutos, contados a partir da adição de água na mistura.

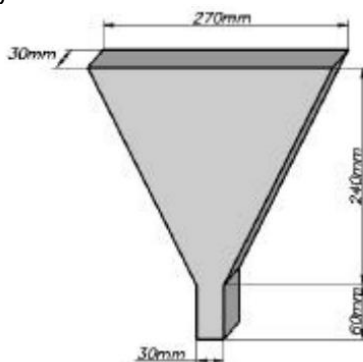
Figura 17 - Mini Funil V



Fonte: O autor

As dimensões do funil estão ilustradas na Figura 18.

Figura 18 – Dimensões do Mini Funil V



Fonte: EFNARC (2002)

3.4.2.3. Densidade de massa e ar incorporado

O ensaio para determinação da densidade de massa e ar incorporado foi realizado conforme a NBR 13278 (2005). Os aparelhos utilizados foram: balança com resolução de 0,1 g; recipiente rígido cilíndrico com 400 cm³ e dimensões de 85 mm de altura e 80 mm de diâmetro; espátula com 15 cm de comprimento e 2 cm de largura; placa de vidro quadrada transparente com 10 cm de lado e 3 mm de espessura; e demais utensílios de laboratório.

Após a determinação do volume e massa do recipiente, ilustrado na Figura 19, bem como da massa da placa, a argamassa preparada foi inserida suavemente no recipiente, formando 3 camadas de altura similar. Após a expulsão dos vazios entre argamassa e recipiente, que deve estar limpo e seco externamente, este foi pesado e a massa do molde com a argamassa (mc) foi registrada.

Figura 19 – Recipiente para ensaio de densidade de massa e balança



Fonte: O autor

A densidade de massa foi calculada com base na NBR 13278 (2005), em kg/m^3 :

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} * 1000 \quad (3)$$

Em que m_c , m_v e V_r são, respectivamente, a massa do recipiente contendo a argamassa (g), a massa do recipiente vazio (g), e o volume do recipiente (cm^3).

O teor de ar incorporado foi calculado também com base na NBR 13278 (2005), em porcentagem, arredondando-se ao número inteiro:

$$A = 100 * \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (4)$$

Em que d e d_t são, respectivamente, a densidade de massa da argamassa e a densidade de massa teórica da argamassa, ambas em g/cm^3 .

A densidade teórica de argamassas dosadas e preparadas em obra é calculada da seguinte forma:

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \left(\frac{m_i}{\gamma_i}\right)} \quad (5)$$

Em que m_i e γ_i são, respectivamente, a massa seca de cada componente da argamassa e de água, em gramas, e a massa específica de cada componente da argamassa.

3.4.3. Resistência à compressão das argamassas

De forma a verificar a resistência à compressão das argamassas, foram realizados ensaios baseados na NBR 7215 (2019), em corpos de prova cilíndricos, com as composições indicadas no texto.

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos para cada amostra, com dimensões de 5 x 10 centímetros, após a preparação da argamassa. Foram desmoldados 24h após a moldagem, e submetidos ao processo de cura úmida até o rompimento. Foram rompidos com idade de 28 dias. Foram excluídos os dois corpos de prova com menor resistência, sendo efetivamente utilizados 4 corpos de prova.

A resistência de cada corpo de prova foi calculada da seguinte forma:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (6)$$

Onde f_c é a resistência à compressão (MPa), F é a carga máxima aplicada (N), e A é a área da seção do dispositivo de carga (mm²).

A resistência à compressão média foi calculada pela média das resistências individuais dos 4 corpos de prova supracitados.

4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados no estado fresco e endurecido em pastas e argamassas, divididos em subitens conforme o tipo de produto e ensaio, bem como a caracterização dos materiais e estudos preliminares. A nomenclatura utilizada é a mesma constante das Figuras 10 e 12. Após a apresentação dos resultados em gráficos, textos e tabelas, foi produzida uma discussão sobre os mesmos nos itens subsequentes, intencionado explicar os fenômenos observados junto à literatura.

4.1. Caracterização

De forma a caracterizar os materiais, foram procedidos os ensaios de granulometria, fluorescência de raios X e microscopia eletrônica de varredura, conforme metodologia.

Preliminarmente, foram estudados o peso específico e a área específica por ensaio *Blaine* do fíler, do clínquer, da gipsita e da escória de ferro níquel com moagem normal, mais próxima ao clínquer (E) e moagem mais “fina” (EFI), conforme Tabela 14. Ambos os ensaios foram realizados no LEMAC da UFES.

Tabela 14 - Peso específico e área específica dos materiais

Ensaio	Escória moída (E)	Escória moída “ultrafina” (EFI)	Fíler Calcário	Gipsita	Clínquer
<i>Blaine</i> (cm ² /g)	5.934	9.335	5.719	3.812	4.280
Peso Específico (g/cm ³)	3,08	3,08	2,82	2,31	3,12

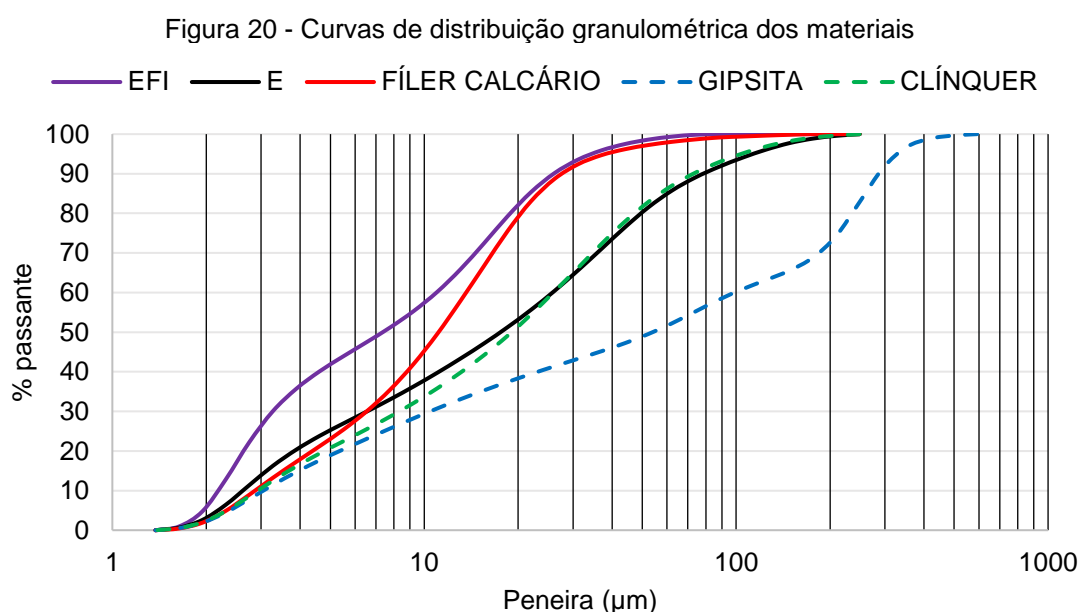
Fonte: O autor

Para efeitos de arredondamento, os valores de *Blaine* da EFN com moagem mais próxima ao clínquer e ao fíler (E) e da EFN com moagem mais fina (EFI) têm sido apresentados neste trabalho como 5.900 cm²/g e 9.300 cm²/g, respectivamente, assim como o Fíler Calcário tem sido apresentado como 5.700 cm²/g. Foram necessárias 6h de moagem no moinho de bolas para a escória apresentar 5.900 cm²/g de *Blaine*, e um adicional de 8 h, totalizando 14 h, para

resultar em uma finura de 9.300 cm²/g. Para o clínquer, foram necessárias 2h30 min de moagem para o resultado apresentado.

4.1.1. Granulometria

As curvas de distribuição granulométrica do clínquer, EFN (E = 5.900 cm²/g e EFI = 9.300 cm²/g), filer calcário e gipsita são apresentadas na Figura 20, através do ensaio de granulometria a laser. Foram analisadas três amostras de cada material, sendo realizada a média para elaboração dos gráficos.



Fonte: Nanotec-Lab UFSC

O d_{50} refere-se à retenção de 50% das partículas em uma peneira de malha com o valor do próprio d_{50} . De maneira similar, determina-se o d_{10} e o d_{90} . Estes valores se encontram na Tabela 15. Destaca-se que a escória com área superficial de 5.900cm²/g tem uma distribuição granulométrica com perfil próximo ao clínquer, porém distinta do filer calcário, apesar da área específica semelhante.

	Tabela 15 - d_{10} , d_{50} e d_{90}				
	EFI	E	Filer calcário	Gipsita	Clínquer
d_{10} (µm)	2,189	2,623	2,87	3,05	2,927
d_{50} (µm)	7,38	17,73	11,12	54,21	19,08
d_{90} (µm)	26,01	78,7	27,65	286,17	72,9

Fonte: O autor

4.1.2. Fluorescência de raios X

A composição química dos principais materiais utilizados neste trabalho está disposta na Tabela 16, assim determinada a partir do ensaio de fluorescência de raios X. Este ensaio foi realizado pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

Tabela 16 - Composição química dos materiais

Material (%)	EFN	Fíler calcário	Gipsita	Clínquer
SiO ₂	43,80	3,31	0,90	20,9
Al ₂ O ₃	4,30	<0,10	0,30	5,07
Fe ₂ O ₃	20,20	<0,10	0,23	3,67
CaO	0,76	45,00	36,80	65,2
MgO	28,80	9,03	0,71	1,78
F	nd	-	nd	-
Na ₂ O	0,04	<0,10	nd	0,27
P ₂ O ₅	<0,01	<0,10	<0,01	0,12
SO ₃	0,07	-	52,50	0,77
Cl	nd	-	0,02	-
K ₂ O	0,04	<0,10	0,06	0,48
TiO ₂	0,10	<0,10	nd	0,26
V ₂ O ₅	0,03	-	nd	-
Cr ₂ O ₃	1,39	-	nd	-
MnO	0,37	<0,10	0,04	0,06
NiO	0,10	-	nd	-
CuO	nd	-	<0,01	-
ZnO	0,03	-	<0,01	-
As ₂ O ₃	nd	-	nd	-
Br	nd	-	nd	-
Rb ₂ O	nd	-	nd	-
SrO	<0,01	<0,10	0,18	0,19
Y ₂ O ₃	nd	-	nd	-
ZrO ₂	nd	-	nd	-
BaO	0,02	-	nd	-
PbO	nd	-	nd	-
PF	gf	42,1	8,31	0,67

gf: ganho ao fogo

0,01%: limite de quantificação FRX (EFN e Gipsita)

nd: não detectado

- : não estudado

Fonte: Laboratório de Caracterização Tecnológica POLI-USP (2023)

Os valores foram normalizados a 100%, e a Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1.020°C por 2h. A EFN e a gipsita apresentaram teores determinados em amostra prensada, e o fíler calcário e o clínquer, em amostra fundida com tetraborato de lítio.

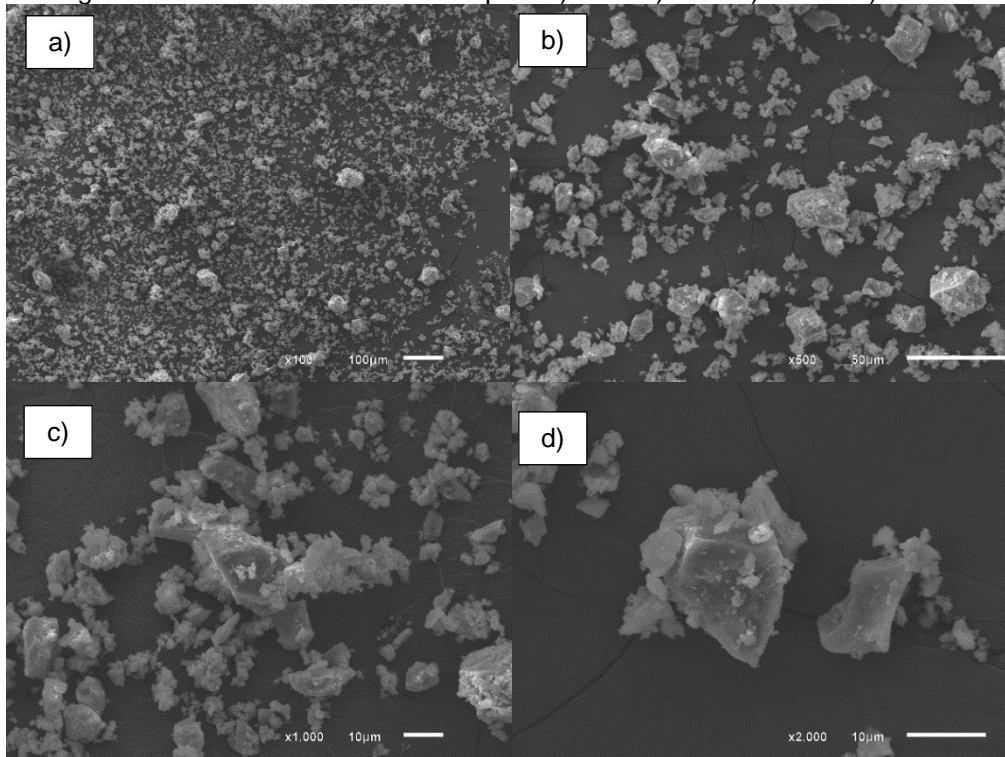
Foi possível observar que a EFN utilizada neste trabalho possui composição semelhante às escórias de ferro níquel estudadas por outros autores, conforme a Tabela 4 (capítulo 2) - de forma particular, se assemelha à amostra de Zhou e Shi (2021) em termos de óxidos componentes. Contém alta quantidade de SiO₂, superior a 40%, e teores elevados de MgO (28,80%) e Fe₂O₃ (20,20%).

4.1.3. Microscopia eletrônica de varredura

Foram procedidos os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras de clínquer e de escória de ferro níquel (EFN). A Figura 21 apresenta as imagens produzidas a partir da amostra de clínquer, enquanto a Figura 22 ilustra o ensaio MEV da EFN.

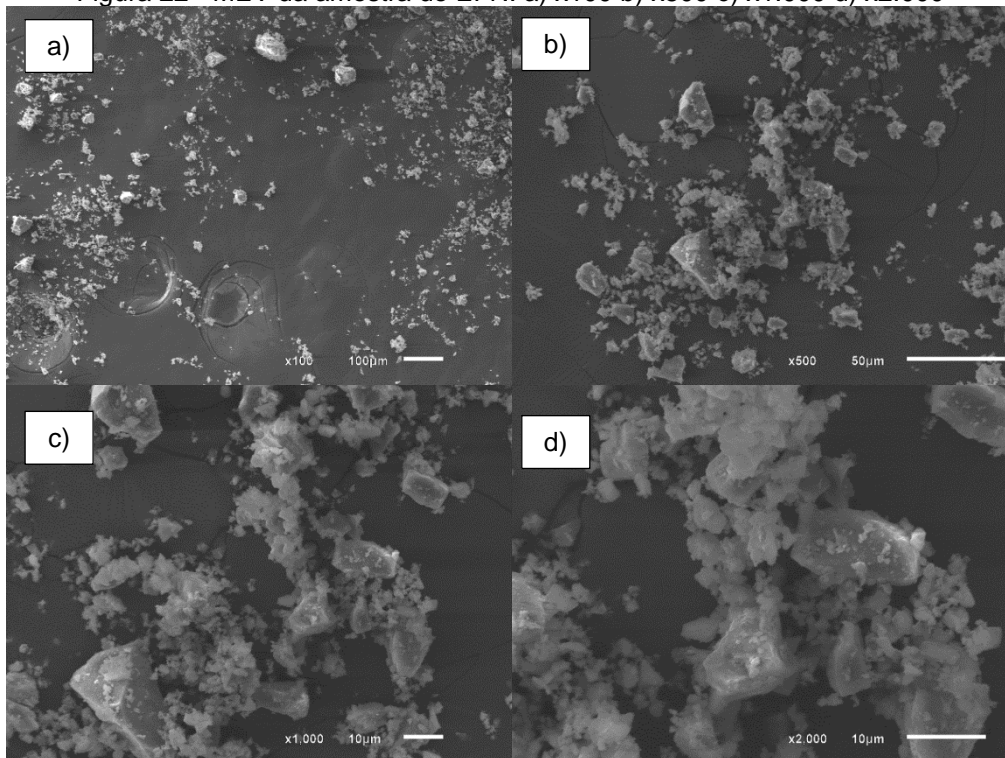
É possível observar que as partículas de EFN possuem um formato angular pronunciado, o que é evidenciado na Figura 22d, e é consistente com as observações de Chen et al. (2020). Os autores, que produziram concretos com substituição parcial de cimento Portland comum por EFN, relacionam ainda o formato das partículas com os maiores valores de *slump* encontrados nas amostras com maiores teores de incorporação.

Figura 21 - MEV da amostra de clínquer. a) x100 b) x500 c) x1.000 d) x2.000



Fonte: LUCCAR UFES (2023)

Figura 22 - MEV da amostra de EFN. a) x100 b) x500 c) x1.000 d) x2.000



Fonte: LUCCAR UFES (2023)

4.2. Ensaio em pastas

Na sequência, são abordados os resultados dos ensaios reológicos e de cinética de hidratação nas primeiras idades obtidos em pastas.

4.2.1. Reologia

Foram realizados ensaios reológicos nas pastas com os 6 teores estudados, aos 10 min e aos 60 min da mistura. Não foram utilizados aditivos químicos nas pastas, o que permitiu uma avaliação isolada dos efeitos dos materiais cimentícios suplementares nas propriedades reológicas, como visto em Matos et al. (2018).

Para determinação da tensão de escoamento estática, foram considerados os resultados da primeira etapa do ensaio reológico, na qual foi aplicada uma taxa constante de $0,01s^{-1}$ por 60s. O valor de pico no gráfico elaborado a partir dos resultados foi considerado equivalente à tensão de escoamento estática.

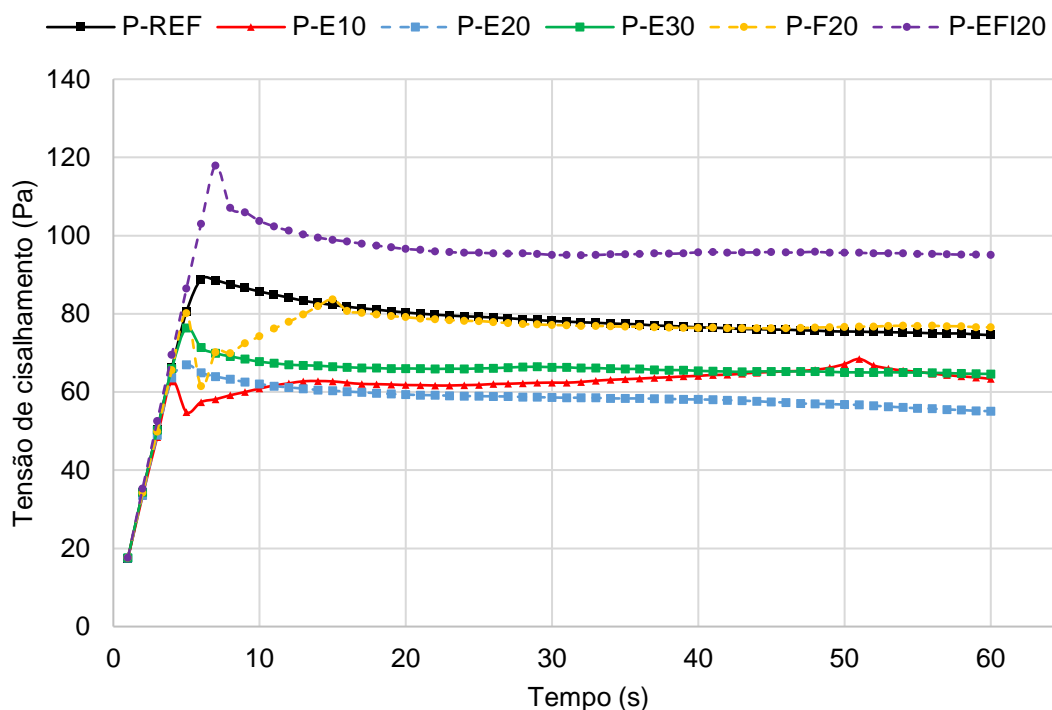
Também foram elaborados gráficos de tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento, por meio da terceira etapa do ensaio, a de desaceleração da taxa de cisalhamento. Os valores obtidos foram, então, ajustados por Herschel-Bulkey, modelo mais indicado para quando se observa comportamento não linear, em relação ao modelo de Bingham (PILAR et al., 2021), por meio do *software* MATLAB. Os gráficos contêm os dados brutos obtidos no ensaio, dispostos em marcadores pontuais, além dos valores ajustados por Herschel-Bulkley (H-B), dispostos em formato de curva. As tabelas com a integralidade dos dados obtidos experimentalmente podem ser encontradas no APÊNDICE.

4.2.1.1. Ensaio reológicos aos 10 min

As curvas de tensão de cisalhamento versus tempo para determinação da tensão de escoamento estática das pastas são apresentadas na Figura 23. A Figura 24 traz os valores obtidos para a tensão de escoamento estática, através

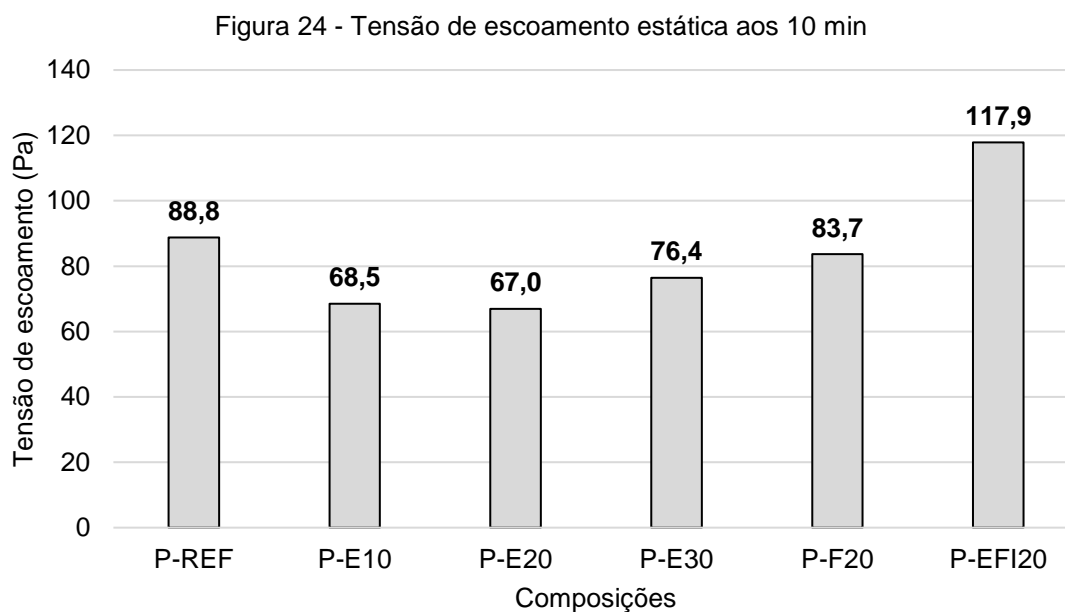
do pico do gráfico de tensão pelo tempo. As misturas P-E10 e P-E20 apresentaram as menores tensões de escoamento estáticas, seguidas da mistura P-E30.

Figura 23 - Curvas de tensão de cisalhamento versus tempo para determinação da tensão de escoamento estática aos 10 min



Fonte: O autor

A tensão de escoamento estática da referência (P-REF) foi de 88,80 Pa. Observa-se uma redução de 20% em relação à média dos resultados obtidos nas amostras contendo EFN com finura de 5.900 cm²/g. A amostra P-F20, com fíler calcário, apresentou uma redução de 6% em relação à referência, sendo o valor mais próximo obtido. Por outro lado, uma maior tensão de escoamento estática, um aumento de 33% em relação à referência, foi observada na mistura com escória de ferro-níquel mais fina (P-EFI20). Isto pode estar relacionado, com base em de Matos et al. (2021), a uma redução da distância entre as partículas, bem como à forma de lubrificação das mesmas.

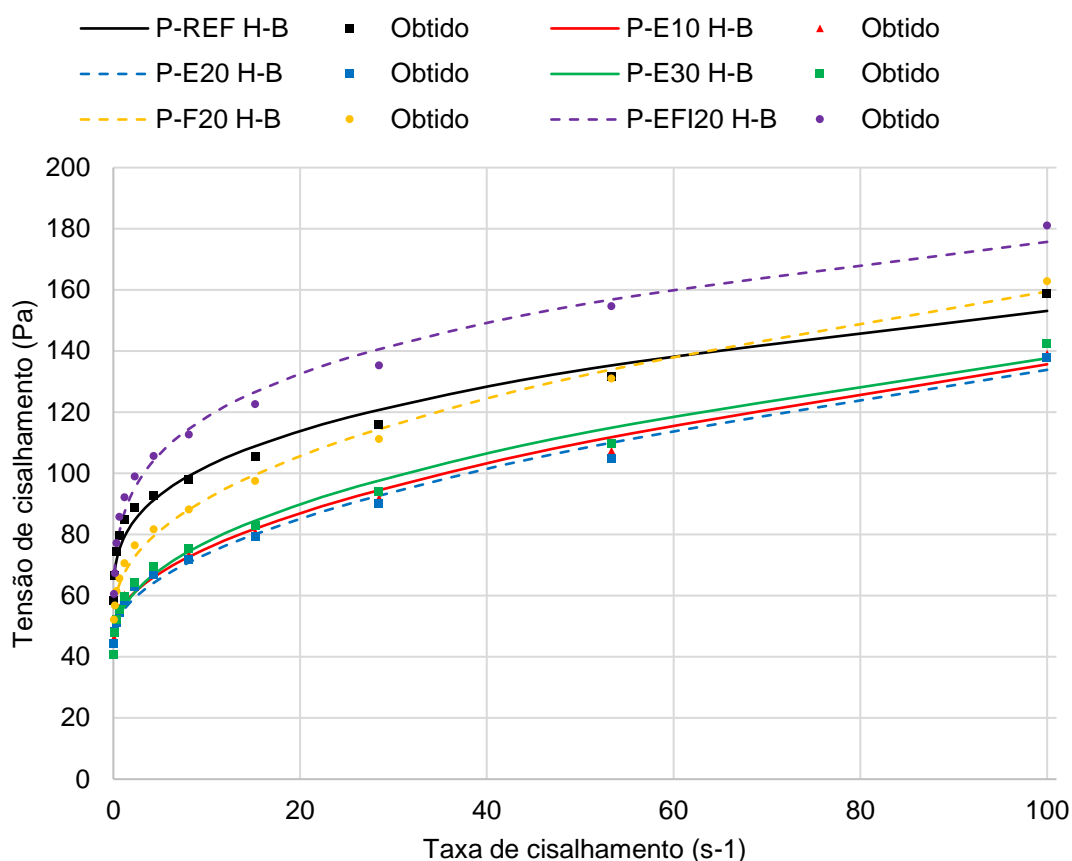


Fonte: O autor

A Figura 25 apresenta as curvas de tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento, obtidas através dos resultados coletados pelo reômetro na etapa posterior de desaceleração, e ajustadas pelo modelo de Herschel-Bulkley. Observou-se que as amostras contendo EFN com finura *Blaine* de 5.900 cm²/g apresentaram, em média, 18% de redução na tensão de escoamento dinâmica em relação à referência. Esta redução foi de 29% para a escória “ultrafina”, e de 9% para o filer calcário.

Zhou e Shi (2021) observaram efeitos semelhantes em termos de tensão de escoamento, com ajuste realizado pelo modelo de Bingham. As composições contendo EFN no teor de 30%, com áreas superficiais tanto de 4.200 cm²/g quanto de 5.500 cm²/g, resultaram em menores tensões de escoamento e viscosidade plástica do que a referência. Isto se dá, segundo os autores, primariamente devido à redução da fricção entre as partículas no aglomerante composto.

Figura 25 - Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento aos 10 min



Fonte: O autor

A tensão de escoamento dinâmica e a viscosidade equivalente de cada mistura, bem como os índices de consistência e de comportamento do fluido, estão dispostos na Tabela 17. A tensão de escoamento se relaciona com a estrutura granular da suspensão, ocorrendo o fluxo quando a deformação da estrutura supera as forças entre as partículas (DE MATOS, 2018). As três misturas com incorporação de EFN de menor finura (P-E10, P-E20 e P-E30) apresentaram menor viscosidade aparente, em relação às demais misturas.

Tabela 17 - Propriedades reológicas aos 10 min

10 min	Tensão de escoamento dinâmica	Índice de consistência	Índice de pseudoplasticidade	Viscosidade aparente (10 min)
	τ_0	K	n	μ_{app}
P-REF	56,05	21,93	0,32	1,24
P-E10	48,22	8,48	0,51	1,06
P-E20	46,31	8,53	0,51	1,07
P-E30	42,72	12,76	0,44	1,19
P-F20	51,22	15,08	0,43	1,35
P-EFI20	39,89	45,37	0,24	1,84

Fonte: O autor

As misturas apresentaram comportamento fluidificante em todas as composições, indicadas numericamente pelo índice de pseudoplasticidade (n) inferior a 1, calculados através do modelo de Herschel-Bulkley. Esse efeito foi mais pronunciado na mistura com escória mais fina (P-EFI20), com um valor de 0,24, em comparação com a referência (0,32) as demais composições. De acordo com de Matos et al. (2018), este é um efeito esperado com a presença de partículas mais finas entre os grãos de cimento, que reduzem a fricção entre as partículas.

O modelo de Herschel-Bulkey se ajustou adequadamente aos dados obtidos, uma vez que todos os ajustes apresentaram coeficiente de correlação R^2 acima de 0,974, como pode ser verificado na Tabela 18.

Tabela 18 - Coeficientes de correlação aos 10 min

	R^2
P-REF	0,974
P-E10	0,989
P-E20	0,987
P-E30	0,985
P-F20	0,992
P-EFI20	0,987

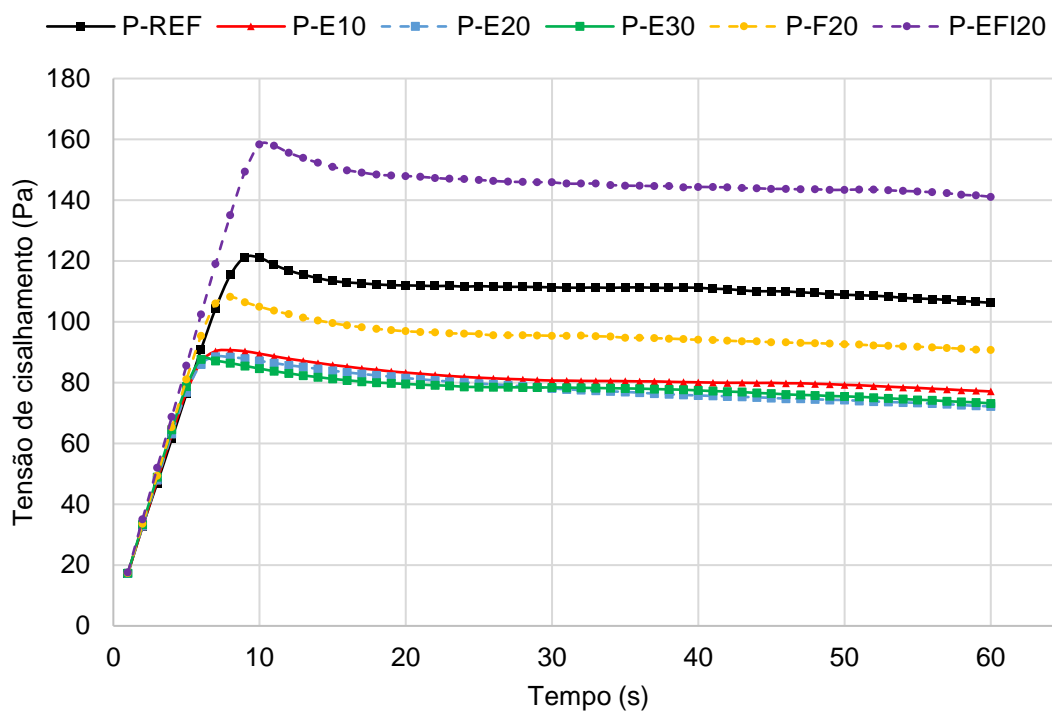
Fonte: O autor

De maneira geral, é possível verificar que a incorporação de escória de ferro-níquel com área superficial de 5.900 cm²/g resulta em melhores parâmetros reológicos e, possivelmente, em melhor trabalhabilidade, apresentando menores tensões de escoamento estáticas e dinâmicas em relação à referência e à mistura com fíler calcário, enquanto a incorporação de EFN com 9.300 cm²/g apresentou maior tensão de escoamento estática e menor tensão de escoamento dinâmica.

4.2.1.2. Ensaio reológicos aos 60 min

A tensão de escoamento estática aos 60 min de cada mistura foi determinada a partir da curva obtida na etapa com a taxa de cisalhamento fixada em 0,01s⁻¹, como demonstrado na Figura 26, e os valores de pico resultantes estão dispostos na Figura 27.

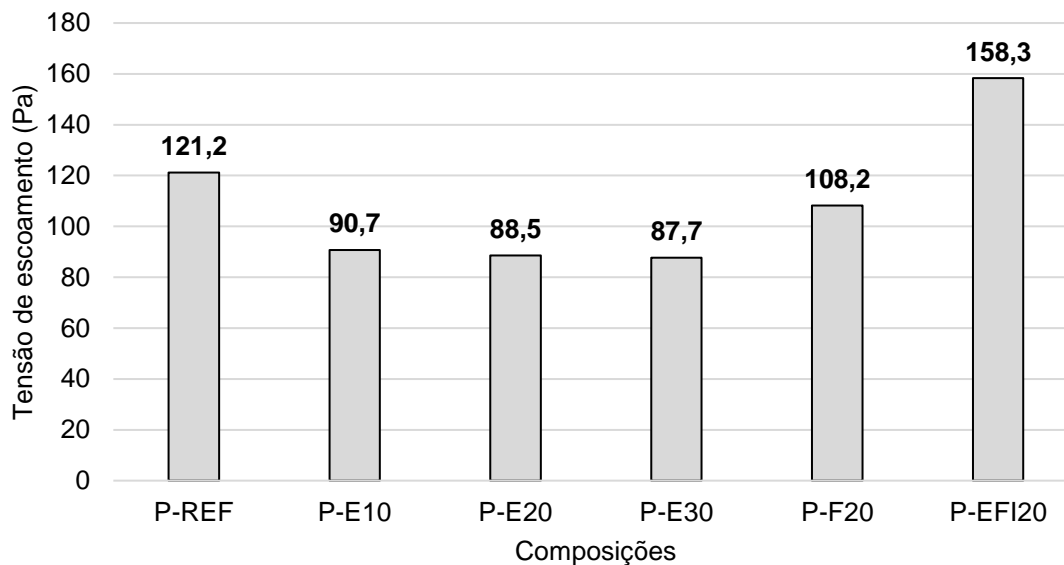
Figura 26 – Determinação da tensão de escoamento estática aos 60 min



Fonte: O autor

Novamente, a mistura P-EFI20 apresentou maior tensão de escoamento estática, 31% de aumento em relação à referência, e as misturas com escória de menor finura (P-E10, P-E20 e P-E30), as menores, com uma redução média de 27% em relação à referência. As misturas de referência (P-REF) e com fíler calcário (P-F20) apresentaram comportamento reológico similar, com uma maior tensão de escoamento na mistura sem adições minerais. Portanto, as observações realizadas em termos de tensão de escoamento estática, aos 10 minutos de mistura, se mantêm aos 60 minutos.

Figura 27 - Tensão de escoamento estática aos 60 min

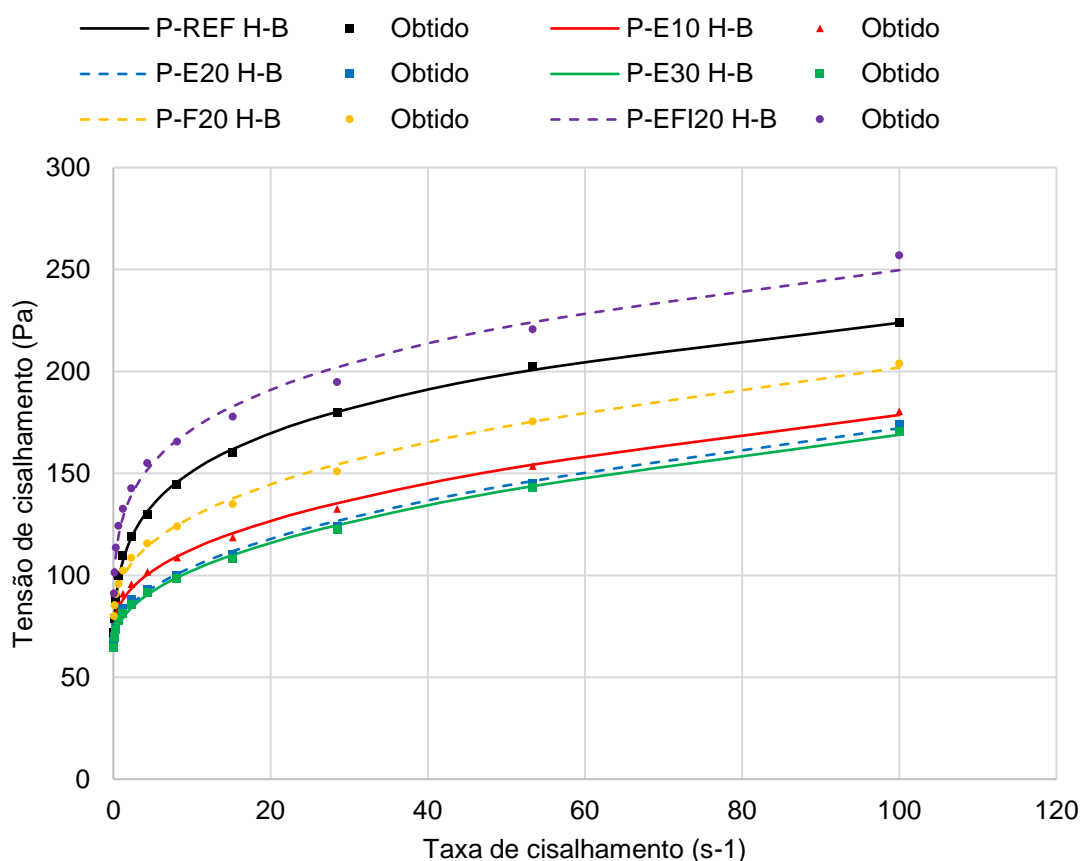


Fonte: O autor

Os resultados de tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento obtidos no ensaio (apresentados nos marcadores), e os ajustados por Herschel-Bulkley (apresentados nas curvas), estão dispostos na Figura 28. A Tabela 19 traz as propriedades reológicas obtidas aos 60 min.

Em oposição aos resultados obtidos aos 10 minutos, neste caso, a mistura de referência (P-REF) apresentou a menor tensão de escoamento dinâmica, de acordo com o modelo de Herschel-Bulkley, bem como um menor índice de pseudoplasticidade, similar à mistura com escória mais fina (P-EFI20). Ambas as misturas apresentaram uma viscosidade aparente superior às demais misturas, e novamente as três misturas com escória de ferro-níquel com menor finura demonstraram menor viscosidade aparente, em média 47% menor que a referência.

Figura 28 - Tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento aos 60 min



Fonte: O autor

Tabela 19 - Propriedades reológicas aos 60 min

60 min	Tensão de escoamento dinâmica	Índice de consistência	Índice de pseudoplasticidade	Viscosidade aparente (60 min)
	τ_0	K	n	μ_{app}
P-REF	17,76	85,96	0,19	2,82
P-E10	69,51	17,08	0,40	1,35
P-E20	65,63	13,82	0,44	1,29
P-E30	63,57	14,17	0,44	1,32
P-F20	74,19	23,14	0,37	1,61
P-EFI20	58,20	67,01	0,23	2,60

Fonte: O autor

Os coeficientes de correlação, apresentados na Tabela 20 e tendo um mínimo de 0,990, demonstram que o ajuste realizado pelo modelo de Herschel-Bulkey está coerente com os valores obtidos no ensaio, da mesma forma que os resultados aos 10 minutos.

Tabela 20 - Coeficientes de correlação aos 60 min

	R ²
P-REF	0,999
P-E10	0,996
P-E20	0,996
P-E30	0,997
P-F20	0,996
P-EFI20	0,990

Fonte: O autor

4.2.2. Calorimetria

Os ensaios de calorimetria de condução isotérmica foram realizados nas 6 amostras de pastas, relativas aos teores de incorporação de materiais suplementares estudados. A Tabela 21 mostra a quantidade exata de material utilizada para cada teor, com o objetivo de aproximar-se de 6 g de massa da amostra, bem como a massa de aglomerante, a qual foi utilizada para se obter o fluxo de calor e o calor total normalizados.

Tabela 21 - Massa de material utilizada no calorímetro

	P-REF	P-E10	P-E20	P-E30	P-F20	P-EFI20
Massa da amostra (g)	6,09	6,04	6,16	6,04	6,12	6,02
Massa de aglomerante (g)	3,74	3,69	3,81	3,69	3,77	3,67

Fonte: O autor

A Tabela 22 relaciona o período de indução encontrado para as diferentes misturas, a partir do método gráfico. Foi possível observar que o período de indução terminou antes na mistura de referência, se prolongando conforme a incorporação de EFN 5.900 cm²/g foi aumentada. O fim do período de indução foi prolongado em 5% na amostra com 10% de EFN 5.900 cm²/g, em relação à referência, 18% na P-E20 e 21% na P-E30. Com relação à P-F20 e à P-EFI20, este aumento foi de 13% e 16%, respectivamente.

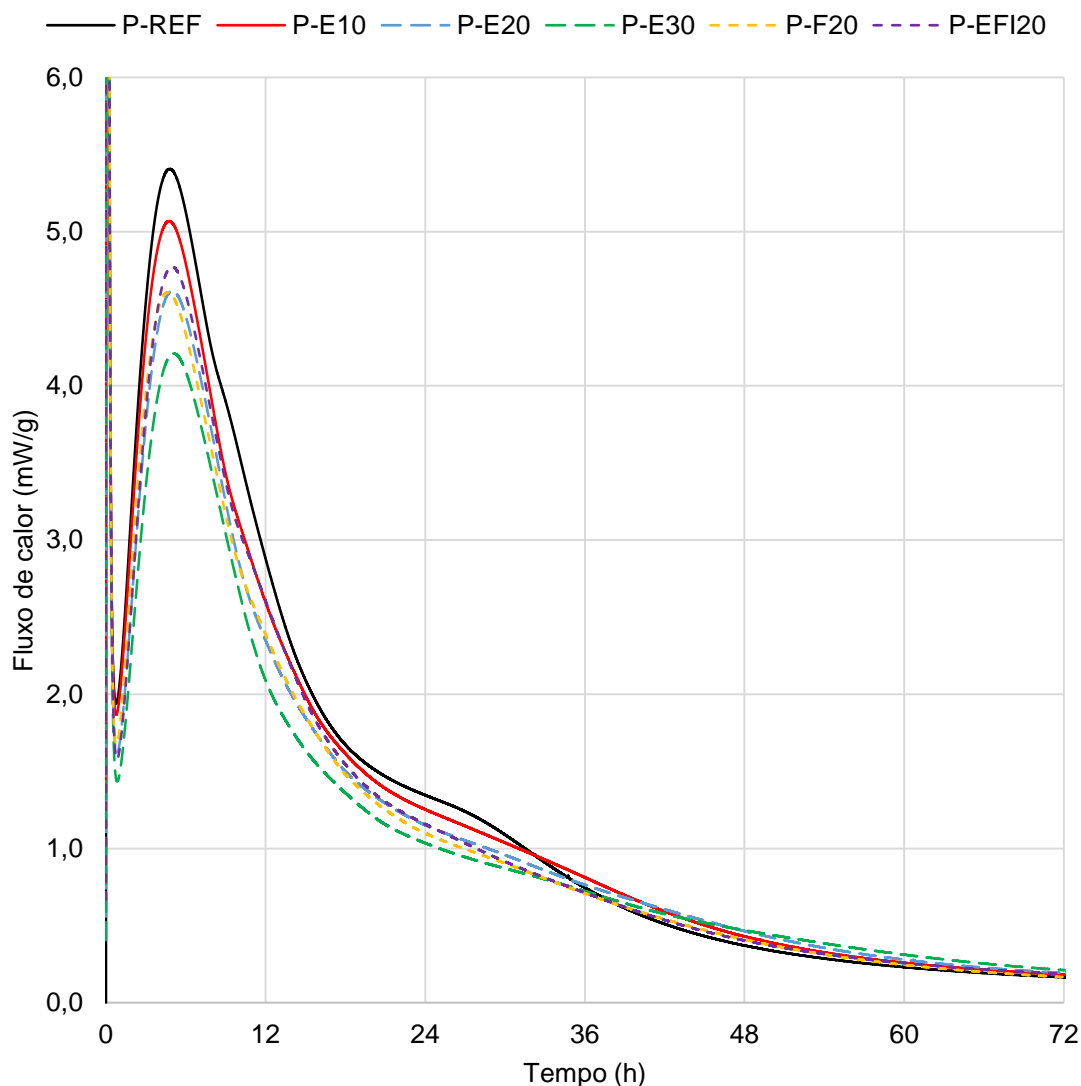
Tabela 22 - Período de indução das misturas

	P-REF	P-E10	P-E20	P-E30	P-F20	P-EFI20
Fim do período de indução (min)	56	59	66	68	63	65

Fonte: O autor

O resultado dos ensaios de calorimetria, em termos de taxa de calor liberado (mW/g) e calor total liberado (J/g), estão descritos nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 - Taxa de calor liberado por calorimetria isotérmica de condução



Fonte: O autor

Foi possível observar que o pico de liberação de calor após o período de indução foi maior na pasta de referência P-REF, excedendo significativamente a marca de 5 mW/g, chegando a 5,41 mW/g. Este pico foi reduzido conforme a incorporação de escória de ferro-níquel com finura de 5.900 cm²/g foi aumentada, se aproximando de 4,21 mW/g na pasta P-E30, uma redução de 22%, com 30% de incorporação de EFN. Isto sugere que a EFN possui o efeito de reduzir a taxa de hidratação das pastas, o que pode ser explicado pela diluição dos teores de C₃S e C₃A no aglomerante, e os processos de formação de gel C-S-H e etringita. Maiores níveis de substituição de cimento por materiais

cimentícios suplementares podem causar redução dos produtos hidratados destes compostos, além de um maior afastamento entre as partículas de cimento hidratadas (RAHMAN et al., 2017).

Estes resultados são consistentes com os obtidos por Zhou e Shi (2021). As pastas de cimento contendo EFN, em teores de 15%, 30% e 45% reduziram os picos da taxa de liberação de calor em comparação à referência, e este efeito foi mais pronunciado quanto maior o teor de escória de ferro-níquel, explicado devido à redução dos compostos mais reativos no aglomerante. Semelhantemente, entre as pastas contendo EFN com *Blaine* de 4.200 cm²/g e 5.500 cm²/g, nos mesmos teores, os autores observaram que a segunda teve uma redução menor do pico do que a primeira, o que indica que uma maior finura da EFN acelera a hidratação da pasta cimentícia, através de reações mais rápidas das partículas mais finas.

Quanto à incorporação de 20% de fíler calcário, P-F20, o pico de liberação de calor foi de 4,61 mW/g, 15% menor que a referência, se assemelhando à incorporação de EFN com finura de 5.900 cm²/g no mesmo teor (P-E20), que teve um pico após a indução de 4,62 mW/g, indicando efeitos semelhantes na diminuição da velocidade de hidratação. A pasta P-EF120, com escória mais fina (9.300 cm²/g de finura), apresentou um pico de 4,77 mW/g, 12% menor que a referência, pouco maior do que a P-E20, demonstrando um possível aumento da reatividade em relação à escória menos fina.

Efeitos semelhantes foram observados quanto ao calor total liberado. Enquanto a P-REF liberou 359 J/g na marca de 72h, a P-E30 liberou 310 J/g, uma redução de 14%. As amostras contendo 10% e 20% de escória de ferro-níquel 5.900 cm²/g liberaram respectivamente 3% e 8% menos calor do que a referência, em 72h. Ainda assim, estas amostras liberaram mais calor do que a amostra contendo 20% de fíler calcário, uma adição predominantemente inerte que é utilizada comercialmente em teores semelhantes no Brasil, de acordo com o que é determinado pela NBR 16697 (2018). Não houve uma diferença relevante neste quesito entre as amostras contendo 20% de escória de ferro-níquel em finuras diferentes. Os valores de calor total liberado em 72h de ensaio são apresentados na Tabela 23.

Figura 30 - Calor total liberado por calorimetria de condução isotérmica

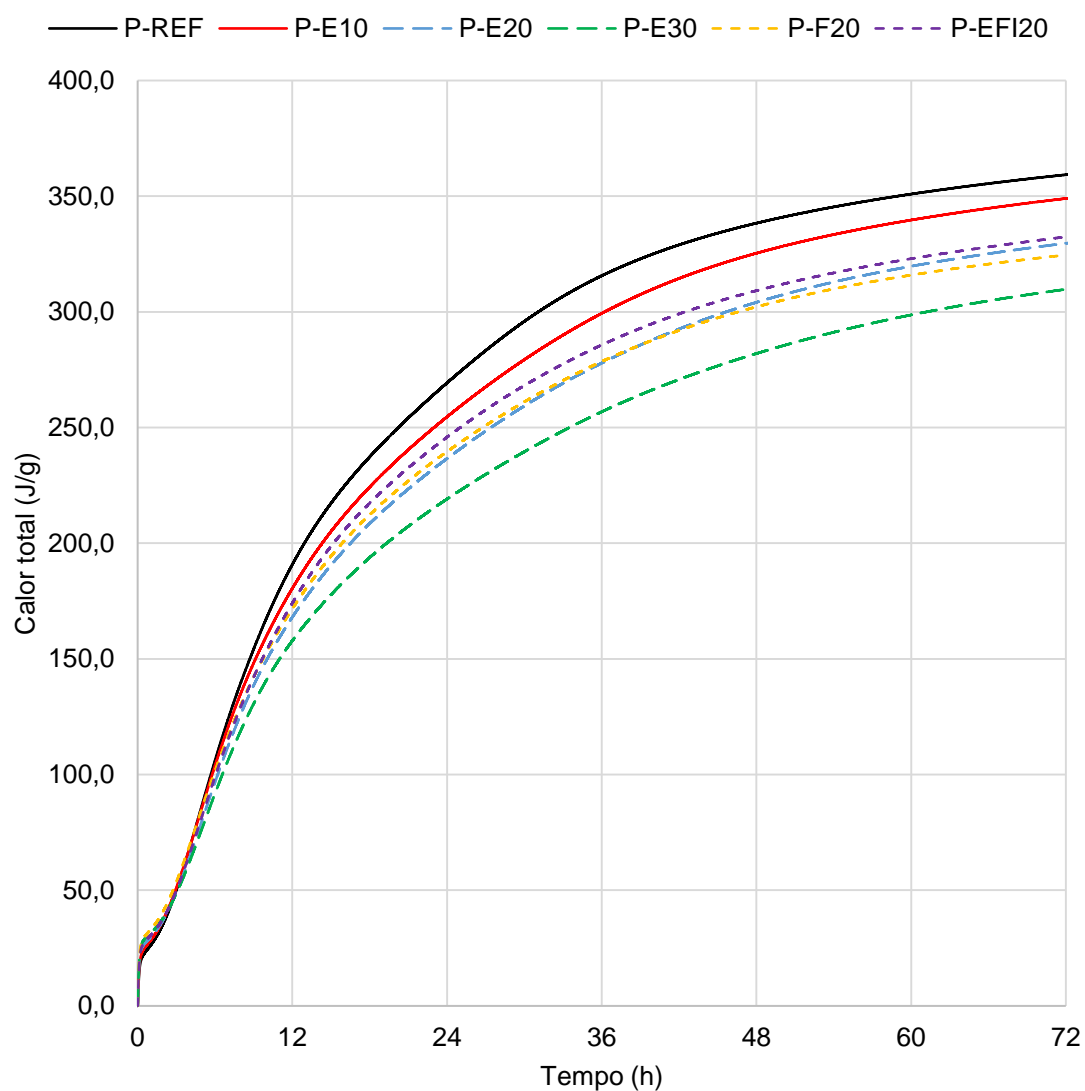


Tabela 23 - Calor total liberado em 72h

	P-REF	P-E10	P-E20	P-E30	P-F20	P-EFI20
Calor total (J/g)	359	349	330	310	325	332

Fonte: O autor

4.3. Ensaios em argamassas

4.3.1. Teor de aditivo

De forma a encontrar o teor de aditivo a ser utilizado nas argamassas, foi utilizado o padrão da EFNARC (2002) para argamassas auto adensáveis, no qual busca-se obter um valor de *slump flow* entre 240 mm e 260 mm. Através de estudo preliminar do espalhamento da argamassa de referência A-REF, sem adição de EFN ou fíler, o teor obtido foi utilizado para as demais amostras com materiais cimentícios suplementares, como forma de padronização.

A Tabela 24 demonstra os valores obtidos a partir de três teores de aditivo superplastificante, em relação à massa total de aglomerante.

Tabela 24 - *Slump flow* da argamassa A-REF a partir de diferentes teores de aditivo

Teor de aditivo	<i>Slump flow</i> médio (mm)
0,33%	236
0,34%	248
0,42%	300

Fonte: O autor

Optou-se, então, por se utilizar o teor de 0,34% de aditivo para todas as composições estudadas, uma vez que o valor de *slump flow* obtido, 248 mm, se encontra entre 240 mm e 260 mm.

4.3.2. Ensaios no estado fresco

Foram procedidos os ensaios de espalhamento (*slump flow*), mini funil V, densidade de massa e ar incorporado, conforme descritos na metodologia. Os resultados obtidos experimentalmente podem ser avaliados na Tabela 25. Os resultados completos, com as medidas intermediárias de mini *slump flow*, podem ser encontrados no APÊNDICE.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios no estado fresco em argamassas

Amostra		A-REF	A-E10	A-E20	A-E30	A-F20	A-EFI20
10 min	Mini <i>slump flow</i> (mm)	248	288	297	319	288	263
	Mini funil V (s)	4,35	2,45	3,24	2,5	2,66	2,59
60 min	Mini <i>slump flow</i> (mm)	215	263	253	266	245	238
	Mini funil V (s)	6,68	3,50	4,38	3,18	4,41	3,38
Densidade de massa (kg/m ³)		2248	2256	2238	2238	2238	2243
Densidade teórica (kg/m ³)		2262	2261	2260	2260	2251	2260
Ar incorporado (%)		0,60	0,22	1,00	0,97	0,56	0,77

Fonte: O autor

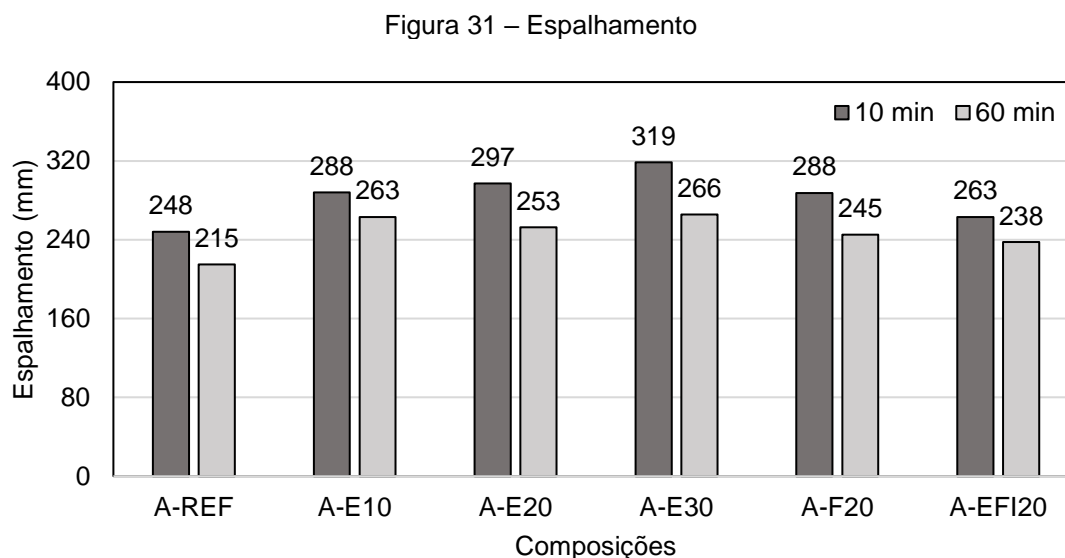
Com base nos resultados de mini *slump flow* aos 10 minutos, foi possível estabelecer uma correlação entre maiores teores de substituição do clínquer por EFN com *Blaine* de 5.900 cm²/g e maiores espalhamentos e capacidade de fluxo, indicando um aumento da fluidez da argamassa em relação à referência. As aberturas das amostras com 10%, 20% e 30% da EFN 5.900 cm²/g foram 16%, 20% e 29% maior do que a referência, respectivamente. Estes resultados são coerentes com os ensaios reológicos realizados nas pastas aos 10 minutos, nos quais as misturas com EFN de menor finura apresentaram as menores tensões de escoamento estáticas.

Por outro lado, a substituição por escória de maior finura, A-EFI20, com *Blaine* de 9.300 cm²/g, resultou em uma redução de fluidez em relação à substituição em mesmo teor da escória com menor finura, A-E20, e um espalhamento com abertura 6% maior do que a referência. Esta conclusão é consistente com a encontrada por Zhou e Shi (2021) em termos de ensaios reológicos.

A substituição por 20% de fíler calcário (A-F20), com espalhamento 20% maior que a A-REF, resultou em fluidez semelhante à argamassa A-E10, com 10% de EFN, e menor do que a amostra A-E20, considerando-se o *slump flow* aos 10 minutos. Isto pode significar que o desempenho no estado fresco da escória com *Blaine* de 5.900 cm²/g é superior ao do fíler, no mesmo teor, resultando em argamassas mais fluidas. O mesmo não pode ser concluído da amostra com escória de maior finura A-EFI20, que apresentou uma fluidez menor do que a A-F20. Nuruzzaman et al. (2022), utilizando uma composição contendo 30% de substituição em volume por cinza volante como controle, observou uma

redução de 4% no espalhamento em concretos autoadensáveis contendo EFN, o que pode sugerir desempenho semelhante da escória de ferro-níquel a outros materiais cimentícios suplementares.

A Figura 31 ilustra os valores de espalhamento (mini *slump flow*) obtidos.

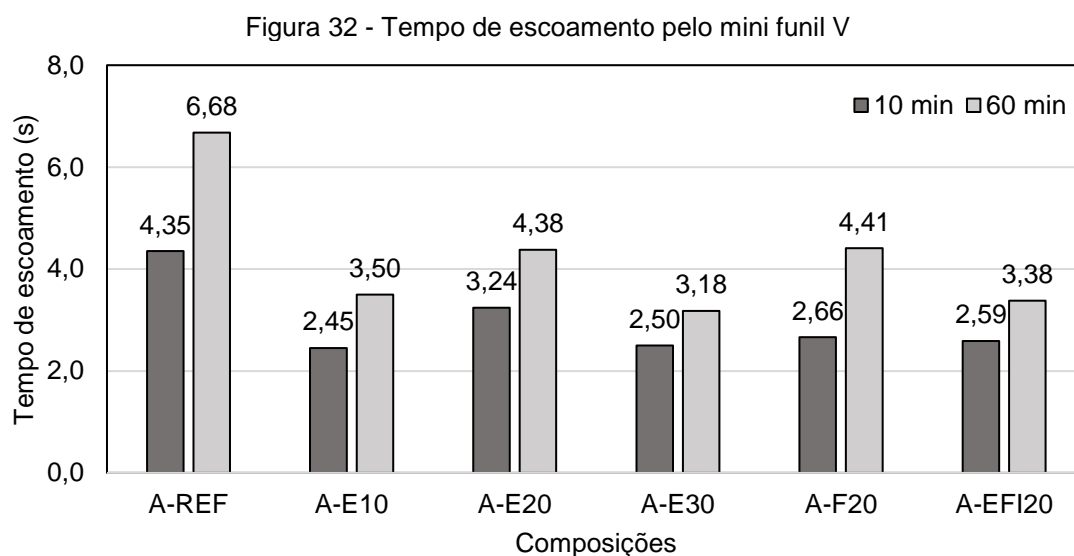


Fonte: O autor

A fluidez aos 60 minutos tende a diminuir, como esperado, devido à aproximação ao tempo de pega do material. As substituições por EFN com *Blaine* de $5.900 \text{ cm}^2/\text{g}$ apresentaram os maiores valores de *slump flow*, mantendo a melhor fluidez também aos 60 minutos, embora com valores mais próximos entre si, comparados aos obtidos aos 10 minutos, onde havia sido possível observar uma clara tendência de aumento de fluidez a partir da maior incorporação de escória. Em termos de manutenção de fluidez, os espalhamentos destas amostras com EFN $5.900 \text{ cm}^2/\text{g}$ foram, em média, 13% menores aos 60 min, em comparação às mesmas amostras aos 10 min, resultado semelhante à amostra de referência. Novamente, a substituição por escória mais fina resultou em menor fluidez comparada à escória com menor finura, ainda que todas as argamassas estudadas tenham tido melhor fluidez do que a referência.

O tempo de escoamento pelo mini funil V, visualizado na Figura 32, foi de forma geral reduzido significativamente a partir da incorporação das escórias e do fíler calcário em relação à referência, indicando uma fluidez melhorada a partir da incorporação destes materiais cimentícios suplementares. Considerando-se

a média entre todas as amostras com algum teor de substituição, o tempo de escoamento aos 10 min foi reduzido em 38%, em relação à A-REF, e aos 60 min, 44%. Entre os diferentes teores de substituição e materiais, porém, não foi possível estabelecer uma relação direta a partir do tempo de escoamento, sendo que as amostras A-E10, A-E20, A-E30, A-F20 e A-EFI20 apresentaram valores aproximados entre si. A Figura 33 demonstra o procedimento do ensaio.



Fonte: O autor

Figura 33 - Ensaio de mini funil V



Fonte: O autor

Os valores de densidade de massa e teor de ar incorporado não foram afetados significativamente pela incorporação da escória de ferro-níquel e do fíler calcário, não sendo possível estabelecer uma conclusão direta a partir dos resultados deste ensaio. Os resultados variaram de 0,22% a 1,00%.

As Figuras 34 a 45 ilustram o ensaio de espalhamento realizado, podendo ser observado o aspecto das argamassas. Não foi verificada segregação dos materiais nas amostras, apresentando-se argamassas homogêneas aos 10 minutos, mantendo-se estas características aos 60 minutos para todas as composições. A redução na abertura do espalhamento com a progressão do tempo pode ser claramente observada.

Figura 34 - Espalhamento A-REF 10 min



Fonte: O autor

Figura 35 - Espalhamento A-REF 60 min



Fonte: O autor

Figura 36 - Espalhamento A-E10 10 min



Fonte: O autor

Figura 37 - Espalhamento A-E10 60 min



Fonte: O autor

Figura 38 - Espalhamento A-E20 10 min



Fonte: O autor

Figura 39 - Espalhamento A-E20 60 min



Fonte: O autor

Figura 40 - Espalhamento A-E30 10 min



Fonte: O autor

Figura 41 - Espalhamento A-E30 60 min



Fonte: O autor

Figura 42 - Espalhamento A-F20 10 min



Fonte: O autor

Figura 43 - Espalhamento A-F20 60 min



Fonte: O autor

Figura 44 - Espalhamento A-EFI20 10 min



Fonte: O autor

Figura 45 - Espalhamento A-EFI20 60 min



Fonte: O autor

4.3.3. Resistência à compressão de argamassas

O ensaio de resistência à compressão foi realizado para avaliar a capacidade de suportar cargas compressivas das argamassas. As amostras foram preparadas, submetidas à cura úmida em câmara, e rompidas aos 28 dias, após capeamento para regularização da superfície, através da aplicação por máquina de cargas até a falha.

Para cada tipo de amostra, com diferentes teores de EFN e FC, foram moldados 6 corpos de prova (CP). A carga de rompimento de cada CP, em tonelada-força, foi registrada no APÊNDICE, bem como as medidas de diâmetro e altura (média de duas medições), a área de aplicação, a resistência em MPa de cada corpo de prova e, enfim, a resistência média da argamassa estudada em MPa.

As duas amostras de cada ensaio com os menores valores de resistência à compressão, em cada teor, foram excluídas, considerando-se as quatro mais significativas para o cálculo da resistência média à compressão (MPa). O aspecto geral parcial dos corpos de prova, antes e depois do rompimento, pode ser observado nas figuras 46 a 51.

Figura 46 - A-REF com superfície regularizada



Fonte: O autor

Figura 47 - A-E10 com superfície regularizada



Fonte: O autor

Figura 48 - CPs A-REF e A-E10 rompidos



Fonte: O autor

Figura 49 - A-E20, A-E30 e A-F20 com superfície regularizada



Fonte: O autor

Figura 50 - CPs A-E20, A-E30 e A-F20 rompidos



Fonte: O autor

Figura 51 - A-EF120 com superfície regularizada



Fonte: O autor

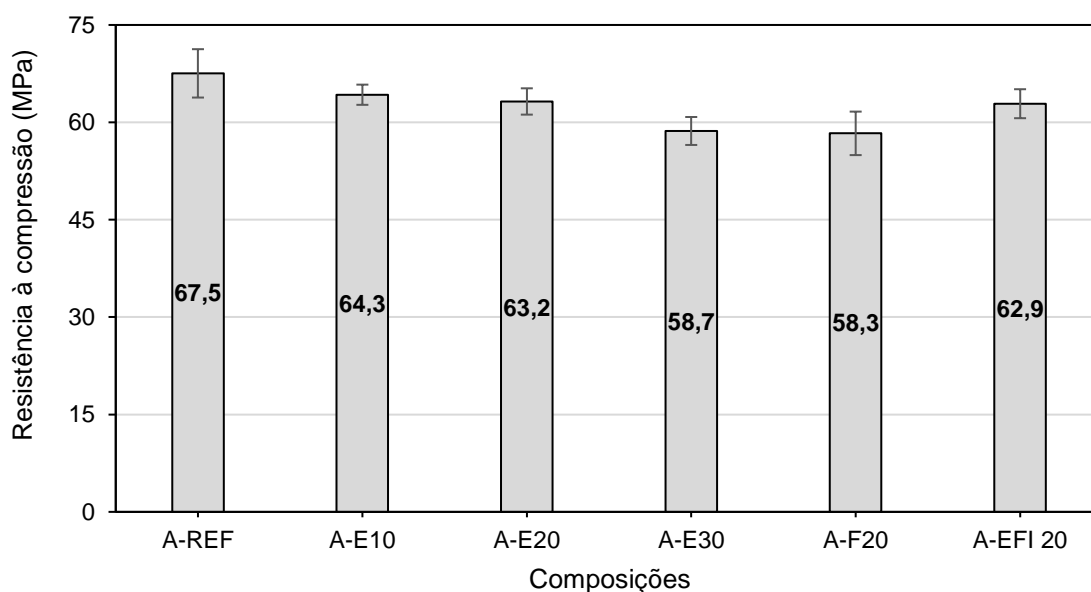
A maior resistência à compressão obtida foi a amostra de referência, com 67,5 MPa, como pode ser observado na Figura 52, que apresenta os valores de resistência à compressão junto ao desvio padrão. A amostra A-E10, com 10% de escória de ferro-níquel, apresentou uma resistência ligeiramente inferior à argamassa de referência, com 64,3 MPa, uma redução de cerca de 5%.

A amostra A-E20 apresentou uma redução de 6%, e a A-E30, uma redução de 13%, em relação à referência. Pode-se verificar que a substituição por escória de ferro-níquel tende a reduzir a resistência à compressão em relação à argamassa de referência, sem material cimentício suplementar algum,

e que este efeito é mais pronunciado quanto mais elevado o teor de substituição, dinâmica semelhante à registrada por Rahman et al. (2017), que observaram uma redução de aproximadamente 17% e 20% na resistência à compressão aos 28 dias de argamassas contendo 20% e 30% de EFN com 5.000 cm²/g, respectivamente.

Similarmente, Lemonis et al. (2015) observaram uma redução de 6,8% e de 13% na resistência à compressão aos 28 dias de argamassas contendo 10% e 20% de EFN, respectivamente, com área superficial em torno de 3.900 cm²/g. Os autores justificam que não há uma contribuição da EFN para as reações de hidratação, em idades iniciais, em comparação com a amostra de referência. Em idades mais avançadas, porém, Kim et al. (2019) destacam a formação de hidrotalcita em composições contendo EFN, que permite reação pozolânica em cura a longo prazo, permitindo maior desenvolvimento de resistência em comparação com a referência.

Figura 52 - Resistência à compressão média das composições aos 28 dias de idade



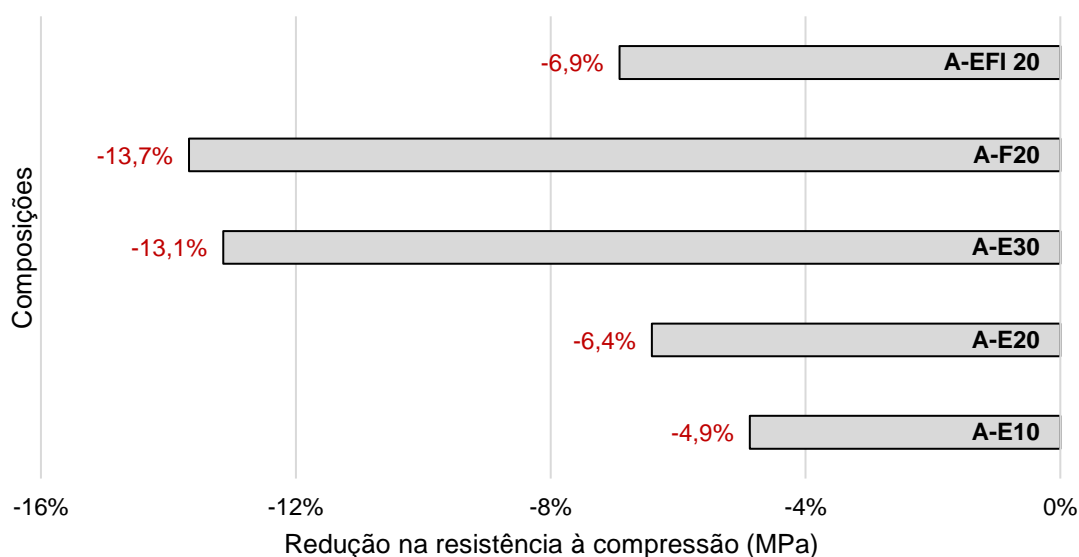
Fonte: O autor

A substituição por EFN de maior finura não aparentou um melhor resultado de resistência à compressão, com a amostra A-EFI20 apresentando uma redução de 7% em relação à referência, similar e até mesmo ligeiramente maior do que a amostra A-E20, com o mesmo teor de substituição por escória menos fina, resultados menos promissores do que os encontrados na literatura para escórias de ferro-níquel com maior finura (KIM et al., 2019; ZHOU e SHI,

2021). Considerando-se que o tempo de moagem para se alcançar uma finura de 9.300 cm²/g foi de 14 h, 130% a mais do que para se alcançar 5.900 cm²/g (6 h), o gasto energético adicional não se justifica, o que também se conclui com os resultados no estado fresco.

A amostra A-F20, com substituição por 20% de fíler calcário, apresentou uma redução na resistência à compressão de 14%, em relação à A-REF. Este resultado pode indicar que a EFN atua como um substituto do clínquer mais efetivo e de melhor desempenho do que o fíler, uma vez que a redução de resistência à compressão nas amostras com escória tanto de maior quanto de menor finura foram significativamente inferiores. Considerando-se que o cimento comercial brasileiro CPII-F pode conter de 11 a 25% de material carbonático (NBR 16697, 2018), o uso da EFN se torna especialmente interessante.

Figura 53 - Redução na resistência à compressão em relação à argamassa de referência



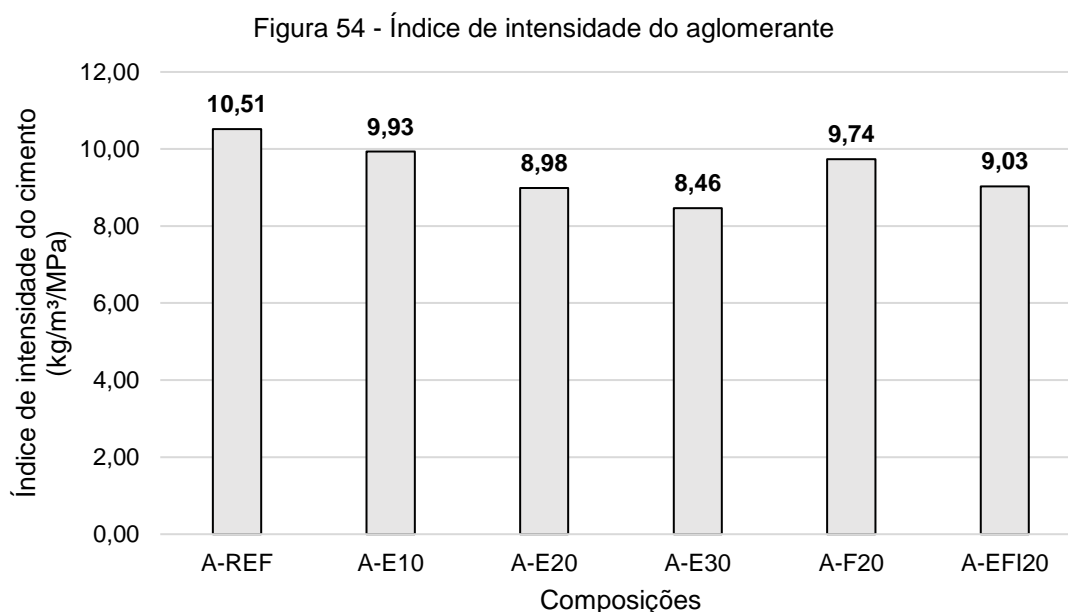
Fonte: O autor

A Figura 53 ilustra o efeito comparativo das incorporações estudadas na resistência à compressão das argamassas. Percebeu-se uma queda significativa de resistência entre as argamassas A-E20 e A-E30, indicando que incorporações acima de 20% podem resultar em uma perda de desempenho excessiva.

Por outro lado, quando se leva em consideração o índice de intensidade de cimento, obtido através da razão entre o consumo de clínquer da mistura, em

kg/m³, pela resistência à compressão obtida, em MPa, como observado na Figura 54, a mistura A-E30 (contendo 30% de escória de ferro-níquel no aglomerante) apresenta o menor valor, 20% menor do que a referência. Isto indica que esta mistura possui o menor consumo de cimento por MPa desenvolvido, se tornando uma opção interessante quando se tem o objetivo de reduzir o consumo de cimento para se obter uma determinada resistência à compressão.

Todas as composições com adições resultaram em menores consumos de cimento por MPa do que a referência, com a média dos índices de intensidade do cimento das amostras contendo EFN 13% menor do que a A-REF. Nota-se que a escória mais fina (9.300 cm²/g) não resultou em índices menores do que a escória com 5.900 cm²/g, no teor de 20%, reforçando a conclusão de que não há benefícios comparativos verificados no seu uso. Ambas as amostras, porém, resultaram em melhores índices de intensidade do cimento do que a mistura com fíler calcário, no mesmo teor de substituição (20%).



Fonte: O autor

5. Considerações finais

A partir do que foi discutido e apresentado neste trabalho, as seguintes considerações podem ser feitas:

- A escória de ferro-níquel possui propriedades físico-químicas, das quais se destaca sua composição química, adequadas para o uso como material cimentício suplementar. Apresenta alto teor de sílica e Fe_2O_3 , sendo necessário observar o teor de óxido de magnésio na composição total do cimento, tendo como referência a NBR 16697/2018.
- Observou-se uma redução média na tensão de escoamento estática de 20%, aos 10 min, e de 27%, aos 60 min, nas três amostras contendo EFN 5.900 cm^2/g , em relação à referência, indicando melhores propriedades reológicas.
- A substituição por escória “ultrafina”, com 9.300 cm^2/g de finura *Blaine*, apresentou um aumento, aos 10 min, de 33% na tensão de escoamento estática, e aos 60 min, de 31%.
- A tensão de escoamento dinâmica aos 10 min foi reduzida em 18%, em média, pelas amostras P-E10, P-E20 e P-E30, em relação à referência. Aos 60 min, não se observou esta redução.
- Um prolongamento do fim do período de indução foi observado em todas as amostras com substituição por materiais cimentícios suplementares, em relação à referência, sendo mais pronunciado na amostra com maior teor de EFN, 30%. Isto pode demonstrar uma hidratação mais lenta com a incorporação deste material.
- O pico da taxa de liberação de calor foi reduzido com as substituições parciais por EFN e fíler, demonstrando uma menor reatividade destas amostras. Foi 22% menor do que a referência na amostra com 30% de EFN 5.900 cm^2/g , 15% menor nas amostras P-E20 e P-F20, e 12% menor na amostra com escória “ultrafina”.
- O calor total liberado em 72 h pelas amostras contendo EFN foi de 3% a 14% menor do que a referência.

- Com relação ao espalhamento das argamassas, as amostras com EFN 5.900 cm²/g apresentaram aberturas de 16% a 29% maiores do que a referência, indicando uma maior fluidez na incorporação deste material.
- O ganho de fluidez, com base no ensaio de espalhamento, da amostra com 20% de EFN 5.900 cm²/g foi superior ao da amostra com 20% de fíler calcário, indicando um possível melhor desempenho da escória de ferro-níquel no estado fresco.
- A amostra com 20% de escória de ferro-níquel “ultrafina”, com valor de finura *Blaine* de 9.300 cm²/g, apresentou menor espalhamento do que as amostras A-E20 e A-F20, porém ainda assim 6% superior à amostra de referência.
- A perda de fluidez aos 60 min foi semelhante, em termos proporcionais, entre as amostras com materiais cimentícios suplementares e a referência.
- As amostras com substituição parcial por EFN e fíler calcário apresentaram uma redução do tempo de mini funil V, em relação à referência. Em média, aos 10 min, esta redução foi de 38%, e aos 60 min, 44%.
- Todas as argamassas com substituição parcial por escória ou fíler apresentaram uma redução na resistência à compressão, em relação à A-REF, com cimento contendo apenas clínquer e gipsita. Esta redução foi de 5% com a argamassa A-E10, 6% com a A-E20 e 13% com a A-E30. Todas as argamassas contendo EFN apresentaram menor perda de resistência em relação à argamassa com fíler calcário, um material consolidado comercialmente e com especificação em norma.
- As argamassas com substituição parcial do cimento por fíler ou escória apresentaram menor consumo de cimento (kg/m³) por MPa produzido, chegando a 20% de redução no índice de intensidade do cimento na amostra com 30% de escória. As amostras A-E20, A-E30 e A-EFI20 apresentaram melhor desempenho neste quesito do que a amostra com 20% de fíler calcário (A-F20).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1738/C1738M-18: Standard practice for high-shear mixing of hydraulic cement pastes, 2018.

_____. ASTM C1749-17a: Standard guide for measurement of the rheological properties of hydraulic cementitious paste using a rotational rheometer, West Conshohocken, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. 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, 2005.

_____. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio Janeiro, 2016.

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

BERGHE, Rafael Vancini Schimith. Análise da Adição de Escória de Ferroníquel na Composição de Cimentos Portland. Orientadora: Rudiele Aparecida Schankoski. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 2024.

BETIOLI, A. M. et al. Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: isothermal calorimetry versus oscillatory rheometry. *Cement and concrete Research*, v. 39, n. 5, p. 440-445, 2009.

BOUASRIA, Manal et al. Partial substitution of cement by the association of Ferronickel slags and *Crepidula fornicata* shells. *Journal of Building Engineering*, v. 33, p. 101587, 2021.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti de. Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil: revisão. *Cerâmica*, v. 57, n. 341, p. 63-75, 2011.

CHEN, Yuning et al. Sustainable use of ferronickel slag in cementitious composites and the effect on chloride penetration resistance. *Construction and Building Materials*, v. 240, p. 117969, 2020.

CHIDIAC, S. E.; MAHMOODZADEH, F. Plastic viscosity of fresh concrete—A critical review of predictions methods. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 8, p. 535-544, 2009.

COSME, Jéssika; FERNANDES, Gilberto; FERNANDES, Daniel Pinto. Utilization of ferronickel slag in hot mix asphalt. *REM-International Engineering Journal*, v. 74, p. 19-26, 2021.

COSTA, Ana Rita Damasceno; MASUERO, Angela Borges; GONÇALVES, Jardel Pereira. Avaliação reológica sob diferentes temperaturas de pastas cimentícias aditivadas com diferentes tipos de aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, 2020.

COUSSOT, P. Introduction to the rheology of complex fluids. In: *Understanding the rheology of concrete*. Woodhead Publishing, 2012. p. 3-22.

DA SILVA, Leandro Souza. INDÚSTRIA BRASILEIRA DO CIMENTO: CONSUMO E IMPACTOS AMBIENTAIS. *CONSTRUINDO*, v. 14, n. 1, 2022.

DE LARRARD, Francois; SEDRAN, Thierry. Mixture-proportioning of high-performance concrete. *Cement and concrete research*, v. 32, n. 11, p. 1699-1704, 2002.

DE MATOS, Paulo Ricardo et al. Rheological behavior of Portland cement pastes and self-compacting concretes containing porcelain polishing residue. *Construction and building materials*, v. 175, p. 508-518, 2018.

DE MATOS, Paulo R. et al. Self-compacting mortars produced with fine fraction of calcined waste foundry sand (WFS) as alternative filler: Fresh-state, hydration and hardened-state properties. *Journal of Cleaner Production*, v. 252, p. 119871, 2020.

DE MATOS, Paulo R. et al. Utilization of ceramic tile demolition waste as supplementary cementitious material: An early-age investigation. *Journal of building engineering*, v. 38, p. 102187, 2021.

DUCHESNE, J. Alternative supplementary cementitious materials for sustainable concrete structures: a review on characterization and properties. *Waste and Biomass Valorization*, v. 12, p. 1219-1236, 2021.

EFNARC. Specification and guidelines for self-compacting concrete. European federation of specialist construction chemicals and concrete system, 2002.

EN, B. S. 445, Grout for Prestressing tendons-test methods. British Standards Institution, 2007.

FERRARIS, Chiara F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. *Journal of research of the national institute of standards and technology*, v. 104, n. 5, p. 461, 1999.

GAVRILETEA, Marius Dan. Environmental impacts of sand exploitation. *Analysis of sand market. Sustainability*, v. 9, n. 7, p. 1118, 2017.

GOLDSTEIN, Joseph et al. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. 3. ed.: Springer US, 2003. 689 p.

HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, n. 11, p. 559-573, 2020.

HUANG, Yiduo; WANG, Qiang; SHI, Mengxiao. Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder. *Construction and Building Materials*, v. 156, p. 773-789, 2017.

KATSIOTIS, N. S. et al. Utilization of ferronickel slag as additive in Portland cement: a hydration leaching study. *Waste and Biomass Valorization*, v. 6, n. 2, p. 177-189, 2015.

KIM, Hansol; LEE, Chang Hong; ANN, Ki Yong. Feasibility of ferronickel slag powder for cementitious binder in concrete mix. *Construction and Building Materials*, v. 207, p. 693-705, 2019.

KOMNITSAS, Kostas; ZAHARAKI, Dimitra; BARTZAS, Georgios. Effect of sulphate and nitrate anions on heavy metal immobilisation in ferronickel slag geopolymers. *Applied clay science*, v. 73, p. 103-109, 2013.

LEMONIS, N. et al. Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, v. 81, p. 130-139, 2015.

LI, Yubo et al. Mechanical performance, hydration characteristics and microstructures of high volume blast furnace ferronickel slag cement mortar by wet grinding activation. *Construction and Building Materials*, v. 320, p. 126148, 2022.

LIMA, Rodrigo Lemos; ZAMPIERON, João Vicente. Avaliação da escória de níquel como possível matéria prima para pigmento cerâmico. *Ciência et Praxis*, v. 2, n. 04, p. 11-14, 2009.

LIU, Xiaoming et al. Study on the durability of concrete with FNS fine aggregate. *Journal of hazardous materials*, v. 381, p. 120936, 2020.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de et al. Portland cement composites with carbon nanotubes (CNT) addition: Properties in freshly state and compressive strength. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 20, n. 1, p. 127-144, 2015.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. Ibracon, 2008.

MOSTAFA, N. Y.; BROWN, P. W.: Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry. *Thermochemical Acta*, Vol. 435, Issue 2, p. 162-167, 2005.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5ª ed. Bookman, 2016.

NGUYEN, Quang Dieu et al. Performance of fly ash concrete with ferronickel slag fine aggregate against alkali-silica reaction and chloride diffusion. *Cement and Concrete Research*, v. 139, p. 106265, 2021.

NOVELLI, Lylian Gramlich. *Avaliação Mecânica e de Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Alto Desempenho Contendo Escória de Ferroníquel como Adição Mineral*. Orientador: Ronaldo Pilar. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, 2024.

NURUZZAMAN, Md; CASIMIRO, Jhanssen Orlando Camargo; SARKER, Prabir Kumar. Fresh and hardened properties of high strength self-compacting concrete using by-product ferronickel slag fine aggregate. *Journal of Building Engineering*, v. 32, p. 101686, 2020.

NURUZZAMAN, Md; KURI, Jhutan Chandra; SARKER, Prabir Kumar. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete with the dual use of ferronickel slag as fine aggregate and supplementary binder. *Construction and Building Materials*, v. 318, p. 125927, 2022.

OLIVEIRA, Julia Delboni. Análise de propriedades mecânicas e reológicas de matrizes cimentícias com adição de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

PILAR, Ronaldo et al. Avaliação de pastas de cimento Portland contendo cinza pesada moída. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 21, p. 92-104, 2016.

PILAR, Ronaldo. Avaliação nos estados fresco e endurecido de concretos autodensáveis de alto desempenho com aditivos redutor e compensador de retração. 2017. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

PILAR, Ronaldo et al. Rheological behavior of low shrinkage very high strength self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 286, p. 122838, 2021.

PIOVEZAM, Igor André Rodrigues; MELEIRO, Leandro Parras; ISA, Mario Morio. Influência da adição no comportamento reológico da pasta autoadensável de alto desempenho. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 30, n. 2, p. 155-159, 2008.

QI, Ai et al. Mechanical properties of the concrete containing ferronickel slag and blast furnace slag powder. *Construction and Building Materials*, v. 231, p. 117120, 2020.

RAHMAN, Muhammad Ashiqur et al. Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag. *Construction and Building Materials*, v. 140, p. 194-202, 2017.

SAHA, Ashish Kumer; SARKER, Prabir Kumar. Expansion due to alkali-silica reaction of ferronickel slag fine aggregate in OPC and blended cement mortars. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 135-142, 2016.

SAHA, Ashish Kumer; SARKER, Prabir Kumar. Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study. *Journal of Cleaner Production*, v. 162, p. 438-448, 2017a.

SAHA, Ashish Kumer; SARKER, Prabir Kumar. Compressive strength of mortar containing ferronickel slag as replacement of natural sand. *Procedia engineering*, v. 171, p. 689-694, 2017b.

SAHA, Ashish Kumer; KHAN, M. N. N.; SARKER, Prabir Kumar. Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 134, p. 10-24, 2018.

SCRIVENER, Karen et al. Advances in understanding cement hydration mechanisms. *Cement and Concrete Research*, v. 124, p. 105823, 2019.

SHOYA, M. et al. Properties of self-compacting concrete with slag fine aggregates. In: *Exploiting Wastes in Concrete*. Thomas Telford Publishing, 1999. p. 121-130.

SILVA, Maristela Gomes da; BATTAGIN, Arnaldo Forti; GOMES, Vanessa. Cimentos Portland com Adições Mineraias. In: ISAIA, Geraldo Cechella (org.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais*. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017. Cap. 25. p. 1-51.

TOGAWA, Kazuo; SHOYA, Masami; KOKUBU, Katuro. Characteristics of bleeding, freeze-thaw resistance and watertightness of concrete with ferro-nickel slag fine aggregates (*Journal of the Society of Materials Science, Japan*), v. 45, 1996.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). (org.). Hazardous waste characteristics. 2009. Disponível em: www.epa.gov/sites/production/files/2016-01/documents/hw-char.pdf. Acesso em: 10 out. 2021.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Mineral commodity summaries 2020. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2020. 200p.

ZHOU, Yuqi; SHI, Chunfang. Experimental study of electric furnace ferronickel slag as a supplementary cementitious material in massive high-strength concrete. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, p. 1-11, 2021.

APÊNDICES

A) Reologia

Tabela 26 - Ensaios reológicos aos 10 min – P-REF, P-E10 e P-E20

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO ESTÁTICA	10 min								
	P-REF			P-E10			P-E20		
	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)
1,000031	17,483744	0,000309	1,000038	17,478189	0,000334	1,000031	17,496178	0,000370	
2,000061	34,375412	0,000875	2,000107	33,439938	0,001819	2,000084	33,593674	0,001574	
3,000092	50,383148	0,001155	3,000092	48,496567	0,001635	3,000114	48,927700	0,001467	
4,000122	66,137184	0,001426	4,000122	62,743935	0,002982	4,000145	63,576073	0,002515	
5,000160	80,497520	0,002871	5,000160	54,820930	0,016225	5,000183	66,960884	0,015075	
6,000267	88,803543	0,008250	6,000252	57,421261	0,009366	6,000237	64,909592	0,010629	
7,000244	88,526291	0,010755	7,000244	58,153152	0,009301	7,000267	63,958763	0,010359	
8,000275	87,510658	0,010491	8,000313	59,174519	0,009558	8,000298	63,246689	0,010351	
9,000305	86,603180	0,010503	9,000305	59,987770	0,009454	9,000328	62,570213	0,010399	
10,000343	85,698318	0,010471	10,000359	60,871708	0,009503	10,000366	62,030205	0,010261	
11,000435	84,908997	0,010436	11,000397	61,674900	0,009482	11,000435	61,520363	0,010240	
12,000420	84,138794	0,010417	12,000427	62,206074	0,009667	12,000443	61,180626	0,010136	
13,000450	83,335312	0,010440	13,000473	62,743614	0,009735	13,000473	60,856262	0,010224	
14,000481	82,787529	0,010290	14,000465	62,794979	0,010251	14,000504	60,532665	0,010152	
15,000519	82,241310	0,010315	15,000504	62,710751	0,010231	15,000526	60,324974	0,010142	
16,000572	81,803879	0,010207	16,000557	62,351967	0,009908	16,000595	60,111267	0,010101	
17,000664	81,406197	0,010158	17,000587	62,058678	0,010417	17,000603	59,915039	0,010133	
18,000610	81,064415	0,010196	18,000694	62,004238	0,010167	18,000633	59,706234	0,010160	
19,000641	80,667419	0,010174	19,000648	61,915638	0,009823	19,000664	59,495995	0,010182	
20,000679	80,336861	0,010134	20,000687	61,781071	0,010161	20,000702	59,345921	0,010070	
21,000732	80,027901	0,010233	21,000732	61,749710	0,010073	21,000832	59,223030	0,010019	
22,000763	79,780457	0,010189	22,000763	61,667465	0,010207	22,000786	59,171612	0,009953	
23,000793	79,559448	0,010135	23,000793	61,655811	0,009834	23,000816	59,047512	0,009979	
24,000824	79,366211	0,010159	24,000824	61,762894	0,009911	24,000847	58,961750	0,010065	
25,000854	79,224007	0,010059	25,000854	61,829041	0,010011	25,000877	58,932987	0,010040	
26,000908	79,038261	0,010157	26,000908	62,044563	0,009938	26,000931	58,884125	0,010021	
27,000946	78,863014	0,010119	27,001022	62,103695	0,009957	27,000961	58,849129	0,010117	
28,000969	78,615669	0,010123	28,000969	62,234615	0,009794	28,000984	58,722454	0,010095	
29,001022	78,391350	0,010175	29,000984	62,348404	0,009985	29,001022	58,670128	0,009962	
30,001091	78,166481	0,010139	30,001053	62,400871	0,009758	30,001053	58,597916	0,010032	
31,001083	77,994164	0,010093	31,001068	62,387222	0,009982	31,001167	58,534542	0,010073	
32,001122	77,838348	0,010107	32,001106	62,585304	0,009843	32,001129	58,536240	0,010093	
33,001183	77,699043	0,010053	33,001129	62,882912	0,009803	33,001152	58,495457	0,010064	
34,001167	77,528847	0,010100	34,001167	63,112751	0,009825	34,001183	58,373608	0,010145	
35,001213	77,397636	0,010086	35,001221	63,271378	0,009687	35,001213	58,342850	0,010108	
36,001266	77,285324	0,010040	36,001251	63,431637	0,009902	36,001266	58,357563	0,010017	
37,001305	77,004677	0,010134	37,001282	63,626629	0,009790	37,001305	58,284824	0,010077	
38,001312	76,894653	0,010022	38,001320	63,772209	0,009934	38,001335	58,219353	0,010065	
39,001358	76,705444	0,010000	39,001350	63,980511	0,009919	39,001366	58,143688	0,010091	
40,001389	76,539627	0,010117	40,001411	64,130287	0,009856	40,001396	58,082333	0,010017	
41,001419	76,434860	0,010051	41,001427	64,353287	0,009889	41,001442	58,039814	0,010055	
42,001511	76,304634	0,010026	42,001472	64,410614	0,010075	42,001472	57,904747	0,010010	
43,001495	76,104446	0,010102	43,001503	64,686600	0,010094	43,001549	57,786804	0,010031	
44,001511	76,066467	0,010046	44,001518	64,959541	0,009798	44,001534	57,635994	0,010072	
45,001572	75,970955	0,010079	45,001549	65,103729	0,009920	45,001564	57,432564	0,010069	
46,001602	75,930817	0,010019	46,001579	65,299187	0,009662	46,001625	57,305695	0,010134	

	47,001648	75,781876	0,010044	47,001686	65,388687	0,009815	47,001640	57,064404	0,010142
	48,001678	75,694939	0,010031	48,001656	65,689018	0,009615	48,001671	56,978218	0,010147
	49,001678	75,528511	0,010094	49,001686	66,221390	0,009821	49,001701	56,892139	0,010033
	50,001770	75,472626	0,010047	50,001732	67,137703	0,009371	50,001762	56,798981	0,009993
	51,001770	75,429695	0,010051	51,001762	68,462090	0,010723	51,001793	56,696972	0,009979
	52,001801	75,331253	0,010039	52,001793	66,778320	0,010371	52,001823	56,487980	0,010034
	53,001846	75,296570	0,010152	53,001839	66,001801	0,010445	53,001869	56,271549	0,009924
	54,001862	75,226967	0,010015	54,001884	65,477829	0,010224	54,001900	56,035778	0,010253
	55,001907	75,146851	0,010028	55,001915	65,162308	0,010141	55,001930	55,846546	0,010099
	56,000000	75,023682	0,010037	56,001945	64,693176	0,010226	56,001961	55,714283	0,010049
	57,000076	74,964104	0,010021	57,001991	64,333344	0,010256	57,000008	55,532780	0,010158
	58,000015	74,966057	0,009984	58,000023	63,990673	0,010226	58,000038	55,381966	0,010065
	59,000046	74,717499	0,010104	59,000069	63,723167	0,010191	59,000069	55,194500	0,010149
	60,000107	74,568840	0,010156	60,000084	63,362850	0,010227	60,000114	55,090630	0,010134
ACELERAÇÃO	20,000000	75,704300	0,100127	20,000000	53,297386	0,099894	20,000000	49,079643	0,099914
	40,000000	75,685684	0,187324	40,000000	58,024651	0,187242	40,000000	53,995174	0,187343
	60,000000	76,840881	0,351086	60,000000	56,358917	0,351057	60,000000	52,872070	0,351166
	80,000000	80,675255	0,657822	80,000000	57,144573	0,657963	80,000000	53,425831	0,657977
	100,000000	82,212357	1,232837	100,000000	57,609234	1,232886	100,000000	54,178268	1,232832
	120,000000	84,452660	2,310095	120,000000	59,475166	2,310119	120,000000	56,197361	2,310093
	140,000000	88,550323	4,328728	140,000000	63,612564	4,328737	140,000000	60,004017	4,328760
	160,000000	95,162590	8,111282	160,000000	70,156311	8,111278	160,000000	66,446434	8,111275
	180,000000	105,868988	15,199152	180,000000	78,405647	15,199185	180,000000	75,125923	15,199162
	200,000000	115,034172	28,480446	200,000000	88,883629	28,480433	200,000000	86,377464	28,480413
220,000000	127,845520	53,367115	220,000000	105,039749	53,367100	220,000000	102,784378	53,367073	
240,000000	159,488571	100,000023	240,000000	138,599823	100,000038	240,000000	136,913528	100,000038	
DESACELERAÇÃO	20,000000	158,720947	100,000031	20,000000	139,145157	99,999977	20,000000	137,789474	100,000000
	40,000000	131,562668	53,367111	40,000000	107,426750	53,367161	40,000000	104,977486	53,367100
	60,000000	115,856720	28,480425	60,000000	92,021935	28,480442	60,000000	90,003700	28,480438
	80,000000	105,373604	15,199189	80,000000	80,993423	15,199180	80,000000	79,219330	15,199183
	100,000000	97,983612	8,111338	100,000000	73,530319	8,111326	100,000000	71,928520	8,111335
	120,000000	92,666374	4,328778	120,000000	68,376091	4,328794	120,000000	66,781700	4,328778
	140,000000	88,797615	2,310137	140,000000	64,458160	2,310159	140,000000	62,863503	2,310169
	160,000000	85,062981	1,232961	160,000000	60,358208	1,232901	160,000000	58,555668	1,232919
	180,000000	79,625443	0,657948	180,000000	56,168716	0,658014	180,000000	54,502224	0,657977
	200,000000	74,516907	0,351257	200,000000	53,283550	0,351219	200,000000	51,309513	0,351219
220,000000	66,390884	0,187450	220,000000	50,439182	0,187405	220,000000	48,187370	0,187337	
240,000000	58,523746	0,100101	240,000000	46,270649	0,100170	240,000000	44,257542	0,100054	

Fonte: O autor

Tabela 27 - Ensaios reológicos aos 10 min – P-E30, P-F20 e P-EFI20

	10 min								
	P-E30			P-F20			P-EFI20		
	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)
	1,000053	17,562035	0,000221	1,000053	17,554342	0,000267	1,000031	17,616365	0,000106
	2,000084	34,359394	0,001084	2,000084	34,186390	0,001221	2,000038	35,278385	0,000255
	3,000114	50,287857	0,001124	3,000320	49,864319	0,001163	3,000145	52,529938	0,000498
	4,000145	65,962723	0,001602	4,000183	65,578575	0,001277	4,000099	69,525887	0,000589
	5,000160	76,418823	0,011121	5,000160	80,109512	0,002848	5,000137	86,454353	0,000628
	6,000214	71,358063	0,010876	6,000214	61,475872	0,012058	6,000191	103,032814	0,000974
	7,000244	69,912415	0,010705	7,000244	70,141823	0,007218	7,000397	117,871986	0,003501
	8,000275	69,098663	0,010582	8,000275	69,951767	0,007601	8,000252	107,126884	0,014897
	9,000381	68,405067	0,010405	9,000305	72,482185	0,009783	9,000282	105,964867	0,011279
	10,000343	67,749245	0,010422	10,000343	74,214882	0,008942	10,000320	103,755875	0,010889
	11,000389	67,354218	0,010177	11,000389	76,206795	0,009203	11,000374	102,330818	0,010698
	12,000420	66,983498	0,010222	12,000420	77,958633	0,008542	12,000404	101,256126	0,010426
	13,000450	66,827263	0,010022	13,000702	79,810371	0,008998	13,000427	100,304184	0,010500
	14,000481	66,718773	0,009916	14,000481	81,960907	0,008710	14,000496	99,476669	0,010280
	15,000519	66,498322	0,010035	15,000519	83,671928	0,008629	15,000481	98,934143	0,010306
	16,000572	66,327797	0,010202	16,000572	80,717018	0,010320	16,000534	98,454071	0,010197
	17,000603	66,187820	0,010103	17,000603	80,270065	0,010375	17,000565	97,941910	0,010073
	18,000633	66,122093	0,010323	18,000633	79,851151	0,010371	18,000595	97,438774	0,010157
	19,000664	65,987358	0,010353	19,000664	79,409531	0,010292	19,000626	96,987183	0,010195
	20,000755	66,010216	0,009908	20,000702	79,136292	0,010151	20,000679	96,571625	0,010167
	21,000732	65,974449	0,010134	21,000732	78,791458	0,010113	21,000710	96,330391	0,010211
	22,000763	65,894730	0,010102	22,000763	78,608688	0,010168	22,000740	95,926353	0,010133
	23,000793	65,955818	0,009998	23,000793	78,386497	0,010065	23,000793	95,779587	0,010172
	24,000824	65,931267	0,009908	24,000824	78,197792	0,010165	24,000801	95,591408	0,010090
	25,000854	66,027664	0,009915	25,001068	78,142067	0,010084	25,000870	95,621758	0,009969
	26,000908	66,104202	0,009917	26,000908	77,888573	0,010126	26,000885	95,453644	0,010134
	27,000961	66,261612	0,009961	27,001060	77,615097	0,009949	27,000999	95,389168	0,010067
	28,000969	66,411652	0,009880	28,000969	77,334129	0,010066	28,000946	95,433426	0,009932
	29,001007	66,445030	0,010168	29,001007	77,277672	0,010071	29,000984	95,331970	0,009977
	30,001053	66,348824	0,010041	30,001053	77,131905	0,010016	30,001030	95,052467	0,010023
	31,001083	66,324211	0,010018	31,001083	77,057831	0,009998	31,001045	95,026253	0,010055
	32,001122	66,107948	0,010418	32,001198	76,894432	0,010180	32,001083	94,953720	0,010019
	33,001144	66,118355	0,010006	33,001144	76,899933	0,010038	33,001122	95,028481	0,009807
	34,001183	65,978210	0,010048	34,001183	76,819153	0,010024	34,001144	95,185326	0,009977
	35,001236	65,876686	0,009973	35,001503	76,688087	0,010052	35,001251	95,188553	0,010061
	36,001266	65,894341	0,009871	36,001282	76,697487	0,009979	36,001221	95,305374	0,010038
	37,001282	65,666946	0,010244	37,001305	76,584396	0,009910	37,001259	95,498764	0,009867
	38,001320	65,609154	0,010136	38,001312	76,459724	0,009972	38,001289	95,362358	0,009816
	39,001350	65,580421	0,010015	39,001343	76,402946	0,010070	39,001320	95,485008	0,010005
	40,001396	65,411545	0,010151	40,001389	76,408546	0,010097	40,001366	95,722740	0,009814
	41,001427	65,313026	0,010104	41,001419	76,432091	0,010013	41,001396	95,785286	0,009945
	42,001457	65,234009	0,010161	42,001450	76,325691	0,010005	42,001427	95,610229	0,010251
	43,001503	65,142242	0,010125	43,001495	76,327858	0,009984	43,001472	95,675423	0,010127
	44,001518	65,251610	0,010075	44,001511	76,317459	0,009949	44,001488	95,710342	0,009901
	45,001595	65,279686	0,010096	45,001572	76,261002	0,009992	45,001549	95,781960	0,009945
	46,001595	65,256165	0,010076	46,001694	76,304878	0,009851	46,001610	95,672165	0,009917
	47,001701	65,265656	0,009818	47,001663	76,341583	0,010058	47,001640	95,715805	0,009997
	48,001686	65,231194	0,009908	48,001678	76,486450	0,009959	48,001625	95,841217	0,009913
	49,001701	65,156242	0,010040	49,001709	76,553329	0,009907	49,001656	95,637878	0,009991
	50,001762	65,035828	0,009957	50,001816	76,646950	0,010027	50,001732	95,604591	0,010359
	51,001793	65,024719	0,009999	51,001846	76,712669	0,010051	51,001747	95,615997	0,009961
	52,001823	64,991409	0,010022	52,001816	76,742218	0,009860	52,001778	95,448853	0,010131
	53,001839	65,042580	0,009963	53,001862	76,888771	0,009911	53,001823	95,490852	0,009840
	54,001869	65,002350	0,010038	54,001877	76,929359	0,010058	54,001839	95,480286	0,009867
	55,001930	64,962204	0,009959	55,001907	76,884308	0,010105	55,001884	95,296303	0,010068

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO ESTÁTICA

	56,001945	64,898994	0,010066	56,001938	76,923813	0,010079	56,001915	95,336212	0,010030
	57,001991	64,834999	0,009957	57,001984	76,825165	0,010005	57,001961	95,227264	0,010034
	58,000023	64,723686	0,010067	58,000015	76,798431	0,010152	58,000053	95,139946	0,010090
	59,000053	64,653305	0,010060	59,000046	76,571861	0,010223	59,000023	95,157921	0,009921
	60,000099	64,628563	0,010011	60,000092	76,561943	0,009915	60,000084	95,081841	0,010006
ACELERAÇÃO	20,000000	60,330257	0,100108	20,000000	69,125648	0,100306	20,000000	87,907097	0,100303
	40,000000	55,540890	0,187358	40,000000	67,611221	0,187518	40,000000	86,428780	0,187370
	60,000000	55,769917	0,351114	60,000000	67,940659	0,351225	60,000000	87,187805	0,351267
	80,000000	55,859341	0,657957	80,000000	68,329231	0,657958	80,000000	89,161011	0,657900
	100,000000	56,623859	1,232847	100,000000	69,258163	1,232814	100,000000	90,965240	1,232799
	120,000000	58,203510	2,310131	120,000000	70,913177	2,310129	120,000000	93,280182	2,310143
	140,000000	61,808746	4,328754	140,000000	76,329620	4,328725	140,000000	97,594109	4,328738
	160,000000	68,388329	8,111300	160,000000	84,290749	8,111284	160,000000	106,557571	8,111285
	180,000000	77,408386	15,199183	180,000000	93,424553	15,199116	180,000000	119,363312	15,199127
	200,000000	89,437241	28,480419	200,000000	105,767059	28,480446	200,000000	131,898300	28,480425
	220,000000	107,739388	53,367077	220,000000	126,457512	53,367119	220,000000	152,096939	53,367146
	240,000000	141,461777	100,000008	240,000000	161,614471	100,000031	240,000000	181,203262	100,000031
DESACELERAÇÃO	20,000000	142,362808	100,000000	20,000000	162,884903	99,999992	20,000000	181,073959	100,000000
	40,000000	109,836006	53,367104	40,000000	131,044769	53,367142	40,000000	154,713028	53,367088
	60,000000	93,899414	28,480425	60,000000	111,188171	28,480469	60,000000	135,324677	28,480433
	80,000000	83,071342	15,199165	80,000000	97,524597	15,199190	80,000000	122,586494	15,199166
	100,000000	75,363426	8,111349	100,000000	88,172287	8,111347	100,000000	112,671532	8,111314
	120,000000	69,633560	4,328787	120,000000	81,708664	4,328796	120,000000	105,626801	4,328806
	140,000000	64,337883	2,310215	140,000000	76,502472	2,310209	140,000000	98,932541	2,310193
	160,000000	59,658131	1,232944	160,000000	70,646927	1,232937	160,000000	92,164345	1,232989
	180,000000	55,476353	0,657999	180,000000	65,648064	0,657981	180,000000	85,828949	0,658046
	200,000000	52,150024	0,351160	200,000000	61,505604	0,351153	200,000000	77,214844	0,351310
	220,000000	47,865086	0,187514	220,000000	56,740402	0,187470	220,000000	67,353065	0,187504
	240,000000	40,778141	0,100159	240,000000	52,181458	0,100210	240,000000	60,581589	0,100210

Fonte: O autor

Tabela 28 - Ensaio reológico aos 60 min – P-REF, P-E10 e P-E20

	60 min								
	P-REF			P-E10			P-E20		
	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)
	1,000031	17,303925	0,000602	1,00199	17,34106	0,00059	1,000031	17,288935	0,000546
	2,000099	32,728149	0,002262	2,00002	32,71579	0,00174	2,000084	32,793030	0,001719
	3,000107	46,963490	0,002132	3,00005	47,83582	0,00154	3,000114	48,005112	0,001502
	4,000137	61,536697	0,001724	4,00008	63,00580	0,00175	4,000145	63,182430	0,001745
	5,000252	76,332237	0,001821	5,00024	76,87967	0,00302	5,000183	76,873589	0,003110
	6,000229	90,908737	0,002046	6,00018	86,76756	0,00614	6,000214	86,046631	0,006660
	7,000244	104,441566	0,003027	7,00021	90,34925	0,00915	7,000244	88,548561	0,009775
	8,000275	115,366318	0,004999	8,00024	90,66251	0,00998	8,000275	88,391312	0,010182
	9,000298	121,242264	0,008419	9,00027	90,32227	0,01038	9,000305	87,880859	0,010297
	10,000336	121,069939	0,011026	10,00031	89,51883	0,01049	10,000343	87,145660	0,010351
	11,000389	118,756287	0,011311	11,00036	88,65908	0,01055	11,000397	86,429855	0,010454
	12,000443	116,868935	0,010777	12,00039	87,82558	0,01037	12,000427	85,709854	0,010370
	13,000450	115,501038	0,010723	13,00042	87,15219	0,01037	13,000458	85,151634	0,010288
	14,000481	114,347672	0,010631	14,00045	86,46096	0,01038	14,000488	84,521973	0,010317
	15,000542	113,424484	0,010444	15,00047	85,80146	0,01031	15,000519	83,907204	0,010317
	16,000626	112,952560	0,010083	16,00053	85,25935	0,01030	16,000572	83,340324	0,010296
	17,000603	112,656113	0,010202	17,00055	84,66596	0,01022	17,000603	82,869858	0,010299
	18,000633	112,298607	0,010084	18,00058	84,20534	0,01027	18,000633	82,374413	0,010287
	19,000664	112,073746	0,010082	19,00069	83,68400	0,01019	19,000664	81,974640	0,010213
	20,000778	111,955887	0,010052	20,00066	83,28556	0,01023	20,000702	81,492104	0,010315
	21,000748	111,905830	0,010077	21,00069	82,92414	0,01020	21,000755	81,101608	0,010271
	22,000763	111,743805	0,010012	22,00072	82,53625	0,01023	22,000763	80,706291	0,010211
	23,000832	111,815941	0,010038	23,00076	82,18618	0,01018	23,000816	80,352303	0,010168
	24,000824	111,567024	0,009928	24,00081	81,88101	0,01014	24,000824	80,101440	0,010201
	25,000870	111,731216	0,009863	25,00084	81,63295	0,01004	25,000854	79,696663	0,010154
	26,001015	111,566475	0,010237	26,00087	81,41427	0,01012	26,000908	79,460968	0,010089
	27,000938	111,498268	0,010020	27,00091	81,21033	0,01018	27,000946	79,141487	0,010239
	28,000961	111,495247	0,009930	28,00093	81,06567	0,01011	28,000969	78,796448	0,010210
	29,000999	111,434875	0,010045	29,00097	80,84347	0,01020	29,001007	78,492554	0,010176
	30,001030	111,338341	0,009981	30,00124	80,68748	0,01006	30,001038	78,143593	0,010247
	31,001083	111,227600	0,010068	31,00103	80,65991	0,01004	31,001083	77,761887	0,010076
	32,001122	111,224503	0,009915	32,00114	80,57471	0,01003	32,001122	77,594666	0,010144
	33,001144	111,276184	0,010141	33,00109	80,55148	0,00995	33,001144	77,390488	0,010161
	34,001183	111,180077	0,009946	34,00113	80,53394	0,01015	34,001183	77,134125	0,010125
	35,001213	111,293625	0,009919	35,00120	80,48381	0,01004	35,001213	76,940918	0,010098
	36,001266	111,305588	0,010152	36,00121	80,41462	0,01005	36,001266	76,699806	0,010172
	37,001297	111,216209	0,009914	37,00125	80,40438	0,01001	37,001305	76,389503	0,010195
	38,001312	111,137276	0,009894	38,00132	80,27309	0,01009	38,001320	76,186699	0,010120
	39,001434	111,244873	0,010117	39,00130	80,17470	0,01009	39,001350	75,951775	0,010156
	40,001480	111,182671	0,009975	40,00146	80,09974	0,01005	40,001381	75,780731	0,010077
	41,001419	110,888611	0,010032	41,00140	80,01247	0,01008	41,001427	75,636482	0,010052
	42,001450	110,734650	0,010291	42,00143	79,94061	0,01006	42,001457	75,519447	0,010078
	43,001495	110,352577	0,010467	43,00147	79,95514	0,00998	43,001503	75,318573	0,010152
	44,001511	110,060043	0,009927	44,00149	79,88775	0,01002	44,001518	75,157745	0,010124
	45,001572	110,061272	0,010182	45,00153	79,91562	0,01003	45,001595	74,996552	0,010014
	46,001602	109,951759	0,009979	46,00156	79,79095	0,01005	46,001595	74,730568	0,010156
	47,001648	109,720772	0,009997	47,00159	79,77740	0,01002	47,001671	74,685211	0,010047
	48,001678	109,435394	0,010130	48,00167	79,62199	0,01022	48,001747	74,517937	0,010087
	49,001709	109,092560	0,010129	49,00181	79,48860	0,01007	49,001701	74,338753	0,010074
	50,001755	108,898041	0,010257	50,00170	79,26671	0,01020	50,001762	74,273209	0,010138
	51,002014	108,751427	0,010193	51,00208	79,12602	0,01002	51,001793	74,013786	0,010159
	52,001816	108,567665	0,010113	52,00185	78,89155	0,01013	52,001823	73,798576	0,010113
	53,001862	108,311646	0,010171	53,00184	78,66685	0,01005	53,001869	73,647179	0,010118
	54,001862	107,880547	0,010416	54,00182	78,45898	0,01005	54,001854	73,478775	0,010125
	55,001907	107,660599	0,010100	55,00187	78,27179	0,01020	55,001915	73,359169	0,010165

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO ESTÁTICA

	56,000015	107,513016	0,010109	56,00190	78,00470	0,01012	56,001945	73,118385	0,010135
	57,001999	107,177574	0,010143	57,00195	77,78574	0,01009	57,001991	72,921951	0,010004
	58,000015	106,883003	0,010174	58,00217	77,52420	0,01012	58,000023	72,630836	0,010137
	59,000046	106,557991	0,009834	59,00001	77,32378	0,01017	59,000053	72,366249	0,010125
	60,000092	106,271774	0,010311	60,00008	77,10774	0,01004	60,000099	72,190353	0,010128
ACELERAÇÃO	20,000000	89,987709	0,100416	20,00000	80,98678	0,10013	20,000000	79,154480	0,100193
	40,000000	78,795105	0,187723	40,00000	81,73363	0,18732	40,000000	79,097443	0,187327
	60,000000	80,464928	0,351288	60,00000	85,01210	0,35110	60,000000	80,908150	0,351292
	80,000000	79,325325	0,658137	80,00000	86,08766	0,65805	80,000000	81,414200	0,657991
	100,000000	79,442787	1,232948	100,00000	88,17406	1,23277	100,000000	82,999870	1,232833
	120,000000	82,255455	2,310192	120,00000	90,07153	2,31014	120,000000	84,851555	2,310153
	140,000000	89,344719	4,328682	140,00000	95,01157	4,32874	140,000000	89,235664	4,328718
	160,000000	105,540482	8,111156	160,00000	104,63951	8,11124	160,000000	97,773888	8,111301
	180,000000	129,106583	15,198842	180,00000	116,02250	15,19911	180,000000	108,256393	15,199140
	200,000000	163,381210	28,480122	200,00000	127,30574	28,48045	200,000000	119,408607	28,480442
	220,000000	180,177353	53,367447	220,00000	144,59537	53,36708	220,000000	137,597351	53,367027
240,000000	212,553329	99,999924	240,00000	181,16171	100,00008	240,000000	174,874405	100,000061	
DESACELERAÇÃO	20,000000	223,871323	99,996719	20,00000	180,51984	99,99998	20,000000	174,018417	100,000008
	40,000000	202,169815	53,367134	40,00000	153,69102	53,36706	40,000000	145,189056	53,367115
	60,000000	179,950867	28,480469	60,00000	132,53033	28,48045	60,000000	124,188583	28,480463
	80,000000	160,364914	15,199205	80,00000	118,64635	15,19917	80,000000	110,351700	15,199201
	100,000000	144,489029	8,111401	100,00000	108,72610	8,11133	100,000000	100,135529	8,111354
	120,000000	129,673294	4,328890	120,00000	101,66939	4,32880	120,000000	93,186577	4,328786
	140,000000	118,891800	2,310226	140,00000	95,72482	2,31014	140,000000	88,179436	2,310154
	160,000000	109,600754	1,232880	160,00000	91,04411	1,23291	160,000000	83,969574	1,232858
	180,000000	99,809006	0,658150	180,00000	85,81992	0,65808	180,000000	78,878662	0,657968
	200,000000	88,784111	0,351467	200,00000	81,29182	0,35126	200,000000	74,464546	0,351273
	220,000000	78,565239	0,187538	220,00000	76,50842	0,18745	220,000000	70,162148	0,187426
240,000000	72,198730	0,100183	240,00000	72,86527	0,09992	240,000000	67,535507	0,100141	

Fonte: O autor

Tabela 29 - Ensaios reológicos aos 60 min – P-E30, P-F20 e P-EFI20

			60 min					
P-E30			P-F20			P-EFI20		
t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)	t (s)	τ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (1/s)
1,000053	17,403149	0,000466	1,000015	17,397335	0,000440	1,000023	17,617176	0,000137
2,000175	33,384914	0,001491	2,000023	33,573536	0,001288	2,000076	35,074966	0,000434
3,000107	48,988201	0,001274	3,000053	49,400642	0,001161	3,000130	51,966114	0,000641
4,000137	64,547096	0,001444	4,000084	65,385681	0,001077	4,000137	68,744759	0,000627
5,000252	78,754364	0,002820	5,000122	81,047310	0,001410	5,000160	85,606674	0,000594
6,000229	87,667961	0,007883	6,000267	95,409592	0,002688	6,000229	102,463066	0,000654
7,000259	87,206123	0,010754	7,000244	106,047089	0,005727	7,000237	119,076859	0,000896
8,000290	86,429314	0,010451	8,000237	108,188553	0,010401	8,000290	135,070511	0,001415
9,000320	85,523041	0,010528	9,000267	106,454292	0,010918	9,000298	149,357635	0,002806
10,000336	84,621071	0,010426	10,000343	104,965569	0,010781	10,000336	158,304031	0,007438
11,000389	83,762016	0,010470	11,000351	103,661469	0,010592	11,000443	157,857971	0,011510
12,000420	83,052902	0,010336	12,000381	102,505280	0,010672	12,000420	155,587143	0,010964
13,000450	82,361374	0,010458	13,000397	101,342262	0,010531	13,000450	153,871979	0,011006
14,000481	81,816727	0,010319	14,000443	100,469078	0,010548	14,000496	152,285538	0,010701
15,000557	81,231293	0,010346	15,000465	99,550415	0,010463	15,000519	150,957672	0,010733
16,000610	80,777092	0,010222	16,000511	98,822548	0,010363	16,000565	149,843002	0,010511
17,000603	80,344940	0,010314	17,000542	98,219307	0,010283	17,000595	149,104462	0,010356
18,000633	80,023514	0,010116	18,000610	97,681793	0,010327	18,000664	148,404999	0,010310
19,000664	79,802589	0,010269	19,000755	97,262215	0,010285	19,000656	148,132599	0,010120
20,000854	79,559113	0,010055	20,000702	96,902466	0,010252	20,000694	147,942123	0,010112
21,000748	79,339340	0,010017	21,000694	96,672104	0,010053	21,000748	147,679550	0,010297
22,000778	79,132896	0,010183	22,000725	96,490181	0,010163	22,000755	147,313156	0,010129
23,000809	78,963470	0,010028	23,000755	96,219582	0,010063	23,000786	147,007645	0,010237
24,000839	78,641327	0,010199	24,000786	96,130669	0,010153	24,000816	146,952621	0,009992
25,000870	78,556152	0,010127	25,000816	96,004501	0,010128	25,000946	146,676071	0,010240
26,000900	78,492386	0,009959	26,000908	95,529762	0,010132	26,000961	146,315170	0,010200
27,000938	78,481979	0,009946	27,000900	95,586601	0,009893	27,000938	146,098190	0,009978
28,001160	78,429710	0,010054	28,000923	95,571289	0,009985	28,001038	145,969849	0,010064
29,000999	78,395782	0,010052	29,000946	95,514137	0,009997	29,000999	145,917557	0,010060
30,001053	78,426384	0,009909	30,000992	95,411102	0,010100	30,001030	145,858414	0,009996
31,001083	78,357979	0,009992	31,001045	95,418518	0,010075	31,001083	145,444260	0,010277
32,001221	78,290634	0,010102	32,001068	95,443245	0,010160	32,001122	145,445755	0,009859
33,001144	78,228020	0,009918	33,001083	95,239174	0,010027	33,001144	145,465057	0,009959
34,001221	78,167244	0,010025	34,001122	95,125191	0,010093	34,001183	144,995361	0,010364
35,001236	78,091278	0,010133	35,001152	94,773964	0,010059	35,001213	144,779480	0,010014
36,001266	78,030113	0,010028	36,001228	94,722343	0,010022	36,001259	144,740494	0,010131
37,001305	77,889687	0,010004	37,001244	94,623100	0,010096	37,001282	144,631592	0,010038
38,001335	77,778320	0,010269	38,001282	94,464027	0,010197	38,001328	144,603439	0,010006
39,001366	77,655670	0,010088	39,001312	94,301613	0,010070	39,001343	144,217377	0,010148
40,001411	77,441528	0,010183	40,001358	94,090385	0,010109	40,001373	144,358994	0,010065
41,001442	77,228378	0,009940	41,001389	94,037926	0,010237	41,001480	144,288757	0,009986
42,001457	77,062813	0,010137	42,001419	93,802505	0,010069	42,001450	144,210419	0,009971
43,001503	76,893829	0,010015	43,001465	93,602699	0,010070	43,001495	143,954437	0,010168
44,001518	76,601616	0,010110	44,001480	93,534767	0,010045	44,001511	143,918427	0,009866
45,001564	76,424568	0,010080	45,001602	93,296341	0,010168	45,001556	143,716934	0,010075
46,001595	76,133072	0,010292	46,001602	93,221489	0,010073	46,001617	143,725113	0,010226
47,001640	75,966888	0,010143	47,001587	93,005333	0,010223	47,001709	143,556168	0,009961
48,001671	75,829201	0,010066	48,001633	92,988991	0,009883	48,001709	143,606689	0,010133
49,001701	75,618668	0,010107	49,001648	92,798271	0,010128	49,001694	143,378082	0,010065
50,001747	75,468018	0,010134	50,001694	92,612152	0,010080	50,001755	143,410431	0,009983
51,001778	75,325119	0,010090	51,001724	92,501602	0,010119	51,001785	143,511200	0,009990
52,001808	75,099373	0,010258	52,001816	92,212524	0,010138	52,001846	143,481689	0,010068
53,001854	74,833290	0,010141	53,001801	92,114433	0,010114	53,001862	143,244873	0,010037
54,001900	74,610176	0,010042	54,001816	91,941177	0,010197	54,001846	143,033630	0,010219
55,001930	74,365257	0,010153	55,001862	91,827911	0,009983	55,002014	142,880707	0,010214

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO ESTÁTICA

	56,001961	74,209946	0,010089	56,001892	91,568069	0,010130	56,001938	142,600174	0,010046
	57,002007	73,902115	0,010111	57,001984	91,411957	0,010080	57,001999	142,331268	0,010211
	58,000023	73,692551	0,010133	58,002029	91,133362	0,010150	58,000015	141,748642	0,010260
	59,000130	73,480591	0,010110	59,001999	90,814369	0,010120	59,000046	141,564163	0,010134
	60,000099	73,191551	0,010130	60,000076	90,764420	0,010121	60,000092	141,099716	0,010018
ACELERAÇÃO	20,000000	77,984795	0,100157	20,000000	93,753960	0,100343	20,000000	132,244415	0,100369
	40,000000	77,086548	0,187354	40,000000	94,321877	0,187534	40,000000	129,064087	0,187679
	60,000000	77,545219	0,351267	60,000000	95,423485	0,351128	60,000000	131,331879	0,351471
	80,000000	78,682518	0,658016	80,000000	98,197281	0,658035	80,000000	133,627441	0,657994
	100,000000	80,087677	1,232925	100,000000	100,047882	1,232892	100,000000	138,164291	1,233002
	120,000000	81,578178	2,310127	120,000000	102,696434	2,310158	120,000000	140,642334	2,310227
	140,000000	85,948524	4,328720	140,000000	108,582115	4,328688	140,000000	146,119736	4,328736
	160,000000	93,953270	8,111288	160,000000	118,656853	8,111289	160,000000	158,548538	8,111199
	180,000000	103,839668	15,199155	180,000000	130,952408	15,199162	180,000000	179,693985	15,199073
	200,000000	116,222466	28,480433	200,000000	143,672745	28,480421	200,000000	198,651535	28,480488
	220,000000	135,393158	53,367031	220,000000	164,566788	53,367111	220,000000	214,926376	53,366844
	240,000000	170,984192	100,000076	240,000000	203,822708	100,000008	240,000000	256,882507	100,000061
DESACELERAÇÃO	20,000000	170,336655	100,000023	20,000000	203,869492	100,000053	20,000000	256,984589	99,999878
	40,000000	143,192352	53,367077	40,000000	175,476349	53,367142	40,000000	220,628342	53,367126
	60,000000	122,477783	28,480450	60,000000	150,901077	28,480463	60,000000	194,771454	28,480450
	80,000000	108,443939	15,199193	80,000000	134,909424	15,199168	80,000000	177,760880	15,199127
	100,000000	98,329666	8,111364	100,000000	123,929123	8,111315	100,000000	165,591797	8,111354
	120,000000	91,311592	4,328806	120,000000	115,634415	4,328813	120,000000	155,085388	4,328797
	140,000000	85,803246	2,310187	140,000000	108,505127	2,310209	140,000000	142,671722	2,310339
	160,000000	81,142532	1,232967	160,000000	102,305237	1,232956	160,000000	132,662079	1,233156
	180,000000	77,638268	0,657962	180,000000	95,664940	0,658055	180,000000	124,314201	0,658038
	200,000000	73,387886	0,351327	200,000000	90,900444	0,351376	200,000000	113,543587	0,351330
	220,000000	69,653427	0,187663	220,000000	85,331566	0,187383	220,000000	101,345116	0,187591
	240,000000	64,759499	0,099987	240,000000	79,923897	0,100082	240,000000	91,117950	0,100302

Fonte: O autor

B) Ensaio no estado fresco em argamassas

Tabela 30 - Ensaio no estado fresco, com medidas intermediárias de *slump flow*

		A-REF	A-E10	A-E20	A-E30	A-F20	A-EFI20	
10 min	Mini <i>slump flow</i>	d1 (mm)	246	286	294	315	285	260
		d2 (mm)	250	290	300	322	290	266
		Média (mm)	248	288	297	319	288	263
	Mini funil V (s)	4,35	2,45	3,24	2,50	2,66	2,59	
60 min	Mini <i>slump flow</i>	d1 (mm)	215	261	254	264	245	237
		d2 (mm)	215	265	251	267	245	238
		Média (mm)	215	263	253	266	245	238
	Mini funil V (s)	6,68	3,50	4,38	3,18	4,41	3,38	
Densidade de massa (kg/m ³)		2248	2256	2238	2238	2238	2243	
Densidade teórica (kg/m ³)		2262	2261	2260	2260	2251	2260	
Ar incorporado (%)		0,60	0,22	1,00	0,97	0,56	0,77	

Fonte: O autor

C) Ensaio de resistência à compressão

Tabela 31 - Resistência à compressão das argamassas

Amostra	CPs	Força (tf)	Diâmetro (mm)			Altura (mm)			Rel. h/d	Área (mm ²)	Res. (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
			D1	D2	Média	D1	D2	Média					
A-REF	CP1	14,50	49,78	50,04	49,91	97,62	98,04	97,83	1,96	1956,43	72,7	67,5	3,7
	CP2	13,05	50,23	50,16	50,20	97,66	97,84	97,75	1,95	1978,84	64,7		
	CP3	13,10	50,15	50,24	50,20	96,61	97,34	96,98	1,93	1978,84	64,9		
	CP4	11,65	50,11	49,88	50,00	97,30	97,53	97,42	1,95	1963,10	58,2*		
	CP5	12,25	50,23	49,83	50,03	97,01	97,13	97,07	1,94	1965,85	61,1*		
	CP6	13,60	50,22	49,87	50,05	96,77	97,40	97,09	1,94	1967,03	67,8		
A-E10	CP1	12,20	50,19	49,99	50,09	95,51	95,71	95,61	1,91	1970,57	60,7*	64,3	1,6
	CP2	12,90	50,00	49,98	49,99	92,61	93,12	92,87	1,86	1962,71	64,5		
	CP3	13,20	50,04	49,90	49,97	93,37	93,50	93,44	1,87	1961,14	66,0		
	CP4	12,10	50,00	49,89	49,95	97,56	97,54	97,55	1,95	1959,18	60,6*		
	CP5	12,90	50,15	50,00	50,08	97,56	97,54	97,55	1,95	1969,39	64,3		
	CP6	12,50	50,04	50,13	50,09	96,02	95,97	96,00	1,92	1970,18	62,2		
A-E20	CP1	11,45	50,02	49,98	50,00	94,86	95,30	95,08	1,90	1963,50	57,2*	63,2	2,0
	CP2	12,30	50,14	50,15	50,15	94,79	95,13	94,96	1,89	1974,90	61,1*		
	CP3	12,55	49,63	49,65	49,64	95,10	95,82	95,46	1,92	1935,32	63,6		
	CP4	12,20	49,85	49,81	49,83	94,77	94,87	94,82	1,90	1950,17	61,4		
	CP5	12,45	50,13	50,06	50,10	92,65	92,50	92,58	1,85	1970,96	62,0		
	CP6	13,15	49,90	49,95	49,93	94,57	94,75	94,66	1,90	1957,61	65,9		
A-E30	CP1	11,30	49,97	49,90	49,94	96,60	97,28	96,94	1,94	1958,39	56,6*	58,7	2,2
	CP2	9,90	50,10	50,00	50,05	94,60	95,27	94,94	1,90	1967,42	49,4*		
	CP3	11,55	49,77	50,03	49,90	95,75	95,83	95,79	1,92	1955,65	57,9		
	CP4	11,50	49,92	49,99	49,96	95,98	96,00	95,99	1,92	1959,96	57,6		
	CP5	11,50	50,08	50,05	50,07	96,82	97,21	97,02	1,94	1968,60	57,3		
	CP6	12,30	49,85	49,81	49,83	92,96	93,10	93,03	1,87	1950,17	61,9		
A-F20	CP1	11,90	49,88	49,92	49,90	95,85	95,51	95,68	1,92	1955,65	59,7	58,3	3,3
	CP2	11,70	50,14	50,11	50,13	96,44	95,73	96,09	1,92	1973,33	58,2		
	CP3	10,70	49,87	49,86	49,87	95,54	95,74	95,64	1,92	1952,91	53,7		
	CP4	10,00	49,99	49,95	49,97	95,43	95,70	95,57	1,91	1961,14	50,0*		
	CP5	10,30	49,86	49,87	49,87	96,25	96,77	96,51	1,94	1952,91	51,7*		
	CP6	12,30	49,86	50,01	49,94	95,12	95,41	95,27	1,91	1958,39	61,6		
A-EFI 20	CP1	13,00	50,08	49,93	50,01	95,72	95,92	95,82	1,92	1963,89	64,9	62,9	2,2
	CP2	11,30	49,90	49,92	49,91	94,81	93,00	93,91	1,88	1956,43	56,7*		
	CP3	13,00	50,13	50,10	50,12	96,11	96,10	96,11	1,92	1972,54	64,7		
	CP4	11,85	49,95	49,96	49,96	95,04	95,70	95,37	1,91	1959,96	59,3*		
	CP5	12,15	50,01	49,94	49,98	97,32	97,51	97,42	1,95	1961,53	60,8		
	CP6	12,20	49,98	49,88	49,93	95,57	95,60	95,59	1,91	1958,00	61,1		

Asterisco (*) indica valores desconsiderados para a determinação da resistência à compressão

Fonte: O autor