

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIELLA TINTORI NASCIMENTO
LUCAS ULIANA REZENDE

**AVALIAÇÃO DO USO DE ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL COM DIFERENTES
TEMPOS DE MOAGEM COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

VITÓRIA - ES
2023

GABRIELLA TINTORI NASCIMENTO
LUCAS ULIANA REZENDE

**AVALIAÇÃO DO USO DE ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL COM DIFERENTES
TEMPOS DE MOAGEM COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

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

Orientadora: Prof. Dra Rudiele Aparecida
Schankoski

VITÓRIA - ES
2023

GABRIELLA TINTORI NASCIMENTO
LUCAS ULIANA REZENDE

**AVALIAÇÃO DO USO DE ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL COM DIFERENTES
TEMPOS DE MOAGEM COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR**

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

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dra. Rudiele Aparecida Schankoski
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Dra. Letícia Oliveira de Souza
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Vitória – ES, 24 de Julho de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossos mais sinceros agradecimentos a nossa Orientadora Rudiele Aparecida Schankoski por todo o apoio durante a elaboração do nosso Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Suas orientações, sugestões e críticas foram fundamentais para o desenvolvimento, aprimoramento e conclusão desta pesquisa. Somos muito gratos pela disponibilidade de responder nossos questionamentos ao longo do trabalho, nos motivando a superar todos os percalços e fazendo a gente crescer tanto pessoal como profissional.

Também agradecemos à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela oportunidade de realizar este TCC e aos professores que contribuíram indiretamente para o nosso aprendizado ao longo da graduação. Além dos técnicos do LEMAC (Luana, Henrique, Breno e Márcio) por toda a ajuda e acompanhamento na hora de realizar os ensaios.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos nossos familiares e amigos que nos apoiaram durante toda essa etapa, compreendendo nossas ausências e incentivando-nos a buscar sempre o melhor.

O sucesso deste TCC não seria possível sem a ajuda de todos vocês. Mais uma vez, muito obrigado por tudo.

Atenciosamente,

Gabriella Tintori Nascimento e Lucas Uliana Rezende.

RESUMO

A escória de feroníquel, um subproduto da indústria metalúrgica de níquel, apresenta potencial para reduzir a demanda de cimento Portland e os impactos ambientais associados à sua produção, além de promover o reaproveitamento de resíduos industriais. Dentro desse contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho da escória de feroníquel em diferentes finuras em substituição de 20% do Cimento Portland. Para isso, a escória in natura foi moída em 6 tempos diferentes (de 1 a 6 horas) em moinho de bolas. Cada granulometria foi avaliada considerando os ensaios de resistência à compressão, resíduo insolúvel, massa específica, perda ao fogo, permeabilidade de Blaine, MEV, EDS, além da análise das propriedades das misturas no estado fresco, pelo índice de consistência, massa específica e teor de ar incorporado. Os resultados foram comparados com as especificações da norma para cimento Portland composto. Os resultados indicaram uma melhora no índice de consistência em metade das amostras de escória de feroníquel analisadas e uma diminuição na resistência à compressão de até 17% para a idade de 7 dias e de até 25% para a idade de 28 dias.

Palavras-chave: escória de feroníquel, cimento Portland, substituição, resistência mecânica, finura.

ABSTRACT

Ferrony slag, a by-product of the nickel metallurgical industry, has the potential to reduce the demand for Portland cement and the environmental impacts associated with its production, as well as promote the reuse of industrial waste. Within this context, this study aimed to evaluate the performance of ferronickel slag in different finuras in replacement of 20% of Portland Cement. For this, the slag in natura was ground in 6 different times (from 1 to 6 hours) in a ball mill. Each particle size was evaluated considering the tests Compressive Strength, Insoluble Residue, Specific Mass, Fire Loss, Blaine Permeability, SEM, EDS in addition to the characterization in the fresh state, by Consistency index, Specific Mass and Entrained air content. The results were compared with the specifications of the standard for composite Portland cement. The results indicated an improvement in the consistency index in half of analyzed ferronickel slag samples and a decrease in compression strength of up to 17% for the 7 days age and of up to 25% for the 28 days age.

Keywords: ferronickel slag, Portland cement, replacement, mechanical strength, fineness.

LISTA DE ABREVIAÇÕES

- NI - Níquel
- FNS - Escória de Ferroníquel
- RKEF - Processo de Forno Elétrico Rotativo
- EFFS - Escória de Ferroníquel de Forno Elétrico a Arco
- BFFS - Escória de Ferroníquel de Alto Forno
- FNS - W - Escória de Ferroníquel resfriada a água
- FNS - A - Escória de Ferroníquel resfriada a ar
- NBR - Norma Brasileira
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- SNIC - Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
- WBCSD - World Business Council for Sustainable Development
- RS - Cimento Portland Resistente a Compostos Sulfáticos
- BC - Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação
- USGS - United States Geological Survey
- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
- SCM - Materiais Cimentícios Suplementares
- CP V ARI - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
- CT - Centro Tecnológico
- LEMAC - Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção
- UFES - Universidade Federal do Espírito Santo
- FE - Ferro
- LUCCAR - Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins
- MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
- EDS - Detector de Energia Dispersiva de Raios
- EMIC - Nome da Fabricante da prensa hidráulica
- CPII - E - Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno
- CPII - F - Cimento Portland composto com material carbonático
- LMIC - Laboratório de Microscopia e Microanálises

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema processo RKEF	16
Figura 2 - FNS (a) refrigerado a ar e (b) refrigerado a água	19
Figura 3 - Processo de fabricação do cimento	21
Figura 4 - Consumo de cimento no Brasil e no mundo (em milhões de toneladas) ..	27
Figura 5 - Comparação da produção de cimento e aço bruto com a população ..	27
Figura 6 - Teor de água para consistência normal de pasta contendo diferentes porcentagens de escória de feroníquel	30
Figura 7 - Resistência à compressão de argamassas contendo diferentes porcentagens de escória de feroníquel em substituição ao cimento	32
Figura 8 - Escória de feroníquel granulada estocada	34
Figura 9 - Escória de feroníquel granulada antes secagem em estufa	35
Figura 10 - Moinho de bolas utilizado na moagem da FNS.....	36
Figura 11 - Mufla utilizada para eliminação da matéria orgânica da areia	37
Figura 12 - Procedimento para obtenção da massa específica do FNS	39
Figura 13 - Aparelho de permeabilidade Blaine utilizado no ensaio.....	41
Figura 14 - Amostras identificadas enviadas ao LUCCAR	42
Figura 15 - Representação esquemática do MEV	43
Figura 16 - Consistência da argamassa logo após preparação	47
Figura 17 - Recipiente usado para cálculo da massa específica.....	48
Figura 18 - Corpos de prova usados na moldagem	50
Figura 19 - Corpos de prova após a moldagem	51
Figura 20 - Cura inicial ao ar	51
Figura 21 - Identificação dos corpos de prova.....	52
Figura 22 - Corpos de prova submersos em tanques na câmara úmida	52
Figura 23 - Utilização do paquímetro digital para medição dos corpos de prova.	53
Figura 24 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão	54
Figura 25 - Massas específicas do Cimento Portland e das FNS	55
Figura 26 - Superfície Específica do Cimento Portland e da FNS.....	56
Figura 27 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). (a) MEV do lote Referência; (b) MEV do lote 1 de FNS; (c) MEV do lote 2 de FNS; (d) MEV do lote 3 de FNS; (e) MEV do lote 4 de FNS; (f) MEV do lote 5 de FNS; (g) MEV do lote 6	58

Figura 28 - Diâmetro médio das argamassas obtidos no ensaio de índice de consistência. (a) Medida de um dos diâmetros do lote Referência; (b) Medida de um dos diâmetros do lote 1 de FNS; (c) Medida de um dos diâmetros do lote 2 de FNS; (d) Medida de um dos diâmetros do lote 6 de FNS.....	62
Figura 29 - Diâmetro médio das argamassas obtidos no ensaio de índice de consistência.....	63
Figura 30 - Massa específica das argamassas do CPV e dos lotes de FNS	64
Figura 31 - Resistência mecânica à compressão para os lotes referência e FNS	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Minas de níquel laterítico, configuração de processamento e empresas (dados de 2008)	14
Tabela 2 - Principais compostos do cimento	22
Tabela 3 - Limites de composição do cimento Portland (Porcentagem de massa) ...	23
Tabela 4 - Requisitos físico-mecânico dos tipos de cimento	25
Tabela 5 - Requisitos químicos dos tipos de cimento	25
Tabela 6 - Procedimentos usados na pesquisa.....	37
Tabela 7 - Tabela A.1 do anexo A da norma ABNT NBR 16372.....	41
Tabela 8 - Composição química do cimento e dos lotes de FNS	59
Tabela 9 - Valores obtidos de Perda ao fogo	60
Tabela 10 - Valores obtidos no ensaio de Resíduo Insolúvel.....	60
Tabela 11 - Índice de cimento para as argamassas produzidas	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Produção de níquel	14
2.1.1	Processo de forno elétrico rotativo (RKEF)	15
2.1.2	Escória de Ferroníquel	17
2.2	Cimento Portland	19
2.2.1	Matérias primas	20
2.2.2	Fabricação do Cimento Portland	20
2.2.3	Composição química do cimento Portland	22
2.2.4	Tipo de cimento Portland.....	23
2.3	Escória de Ferroníquel no Cimento Portland	26
2.3.1	Desempenho de FNS como material cimentício suplementar	30
3	ANÁLISE EXPERIMENTAL	33
3.1	Materiais.....	33
3.1.1	Cimento	33
3.1.2	Escória de ferroníquel (FNS)	33
3.1.3	Areia	34
3.2	Métodos	34
3.2.1	Preparação das amostras.....	34
3.2.2	Caracterização dos materiais	37
3.2.3	Dosagem de argamassas.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1	Caracterização físico-química	55
4.1.1	Massa específica	55
4.1.2	Permeabilidade de Blaine	56
4.1.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	57
4.1.4	Detector de energia dispersiva de raios-X (EDS)	59
4.1.5	Perda ao fogo	60
4.1.6	Resíduo Insolúvel	60
4.2	Ensaios em argamassa	61
4.2.1	Índice de consistência	61
4.2.2	Massa específica e teor de ar incorporado	63
4.3	Resistência à compressão	64
5	CONCLUSÃO	67
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68

7 APÊNDICE	69
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil desempenha um papel significativo no consumo de recursos naturais e na emissão de gases de efeito estufa, sendo responsável 7% do uso industrial global de energia e 27% das emissões industriais globais de carbono (WBCSD E IEA, 2018). Diante dos desafios ambientais e da busca por práticas mais sustentáveis, torna-se necessário explorar alternativas que reduzam o impacto ambiental sem comprometer a qualidade e desempenho dos materiais de construção. Nesse contexto, a substituição parcial do cimento Portland por adições minerais tem despertado interesse como uma solução promissora.

A escória de feroníquel, um subproduto da produção de ligas metálicas de níquel e ferro, apresenta características que a tornam uma possível adição mineral no cimento Portland. Além de ser uma alternativa para o descarte adequado de resíduos industriais, a escória de feroníquel possui propriedades pozolânicas, que podem contribuir para o desenvolvimento da resistência da mistura em idades tardias (LEMONIS et al., 2015). No entanto, a eficácia dessa substituição depende de fatores como o teor de adição e a finura da escória.

A fim de se obter um melhor entendimento sobre a influência desse material em matrizes cimentícias, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho da escória de feroníquel moída, com diferentes tempos de moagem e, consequentemente, finuras distintas, em substituição ao cimento Portland, considerando os ensaios prescritos na ABNT NBR 16697, por meio de ensaios para análises das propriedades físicas, químicas e mecânicas de cimento Portland composto com 20% dessa escória. Os resultados fornecerão subsídios para o desenvolvimento de diretrizes e recomendações para a utilização eficiente e sustentável desse material como adição mineral no setor da construção civil.

Dessa forma, espera-se que este estudo possa contribuir para a adoção de práticas mais sustentáveis na indústria da construção, ao mesmo tempo em que promove a valorização de resíduos industriais e a melhoria do desempenho dos materiais de construção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção de níquel

O níquel e os materiais contendo níquel desempenham um papel crucial na sociedade moderna, com uso em vários tipos de infraestrutura e tecnologia, além do seu uso na produção de ligas, baterias e placas elétricas (NAKAJIMA et al. 2017). Aproximadamente 70% do níquel primário é consumido na fabricação de aço inoxidável (RAO et al., 2013).

Segundo Mudd (2010), o níquel (Ni) está comumente presente em dois tipos principais de minério: sulfeto de níquel e níquel laterítico. A produção de Ni é relativamente difundida em todo o mundo, embora concentrada em um pequeno número de países e empresas. Uma compilação de minas de sulfeto de Ni e laterita é fornecida na Tabela 1, incluindo a configuração de processamento e empresas.

Tabela 1 - Minas de níquel laterítico, configuração de processamento e empresas (dados de 2008)

Project, country	Ore (kt)	%Ni	%Co	kt Ni	t Co	Process	Company
Sorowako, Indonesia	4675	2.10	nd	72.4	nd	RKEF	Vale Inco/PT Inco
Doniambo, New Caledonia ^a	2930 ^a	2.0 ^a	–	51.1	–	RKEF	SLN/Eramet
Cerro Matoso, Colombia ^a	~2415 ^a	~2.3 ^a	–	41.6 ^b	–	RKEF	BHP Billiton
Yabulu, Australia	nd	nd	nd	35.1	1600	Caron	BHP Billiton
Moa Bay, Cuba ^a	2881 ^a	~1.5 ^a	~0.16 ^a	32.4	3428	HPAL	Sherritt International
Murrin Murrin, Australia	2446	1.43	~0.10	30.5	2018	HPAL	Minara Resources
Larco-Larymna, Greece ^{a,c}	2500 ^a	1.2 ^a	–	21.2	–	RKEF	Larco SA
Falcondo, Dominican Republic	1708	1.14	–	18.8	–	RKEF	Xstrata
Pomalaa, Indonesia	1113	1.58	–	17.6	–	RKEF	PT Antam
Kavadarci, Macedonia	~750	~2	nd	15.0	nd	RKEF	Feni Industries/Cunico
Loma de Niquel, Venezuela	677	1.6	–	10.9	–	RKEF	Anglo American
Rio Tuba (Coral Bay), Philippines ^a	858 ^a	1.5 ^a	–	9.7	–	HPAL	Sumitomo JV
Codemin, Brazil	476	2.1	–	9.1	–	RKEF	Anglo American
Ufaleynickel, Russia	nd	nd	nd	~9 ^a	nd	RKEF	OAO Ufaleynickel
Berong, Philippines ^{a,d}	~293 ^a	~1.48 ^a	nd	4.3 ^d	–	Caron ^f	Toledo Mining
Cawse, Australia	678	0.69	nd	3.7	–	HPAL	Norilsk Nickel
Total-laterite (Caron)	~293	~1.48	–	~35.1	~1600		
Total-laterite (HPAL)	~6900	~1.4	~0.12	76.3	~5500		
Total-laterite (RKEF)	~17,250	~1.0	nd	257.7	–		

Fonte: Mudd (2010)

Os recursos minerais de níquel sulfetado representam cerca de 30% das reservas mundiais. Já as lateritas, contêm cerca de 70% da estimativa mundial das reservas de níquel terrestre, apresentando-se como uma fonte relevante para a produção de níquel (DALVI et al., 2004). No entanto, as lateritas representam apenas cerca de 40% da produção mundial de níquel. A principal razão para isso é a dificuldade de processar lateritas de níquel em comparação com sulfetos – os minérios de laterita requerem tratamento extenso e complexo para extrair o níquel e,

historicamente, têm sido mais caros do que os minérios de sulfeto (NORGATE; JAHANSHAHI, 2011).

Segundo Liu et al. (2016), para a alteração na mineralogia original de minérios lateríticos, aplicam-se processos químicos, como os pirometalúrgicos ou hidrometalúrgicos.

Com as melhorias na tecnologia, a proporção de níquel primário produzido a partir de lateritas aumentou de forma constante na segunda metade do século passado, com 70% do níquel laterítico sendo produzido por processamento pirometalúrgico (WARNER et al., 2006).

O principal processo pirometalúrgico para produzir feroníquel a partir de minérios de níquel laterítico é o Rotary Kiln-Electric Furnace (RKEF) (ROMERO et al., 2022). Em 2019, estima-se que o processo RKEF tenha sido responsável pela produção de aproximadamente 15 milhões de toneladas de feroníquel, o que corresponde a dois terços da produção anual de níquel (LUO et al., 2021).

2.1.1 Processo de forno elétrico rotativo (RKEF)

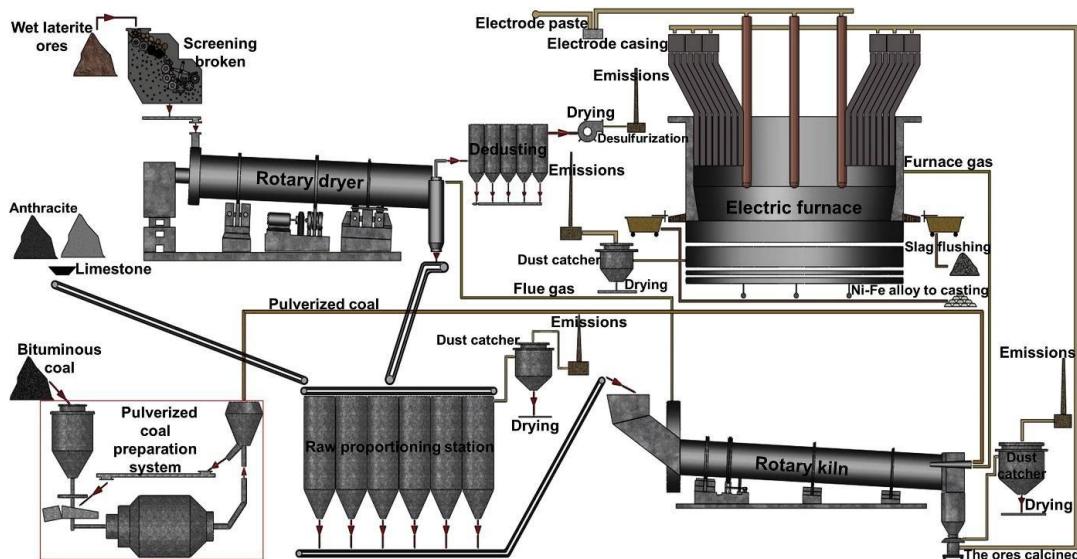
O processo de forno elétrico rotativo (RKEF) é um dos processos tecnológicos mais amplamente adotados para a produção de fundição de feroníquel. Este processo tem a vantagem de produzir alto teor de níquel/ferro a partir de produtos brutos de feroníquel, elementos menos nocivos, matérias-primas com forte adaptabilidade, alta eficiência de produção e processo maduro. No entanto, este processo também sofre com o alto consumo de energia e uma grande quantidade de subprodutos (por exemplo, escória e gás residual) (LIU et al, 2016). Para Dalvi et al. (2004), o alto consumo de energia é explicado pela remoção de toda umidade livre a água combinada no processo, sendo que todo o material tem que ser primeiro calcinado e depois derretido para formar a escória a cerca de 1600°C. Isso requer tanto combustíveis de hidrocarbonetos (carvão, petróleo ou nafta), quanto energia elétrica.

O processo pirometalúrgico envolve a calcinação e pré-redução do minério a 850–1000 °C em um forno rotativo, depois a fundição em um forno elétrico na presença de carbono para separar a fase contendo níquel/ferro da fase escória de sílica-magnésia (NORGATE; JAHANSHAHI, 2011).

A maioria dos processos pirometalúrgicos usa fluxograma convencional envolvendo secagem, calcinação/redução e fundição em forno elétrico (DALVI et al., 2004).

Um esquema do processo RKEF com secador rotativo, forno rotativo e forno elétrico é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema processo RKEF



Fonte: Liu et al. (2016)

A seguir são apresentadas as etapas do processo RKEF, de forma detalhada:

- Secagem: O minério de níquel é extraído, triturado, moído, seco em forno rotativo, em temperaturas que variam de 750°C a 800°C (HAM et al, 2023).
- Calcinação: Em seguida ocorre o pré-aquecimento (HAM et al, 2023). Nesta etapa ocorre a remoção da água de cristalização presente nos minerais. É utilizado forno rotativo, onde também são processadas reações de pré-redução das fases oxidadas de níquel (NiO) e ferro (Fe₂O₃), tendo como agente redutor carvão mineral ou biomassa (madeira), que são alimentados juntamente com o minério (GUIMARÃES, 2019).
- Redução: ocorre a remoção total do oxigênio ligado aos metais de interesse, níquel e ferro. O minério calcinado, além de reduzido por fonte de carbono, é fundido a temperaturas de aproximadamente 1600°C.

Nesta etapa são obtidos três produtos principais, a liga de feroníquel fundida, a escória líquida, onde se encontram compostos como o MgO, SiO₂ e Al₂O₃, e gases (GUIMARÃES, 2019).

- Refino: etapa de remoção de impurezas do metal líquido em forno panela, como enxofre e fósforo (GUIMARÃES, 2019). O metal bruto/fosco é posteriormente processado/refinado para produzir o produto final (DALVI et al., 2004).

2.1.2 Escória de Feroníquel

A escória de feroníquel (FNS) é um subproduto industrial gerado a partir da produção de aço inoxidável e ligas de níquel-ferro (LU et al., 2023).

Segundo Li et al. (2022), são geradas cerca de 14 toneladas de FNS por tonelada de feroníquel produzido. Atualmente, a quantidade de FNS utilizada em outros processos é de apenas 8%. Han e Hong (2018) afirmam que há uma grande quantidade de FNS que é despejada ou aterrada, ocupando uma enorme área de terra e lixiviando íons de metais pesados, além de causar poluição ambiental. FNS tornou-se o quarto maior tipo de resíduo industrial de fundição depois da escória de alto-forno, escória de aço e lama vermelha (HUANG et al., 2017).

A composição química do FNS consiste principalmente em SiO₂, MgO e Fe₂O₃ (SAHA; SARKER, 2016). É composto de minerais não cristalinos, bem como uma mistura de minerais cristalinos, como enstatita, forsterita e diopsídio (CHOI; CHOI, 2015). O conteúdo de minerais amorfos na escória de feroníquel é geralmente superior a 50% (KOMNITSAS et al., 2013).

De acordo com os métodos de fundição, a escória de feroníquel pode ser categorizada em dois tipos principais: escória de feroníquel de forno elétrico a arco (EFFS) e escória de feroníquel de alto forno (BFFS) (HAN et al., 2021). O método do forno elétrico é usado em todo o mundo e atualmente representa o principal método na produção de ligas de feroníquel, enquanto o método do alto-forno foi usado principalmente no passado e atualmente está restrito a alguns locais devido à falta de minerais ricos em níquel e ao alto demanda por ligas de feroníquel (WANG et al., 2018).

A escória de feroníquel de forno elétrico a arco (EFFS) é composta principalmente por SiO₂, MgO e Fe₂O₃, e sua composição mineral é formada

principalmente por minerais cristalinos como enstatita ($Mg_2Si_2O_6$), forsterita (Mg_2SiO_4) e hidropisia. Em contraste, a de alto forno, BFFS, consiste principalmente em SiO_2 , Al_2O_3 e CaO (WANG et al., 2018).

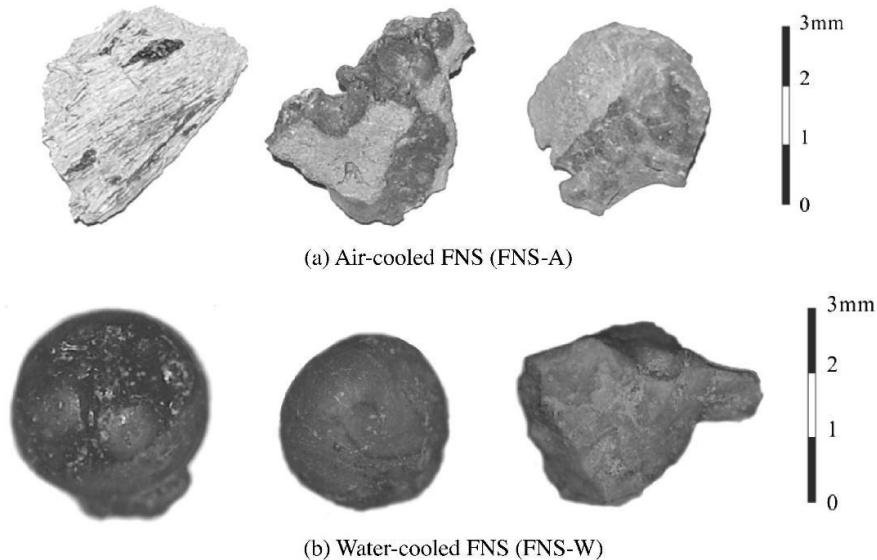
O EFFS exibe uma atividade pozolânica menor do que o BFFS devido ao seu menor teor de CaO e Al_2O_3 e maior teor de MgO e fases menos amorfas. (LI et al., 2022; HAN et al., 2023).

Para WANG et al. (2023), os materiais pozolânicos são resíduos sólidos contendo uma grande quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 altamente ativos, os quais apresentam grande variedade e diferentes propriedades. A capacidade do produto de reagir com $Ca(OH)_2$ à temperatura ambiente para produzir produtos hidráulicos contendo silício ou alumínio é caracterizado como a sua atividade pozolânica. Quanto mais forte for a sua atividade, mais adequado é para aplicação em sistemas cimentícios.

Segundo Choi e Choi (2015), dois tipos de FNS são produzidos, dependendo da velocidade de resfriamento, o FNS resfriado ao ar (FNS-A) e o FNS resfriado a água (FNS-W). A escória resfriada a ar é resfriada lentamente pelo ar em uma mina a céu aberto, enquanto a escória resfriada a água é resfriada rapidamente usando água.

A escória de ferroníquel resfriada a ar aparece na cor cinza na Figura 2 e apresenta uma superfície irregular após o resfriamento e, portanto, é necessário triturar para torná-lo útil como um agregado miúdo. Em contraste, o FNS resfriado a água é verde escuro e tem uma forma esférica após o resfriamento. O FNS-W tem um potencial significativo para ser usado como agregado miúdo para concreto devido à sua baixa taxa de absorção e tamanho de partícula semelhante ao dos agregados miúdos normalmente usados em concreto (CHOI; CHOI, 2015).

Figura 2 - FNS (a) refrigerado a ar e (b) refrigerado a água



Fonte: Choi; Choi (2015)

O potencial reativo da FNS refrigerado a água é alta em comparação com o FNS refrigerado a ar (CHOI; CHOI, 2015). Para Rahman et al., (2017), o processo de resfriamento ao ar relativamente lento leva a um menor teor da fase vítreia, o que reduz a atividade do FNS. O rápido resfriamento com água consome mais energia e é caro, no entanto, produz maiores quantidades de minerais amorfos.

Saha, Khan e Sarker (2018) destacam que as propriedades físicas e químicas da escória de subproduto podem variar significativamente dependendo do tipo de minério, do processo de fundição e da temperatura e do método de resfriamento. Portanto, a caracterização da escória deve ser efetuada sempre que houver variação nos fatores citados, bem como quando houver variação na fonte de extração do minério.

2.2 Cimento Portland

Atualmente, a NBR 16697 (ABNT, 2018) define o cimento Portland como um ligante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), praticamente sem cal livre (CaO). Estes silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, oferecendo elevada resistência mecânica.

2.2.1 Matérias primas

Os cimentos Portland são constituídos principalmente de material calcário, como rocha calcária ou giz, e de alumina e sílica encontradas em argilas ou folhelhos. Com proporções determinadas de matérias-primas, realiza-se a moagem e posteriormente a queima, em temperaturas de aproximadamente 1450°C, em fornos rotativos (NEVILLE, 2016).

O calcário é constituído basicamente de carbonato de cálcio (CaCO_3), mas se apresenta na natureza acompanhado de diversas impurezas como óxidos de ferro, alumínio e silício, que são benéficos, e outros como o óxido de magnésio, sódio e potássio que são, na maioria das vezes, indesejáveis. A cal, que é a parte que realmente interessa na fabricação do cimento, cobre apenas 56% do total da matéria bruta. A argila usada na fabricação do cimento é essencialmente composta de silicatos de alumínio hidratados, óxidos de ferro, alumínio e silício, essenciais para fabricação do cimento. O minério de ferro é usado para suprir as deficiências da argila frente a alguns de seus componentes que se mostram insuficientes ao processo. O gesso apresenta-se na natureza em grandes jazidas sedimentares chamadas de evaporitos sob a forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemi-hidratado ou bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4). A gipsita é a forma mais usada na indústria cimenteira. O gesso é usado no cimento para regular o tempo de pega, ou seja, mantê-lo trabalhável por mais tempo e isto funciona na medida em que esta forma uma espécie de película ou membrana que envolve as partículas do cimento, retardando seu endurecimento. É um produto de adição final do processo (LIMA, 2011).

Segundo Neville (2016), após a queima, as matérias-primas são sinterizadas e parcialmente fundidas, tomando a forma de esferas conhecidas como clínqueres. O clínquer é resfriado e recebe a adição de um pequeno teor de sulfato de cálcio, sendo então moído até se tornar um pó bastante fino. O material resultante é o cimento Portland.

2.2.2 Fabricação do Cimento Portland

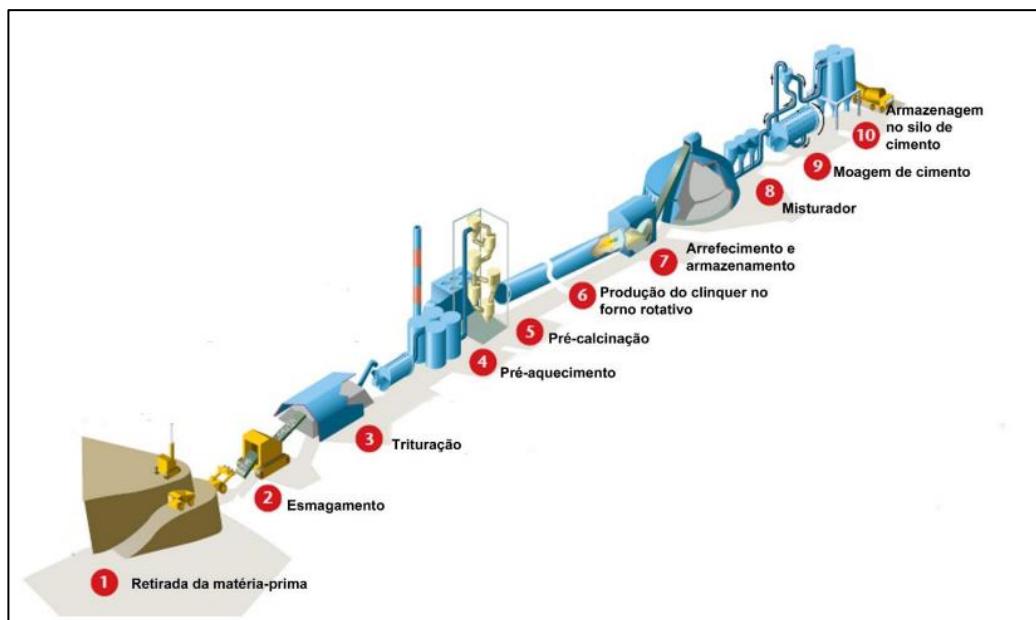
O processo produtivo do cimento é, resumidamente, uma combinação de exploração e beneficiamento de substâncias minerais não metálicas, sua transformação química em clínquer (produto intermediário do cimento) em um forno a

cerca de 1.450°C e posterior moagem e mistura a outros materiais, conforme o tipo de cimento (CNI, 2012).

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2022), o processo produtivo do cimento Portland consiste nas seguintes etapas, também apresentadas na Figura 3:

- Extração de matéria-prima
- Esmagamento
- Moinho cru
- Homogeneização de farinha crua
- Calcinação
- Moagem de clínquer
- Transporte

Figura 3 - Processo de fabricação do cimento



Fonte: WBCSD (2009)

O processo de fabricação pode ocorrer por via úmida ou via seca (SHEN et al., 2015). No processo úmido de fabricação de cimento, a moagem e homogeneização da mistura crua é realizada em forma de uma pasta contendo de 30 a 40% de água. Modernas fábricas de cimento favorecem o processo seco, que é mais eficiente energeticamente do que o processo úmido, porque a água utilizada para a lama deve ser subsequentemente evaporada antes da operação de clínquer (MEHTA;

MONTEIRO, 2006). Atualmente, a maior parte do cimento nacional é produzido por via seca que, apesar de exigir maiores cuidados quanto à poluição (exige coletores de pó nas chaminés), tem-se mostrado mais econômico (SCHANKOSKI, 2020).

2.2.3 Composição química do cimento Portland

A composição potencial do cimento é obtida a partir de sua análise química, isto é, da determinação das quantidades relativas dos silicatos e dos aluminatos que se formaram durante a produção do clínquer, sendo as suas proporções o fator determinante de várias das propriedades do cimento, por exemplo, a resistência à compressão, calor de hidratação, resistência química, permeabilidade, porosidade etc. (SOUZA; RIPPER, 1998).

Os principais compostos do cimento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais compostos do cimento

Compostos	Notações químicas dos cimentos	Notações químicas condensadas
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferro-Aluminato Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Neville (2016)

Neville (2016) afirma que as proporções reais dos diversos compostos variam sensivelmente de um cimento para outro. As propriedades. Portanto, as propriedades do cimento Portland são influenciadas pela proporção e pelo tipo de compostos presentes, obtendo-se diferentes tipos de cimentos por meio da proporcionalidade adequada das matérias-primas (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Além dos compostos apresentados na Tabela 2, estão presentes também os constituintes menores, chamados de compostos secundários, como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O , que normalmente constituem um pequeno percentual da massa do cimento. Os óxidos de sódio e de potássio (Na_2O e K_2O), conhecidos como álcalis, podem reagir com alguns agregados, produzindo uma reação que causa

desintegração do concreto e ainda, afetam a velocidade de ganho de resistência do cimento. Todos esses compostos têm a propriedade de reagirem com a presença de água, por hidrólise, dando origem então a compostos hidratados. (NEVILLE, 2016).

Dessa forma, ao se adicionar água ao cimento Portland tem-se, quase que instantaneamente, o início de uma série de reações de dissolução e de formação de novas fases, estas últimas responsáveis, após algum tempo, pelo endurecimento do produto. A microtextura e a “trama” estabelecida pelos produtos de hidratação evoluem ao longo do tempo, sendo possível correlacionar a densificação dos mesmos com o crescente ganho de resistência mecânica das peças e estruturas de concreto (ZAMPIERI, 1993).

2.2.4 Tipo de cimento Portland

No Brasil, assim como na maioria dos países com produção significativa, são fabricados diversos tipos de cimento, que correspondem à maior ou menor exaltação das propriedades dos seus principais componentes e resultam no desenvolvimento de variadas características mecânicas, físicas e químicas (SOUZA; RIPPER, 1998).

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), os cimentos Portland são designados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais. São identificados por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI), acrescidas dos sufixos RS e BC, quando aplicáveis. Cabe ressaltar que a disponibilidade de certos tipos de cimento é regional e alguns só são fabricados segundo encomendas especiais (SCHANKOSKI, 2020). A Tabela 3 apresenta os limites de composição dos cimentos Portland normatizados no Brasil, a partir de consulta a base normativa da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Tabela 3 - Limites de composição do cimento Portland (Porcentagem de massa)

Designação normalizada e sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum (CP I)	95 - 100	0 - 5	0 - 5	0 - 5

Cimento Portland comum (CP I-S)	90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno (CP II-E)	51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico (CP II-Z)	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland composto com material carbonático (CP II-F)	75 - 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de alto forno (CP III)	25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Cimento Portland pozolânico (CP IV)	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland com alta resistência inicial (CP V)	90 - 100	0	0	0 - 10
Cimento Portland branco (CPB) Estrutural	75 - 100	-	-	0 - 25
Cimento Portland branco (CPB) Não estrutural	50 - 74	-	-	26 - 50

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697 (2018)

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), os cimentos Portland podem ter classe de resistência de 25, 32 ou 40 MPa, com exceção do Cimento Portland V, que pode ser classificado como ARI (Alta Resistência Inicial) e do Cimento Portland branco não estrutural, que não possui nenhuma classe de resistência. Além disso, todos os Cimento Portland, com exceção do Cimento Portland branco não estrutural, quando

aplicável, podem possuir o sufixo RS ou BC, indicando a resistência a sulfato ou baixo calor de hidratação, respectivamente.

As exigências normativas das características físico-mecânicas são apresentadas na Tabela 4, e das características químicas, na Tabela 5.

Tabela 4 - Requisitos físico-mecânico dos tipos de cimento

Sigla	Classe	Finura	Resistência à compressão (MPa)		
			Resíduo na peneira 75 mm (%)	1 dia	3 dias
CP I, CP I-S,	25	≤ 12,0		-	≥8,0 ≥15,0
CP II-E, CP II-F e CP II-Z	32	≤ 12,0		-	≥10,0 ≥20,0
	40	≤ 10,0		-	≥15,0 ≥25,0
CP III e CP IV	25	≤ 8,0		-	≥8,0 ≥15,0
	32	≤ 8,0		-	≥10,0 ≥20,0
	40	≤ 8,0		-	≥12,0 ≥23,0
CP V	ARI	≤ 6,0		≥14,0	≥24,0 ≥34,0
CPB Estrutural	25	≤ 12,0			≥8,0 ≥15,0
	32	≤ 12,0 *			≥10,0 ≥20,0
	40	≤ 12,0 *			≥15,0 ≥25,0
CPB Não estrutural	-	≤ 12,0 *		-	≥5,0 ≥7,0

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16697 (2018)

Tabela 5 - Requisitos químicos dos tipos de cimento

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

Fonte: ABNT NBR 16697 (2018)

2.3 Escória de Ferroníquel no Cimento Portland

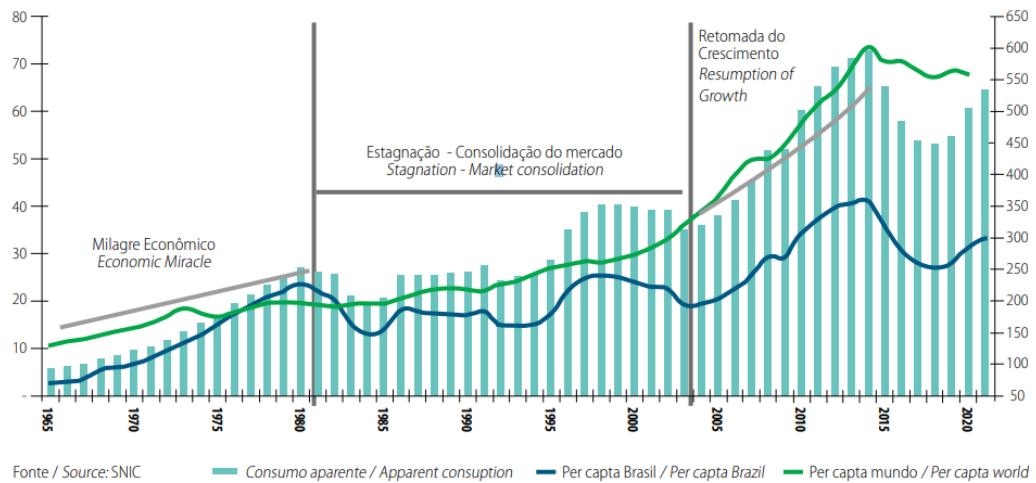
O cimento é o maior produto manufaturado da Terra em massa. Combinado com água e agregados minerais, forma materiais à base de cimento e é a segunda substância mais utilizada no mundo depois da água (SCRIVENER et al, 2018).

A fabricação de cimento é uma das indústrias mais intensivas em energia e carbono em todo o mundo, respondendo por 7% do uso industrial global de energia e 27% das emissões industriais globais de carbono (WBCSD E IEA, 2018).

Espera-se ainda que este cenário seja agravado com um aumento previsto de 12 a 23% da produção de cimento até 2050 (BORGAS et al., 2022).

Com base nos dados da SNIC (2021), de 1965 à 2020 o consumo per capita de cimento no Brasil, em mil toneladas, variou de 70 kg/hab para 286 kg/hab. A Figura 4 apresenta o consumo per capita do país em comparação com os dados mundiais e o consumo aparente de cimento.

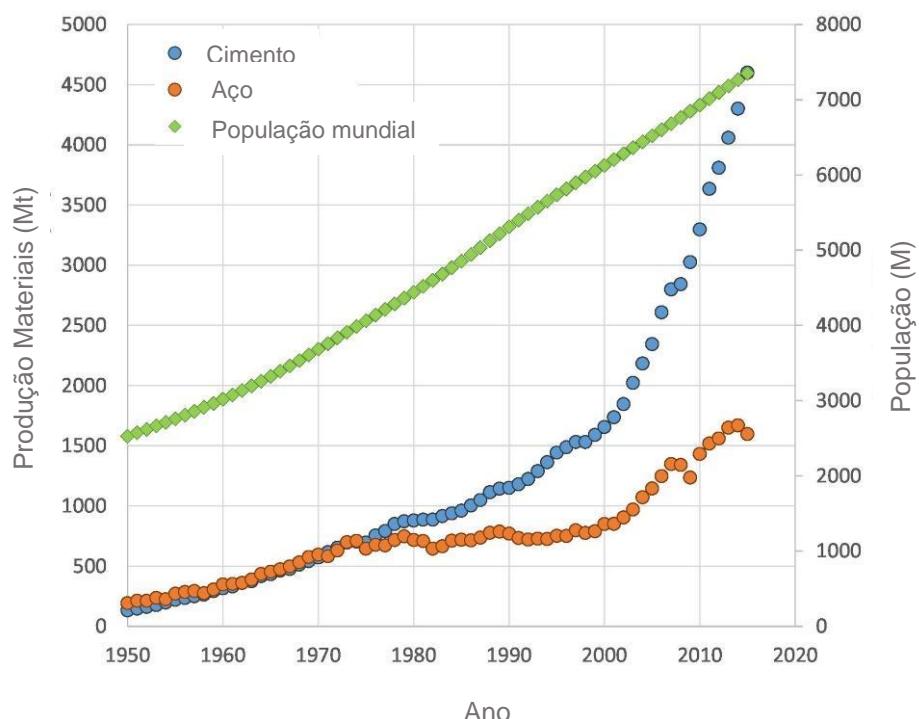
Figura 4 - Consumo de cimento no Brasil e no mundo (em milhões de toneladas)



Fonte: SNIC (2021)

Scrivener et al. (2018) afirmam que a taxa de crescimento da produção de cimento é muito maior do que outras commodities, como o aço, e maior do que o crescimento populacional, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Comparação da produção de cimento e aço bruto com a população



Fonte: Adaptado de Scrivener et al. (2018)

Em 2019, para cada habitante no mundo, o consumo de cimento foi de 521 kg/ano, resultando na emissão de 633 kg de CO₂ por tonelada de cimento (SNIC, 2019). Segundo Wang et al. (2023), o cimento é responsável por 8,3% do total global de emissões antropogênicas de CO₂, sendo urgente a necessidade de produzir cimento com baixa pegada de carbono.

Para Scrivener et al. (2018), uma das estratégias de mitigação do CO₂ estabelecida pela indústria de cimento é a substituição do clínquer por materiais cimentícios suplementares (SCM). Esta estratégia tem as vantagens de reduzir o consumo de energia, bem como aumentar a produção sem a necessidade de novos fornos. Além do cimento, existem alguns materiais cimentícios comuns, como cinzas volantes e escórias, que são referidos coletivamente como SCM (LIU et al., 2023).

Em geral, materiais contendo grandes quantidades de fases amorfas consistindo de aluminossilicatos (cálcio) se qualificam como candidatos ideais para SCM. No entanto, isso não significa que o material pode ser usado em cimento ou concreto. Também deve ter propriedades físicas e químicas adequadas, reatividade e volumes de fornecimento adequados, sem fortes efeitos negativos na consistência, hidratação, desenvolvimento de resistência, durabilidade ou compatibilidade ambiental. Além disso, alguns materiais que atendem a todos os critérios podem não ser usados simplesmente porque não atendem aos padrões e especificações existentes (SNELLINGS et al., 2023).

Dentre as diferenças entre as misturas com determinado material cimentício e a mistura de referência, podem estar incluídas a trabalhabilidade, a resistência mecânica em diferentes idades, o consumo total de material cimentício ou a relação água/cimento, sendo todas são importantes para a dosagem de concreto. Não é possível realizar uma generalização válida dessas comparações, mas uma revisão geral das propriedades das misturas que contêm diferentes materiais cimentícios seria útil. Isso pode tornar possível avaliar as propriedades dos concretos com materiais diferentes, em diferentes proporções. Aliado a isso, é digno de nota que, as propriedades específicas de qualquer mistura devem ser comprovadas por ensaios (NEVILLE, 2016).

As principais composições do FNS são semelhantes às do cimento Portland. Assim, FNS pode ser considerado como materiais cimentícios suplementares (SCMs)

em concreto após a moagem em pó (HAN et al., 2023; WANG et al., 2018; LIU et al., 2020).

Segundo Han et al (2023), métodos físicos, químicos e de alta temperatura são geralmente usados para estimular a atividade do EFFS. Um dos métodos de ativação física mais empregados se refere à moagem mecânica para aumentar a finura da FNS (ABED et al., 2022). Wang et al. (2019) afirmam que quando o tempo de moagem é muito curto, a finura da escória de feroníquel é muito pequena e a reatividade é baixa. Se o tempo de moagem for muito longo, ocorre o efeito de aglomeração e a reatividade também será reduzida. Devido aos diferentes processos e requisitos de moagem, a área de superfície específica, tamanho de partícula e densidade de EFFS são geralmente 3800 a 5000 cm²/g, 0,1 a 100 µm e 2,95 a 3,28 g/cm³, respectivamente. (HAN et al., 2023).

Muitas pesquisas atuam analisando o comportamento sobre a escória de feroníquel como agregado na fabricação do concreto, particularmente como agregado miúdo (YANG et al, 2021), que não serão abordados neste trabalho. Saha e Sarker (2017), afirmam que os agregados constituem cerca de 70% a 80% do volume do concreto e, por isso, eles afetam em grandes proporções as propriedades frescas e endurecidas do concreto.

Para Han et. al (2023) independente do uso da FNS como SCMs ou como agregado, as influências da escória nas propriedades do concreto precisam ser sistematicamente investigadas.

Liu et al. (2020) afirmam que as dificuldades técnicas da aplicação em larga escala do FNS estão relacionadas às pesquisas concentradas principalmente na moagem em pó como aglutinante e no efeito das propriedades mecânicas da mistura. As propriedades de longo prazo de uma ampla aplicação de FNS em estruturas de engenharia são incertas, o que limita a reutilização de FNS. Portanto, é importante estudar o efeito da FNS na durabilidade da mistura à base de cimento para aplicação de FNS. Além disso, diz-se que o FNS produzido em diferentes períodos também pode ter efeitos diferentes no concreto.

Os resultados para o desempenho da FNS em substituição parcial ao cimento obtidos na literatura são apresentados a seguir, com todas as referências utilizando o resfriamento a água e moído.

2.3.1 Desempenho de FNS como material cimentício suplementar

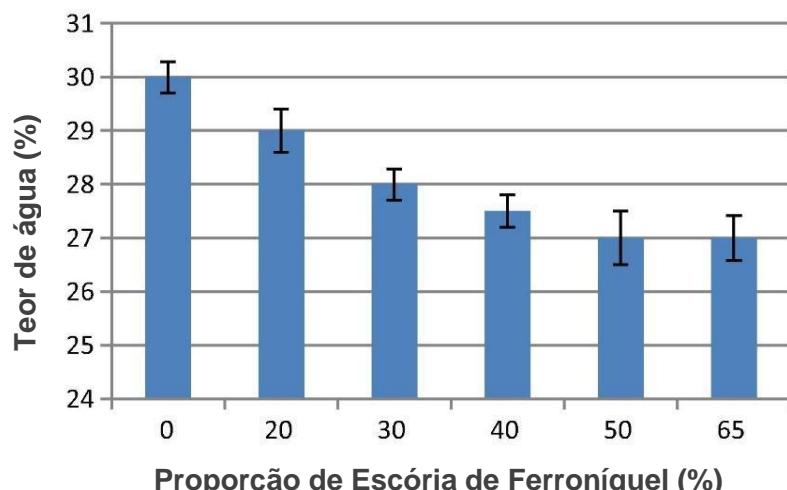
2.3.1.1 Consistência

Os estudos de Lemonis et al. (2015) apontam que houve uma melhora na consistência de argamassas ao se adicionar até 20% de FNS em substituição ao cimento com superfície específica de 4000 cm²/g, bem como a redução na demanda de água, quando comparado com a mistura referência, fato que foi atribuído ao retardo na hidratação da escória. Para o autor, a substituição do cimento por adições menos reativas leva a menores quantidades de produtos de hidratação formados nas fases iniciais de hidratação, resultando em maior trabalhabilidade da argamassa.

Em concordância com Lemonis et. al (2015), os resultados da pesquisa desenvolvida por Han et al. (2023) afirmam que houve melhora na consistência da pasta ao diminuir a finura do FNS, variando de 4360 cm²/g à 4610 cm²/g. Além disso, em comparação com a referência contendo apenas Cimento Portland, a demanda de água nas misturas contendo FNS também foi menor.

Rahman et al. (2017), ao variar os teores de FNS de 20% à 65% em substituição ao cimento, com área superficial de 5000 cm²/g, observaram que a quantidade de água necessária para a consistência normal da pasta diminuiu ligeiramente, conforme resultados apresentados no Figura 6. Os autores associam a diminuição observada à FNS possuir características de baixa absorção de água e ao comportamento inerte no estágio inicial de mistura.

Figura 6 - Teor de água para consistência normal de pasta contendo diferentes porcentagens de escória de ferroníquel



Fonte: Adaptado de Rahman et al. (2017)

Em contrapartida, mantendo a mesma quantidade de água, Kim et al. (2019) observaram que o aumento da finura de 4660 cm²/g, 8140 cm²/g e 26300 cm²/g resultou na diminuição da fluidez, com teores de incorporação respectivamente de 30%, 10% e 5%. Os autores afirmam que quanto maior a adição de FNS, maior o teor de água necessário na mistura para atender a uma determinada trabalhabilidade e, por sua vez, manter a fluidez do concreto fresco.

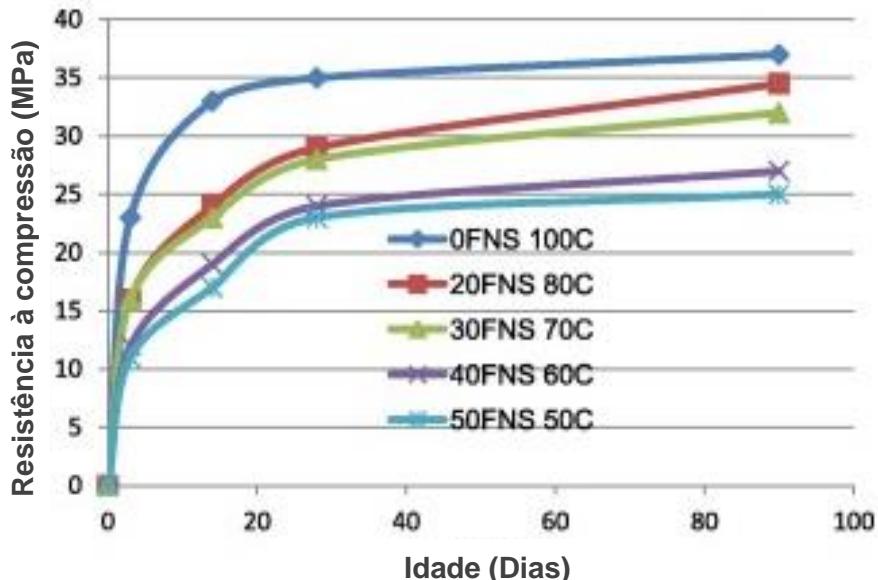
2.3.1.2 Resistência à Compressão

Lemonis et al. (2015) afirmam que os cimentos contendo até 20% de FNS em substituição ao cimento desenvolveram resistência relativamente menor em todas as idades analisadas (2, 7, 28, 56 e 90 dias de cura) em comparação com a referência. Segundo os autores, a adição de FNS pareceu retardar a taxa de hidratação das misturas produzidas nas primeiras idades. Em idades mais longas, a reação pozolânica parece contribuir para o desenvolvimento da resistência.

Os resultados obtidos por Lemonis et al. (2015) estão de acordo com a afirmação de Rahman et al. (2017): os autores afirmam que a sílica amorfa, presente em maior quantidade no FNS do que a sílica cristalina, participa das reações pozolânicas e contribui para o desenvolvimento de resistência em idade tardia nas misturas contendo escória de ferroníquel.

Para teores de FNS de 0%, 20%, 30%, 40% e 50% em substituição ao cimento, Rahman et al. (2017) observaram a redução das resistências à compressão das misturas conforme aumentava-se o teor de FNS, em comparação com a referência, conforme Figura 7. As taxas de desenvolvimento de resistência das misturas de FNS foram maiores durante 14 a 28 dias quando comparado à mistura de referência. O desenvolvimento de resistência das argamassas contendo FNS apresentaram tendência crescente até a idade de 90 dias. Os autores salientam que o desenvolvimento de resistência das misturas de escória de ferroníquel é semelhante ao comportamento geral do concreto contendo materiais pozolânicos, como cinzas volantes (RAHMAN et al., 2017).

Figura 7 - Resistência à compressão de argamassas contendo diferentes porcentagens de escória de feroníquel em substituição ao cimento



Fonte: Adaptado de Rahman et al. (2017)

Os estudos de Han et al. (2023) concluíram que a incorporação de FNS reduz a resistência inicial do material à base de cimento, devido à baixa atividade da escória. E ainda, afirmam que o efeito do aumento da finura do FNS na melhoria da resistência mecânica não é significativo.

Kim et al. (2019) estudaram o comportamento da FNS com três diferentes finuras, com seus valores de Blaine representadas por 4660 cm²/g, 8140 cm²/g e 26300 cm²/g, com teores de substituição da escória de feroníquel pelo cimento, respectivamente, nos teores de 30%, 10% e 5%. Para os autores, o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto FNS foi fortemente dependente da finura e de seu teor de substituição. Os resultados apresentam uma diminuição na resistência à compressão com o aumento do teor de substituição de FNS. No entanto, com o aumento na idade de cura, houve aumento na resistência à compressão, independentemente dos teores de FNS incorporado. Kim et al. (2019) atribuem desempenho ligeiramente inferior para a resistência à compressão ao baixo teor de CaO no ligante, que restringe os produtos de hidratação do tipo CS e enfraquece a resistência à compressão.

Para estruturas em que é necessário o desenvolvimento de alta resistência em idade precoce, Kim et al. (2019) não recomendam a adição excessiva de FNS.

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado a metodologia adotada na condução deste projeto de graduação. Serão detalhados os materiais utilizados, bem como os métodos adotados para a realização dos ensaios laboratoriais com diferentes finuras de FNS e com o traço de referência.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado no estudo foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI) Consiste no cimento com o menor teor de adição mineral (fíler calcário) comercializado no Brasil.

Para o estudo de uma adição mineral alternativa (escória de feroníquel) é importante que o cimento não contenha escória de alto forno ou pozolana, para não interferir na análise da adição em estudo.

Para a caracterização do cimento foi utilizado laudo do próprio fabricante, confrontando com a massa específica obtida de forma experimental em laboratório.

3.1.2 Escória de feroníquel (FNS)

A escória de feroníquel (FNS) é oriunda da Mineradora Anglo American em Barro Alto, localizado no estado do Goiás. De acordo com a Anglo American (2021), a mineradora de Barro Alto extrai minérios de níquel do tipo laterítico, contendo de 2 a 3% de níquel e utilizam o método pirometalúrgico com forno elétrico rotativo (RKEF), para a produção das ligas de ferro-níquel. As ligas são produzidas com os teores de 65%Fe e 35%Ni, tendo como principal finalidade o beneficiamento de aços. De acordo com a mineradora, dos materiais que entram no forno, cerca de 85% são transformados em escória (Figura 8) e 15% em ligas.

Em 2021, a empresa possui de 19 a 25 milhões de toneladas de FNS estocadas em depósitos, com a produção de 2 milhões de toneladas por ano, representando, além de um passivo ambiental, um grande custo logístico e com licenças ambientais para a estocagem e expansão dos depósitos (ANGLO AMERICAN, 2021).

O lote de escória coletado foi resfriado com água, transportado e estocado no Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção – LEMAC, localizado no Campus

de Goiabeiras, no Centro Tecnológico da Universidade Federal de Espírito Santo – UFES.

Figura 8 - Escória de ferroníquel granulada estocada



Fonte: Subprojeto de iniciação científica - Piic UFES (2022)

3.1.3 Areia

O agregado utilizado é uma areia natural de cava de Linhares, proveniente da empresa Concrevit. Seguindo o procedimento recomendado pela NBR 6458 (ABNT, 2017) e a partir da média de três ensaios, a massa específica obtida da areia foi de 2,64 g/cm³.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação das amostras

3.2.1.1 Cimento Portland

O procedimento teve início com o armazenamento do cimento utilizado, CP V, dividido em 4 sacos de 10 kg cada, embalados com mais duas camadas para garantir o armazenamento adequado. Além disso, foi utilizada sílica ativa, entre a primeira e a segunda camada, como um indicador da umidade presente no material. O cimento foi armazenado na câmara seca do LEMAC, mantendo-o à temperatura ambiente e protegidos da umidade, até que fosse usado nos ensaios de caracterização e moldagem dos corpos de prova.

3.2.1.2 Escória de ferroníquel

Para preparação da escória de ferroníquel e sua utilização como adição mineral, procedeu-se a secagem em estufa, a uma temperatura entre 105°C e 110°C,

por no mínimo 24 h (Figura 9). A FNS foi separada em 6 lotes de 6 kg, armazenados em tachos e secos em estufa, para retirar a umidade. Após a secagem em estufa e resfriamento à temperatura ambiente, cada lote foi pesado e separado em porções de 5 kg.

Figura 9 - Escória de ferroníquel granulada antes secagem em estufa



Fonte: Os autores (2023)

Antes do início da moagem das escórias, o moinho de bolas, representado na Figura 10, de capacidade de até 5 kg passou por uma ambientação, também com FNS seca em estufa, a fim de retirar resíduos de outros materiais.

Figura 10 - Moinho de bolas utilizado na moagem da FNS.



Fonte: Os autores (2023)

Para obter a granulometria pulverulenta, a FNS foi moída no moinho de bolas em 6 etapas: O primeiro lote foi moído por uma hora, o segundo lote por duas horas, o terceiro lote por três horas, o quarto lote por quatro horas, o quinto lote por cinco horas e o sexto lote, foi moído por seis horas.

Após a moagem, os lotes foram embalados e armazenados na câmara seca do LEMAC, mantendo-os à temperatura ambiente e protegidos da umidade, até que fossem usados nos ensaios de caracterização e moldagem dos corpos de prova.

3.2.1.3 Areia

Para eliminação da matéria orgânica, a areia utilizada passou pela mufla, representada na Figura 11, e após resfriamento à temperatura ambiente, foi embalada e armazenada na câmara seca do LEMAC, mantendo-a à temperatura ambiente e protegidos da umidade, até que fossem usadas no ensaio de caracterização e moldagem dos corpos de prova.

Figura 11 - Mufla utilizada para eliminação da matéria orgânica da areia



Fonte: Os autores (2023)

3.2.2 Caracterização dos materiais

A caracterização do cimento, da escória de ferroníquel e do agregado utilizados nesta pesquisa foram realizadas por meio dos procedimentos indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Procedimentos usados na pesquisa

AREIA		
ENSAIO	NORMA	LABORATÓRIO
Massa Específica	ABNT NBR 6458	Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção - LEMAC - UFES
FNS E CIMENTO		
ENSAIO	NORMA	LABORATÓRIO
Massa Específica Aparente	ABNT NBR 16605	Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção - LEMAC – UFES
Área Superficial	ABNT NBR 16372	Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção - LEMAC – UFES
Análise de forma por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	-	Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins - LUCCAR - Centro de Ciências da Saúde – UFES
Detector de energia dispersiva de raios-X (EDS)	-	Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins - LUCCAR - Centro de Ciências da Saúde – UFES

Perda ao fogo	ABNT NBR 16697	Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção - LEMAC – UFES
Resíduo Insolúvel	ABNT NBR NM 22	Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção - LEMAC – UFES

Fonte: Os autores (2023)

Posteriormente foram preparadas e analisadas as propriedades física, química e mecânicas de sete amostras de cimento: uma amostra de referência, contendo somente CP V ARI, e 6 amostras com teores de 20% de substituição de cimento por FNS, variando na finura.

Os ensaios serão apresentados de forma detalhada nos itens subsequentes.

3.2.2.1 Massa Específica Aparente

A determinação da massa específica da areia seguiu o procedimento recomendado pela NBR 6458 (ABNT, 2017): Grãos de pedregulho retidos na peneira 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água, anexo B (Grãos de solo que passam na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica).

A massa específica dos grãos do solo é calculada pela Equação 1.

$$\rho_s = \frac{M_1 \cdot 100 / (100 + w)}{\left[M_1 \cdot \frac{100}{100 + w} \right] + M_3 - M_2} \cdot \rho_{W(t)} \quad (1)$$

Em que:

ρ_s = é a massa específica dos grãos do solo, em g/cm³;

M_1 = é a massa de areia seca, em gramas;

M_2 = é a massa do picnômetro, à temperatura T de ensaio;

M_3 = é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência, à temperatura T do ensaio;

w = é a umidade inicial da amostra;

$\rho_{W(t)}$ = é a massa específica da água, à temperatura T do ensaio, obtida na Tabela A.1 da NBR 6458 (ABNT, 2017).

A NBR 6458 (ABNT, 2017) recomenda que sejam realizados pelo menos dois ensaios considerados satisfatórios.

As massas específicas do cimento Portland e das escórias de feroníquel foram determinadas de acordo com as prescrições da NBR 16605 (ABNT, 2017) – Cemento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. O ensaio consiste em determinar o volume de líquido deslocado após uma quantidade conhecida de massa ser inserida no frasco volumétrico de Le Chatelier. A Figura 12 ilustra uma das etapas do procedimento de determinação das massas específicas das escórias e do cimento Portland.

Figura 12 - Procedimento para obtenção da massa específica do FNS



Fonte: Os autores (2023)

Visto que a escória de feroníquel é um material não reagente, foi utilizada água para realização do ensaio. Já para o cimento, foi utilizado querosene, devido à sua reatividade à água.

A massa específica é calculada pela Equação 2.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Em que:

ρ = é a massa específica do material ensaiado, em g/cm³;

m = é a massa do material ensaiado, em gramas;

v = é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V2' - V1'$), em cm^3 ; onde $V2' - V1'$: são os valores corrigidos da leitura inicial $V1$ e da leitura final $V2$, a partir da calibração da escala, em cm^3 .

3.2.2.2 Área Superficial

Determinação da área superficial das amostras de cimento e FNS por meio do Permeabilímetro de Blaine, conforme metodologia estabelecida na NBR 16372 (ABNT, 2015) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Por meio deste ensaio obtém-se um indicador da finura do cimento Portland e lotes de escórias de feroníquel em análises.

A camada compactada de material ($m1$) é obtida por meio da Equação 3.

$$m1 = (1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot v \quad (3)$$

Em que:

$m1$: é a camada compacta de material, em gramas;

ε : é a porosidade da camada compacta;

ρ : é a massa específica das partículas do material, em g/cm^3 ;

v : é o volume total da camada compactada, em cm^3 .

A porosidade da camada deve ser escolhida por tentativas, de maneira que a camada seja facilmente compactada. Para o cimento Portland, estimou-se uma porosidade de 0,50 como ponto de partida, e após algumas tentativas, a porosidade adotada para a amostra de CPV foi de 0,52. Já para as amostras de FNS, a porosidade inicial adotada para o Lote 1 foi de 0,40, sendo a porosidade final adotada para este lote de 0,42. A cada novo lote, adotou-se uma porosidade a partir do valor obtido para o Lote 1, com valores variando de 0,42 à 0,49 para os seis lotes de escória de feroníquel.

Após a obtenção da massa $m1$, foi observado o tempo, t , de escoamento do ar entre as marcas de números 1 e 2, representadas na Figura 13, para fluir através de uma camada compactada do material, de dimensões e porosidade especificadas.

Figura 13 - Aparelho de permeabilidade Blaine utilizado no ensaio



Fonte: Os autores (2023)

A superfície específica, S , é obtida pela Equação 4.

$$S = \mathcal{K} \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon^3 \cdot \sqrt{t}}}{\rho \cdot (1-\varepsilon) \cdot \sqrt{0,1 \cdot \eta}} \quad (4)$$

Em que:

S : é a superfície específica em massa, em cm^2/g ;

\mathcal{K} : é a constante do aparelho;

ε : é a porosidade da camada;

t : é o tempo medido, em segundos;

ρ : é a massa específica das partículas do material, em g/cm^3 ;

η : é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio, tomada da Tabela A1 da norma (Tabela 7).

Tabela 7 - Tabela A.1 do anexo A da norma ABNT NBR 16372

Temperatura (°C)	Massa Específica do mercúrio, pH (g/cm³)	Viscosidade do ar (Pa.s)	$\sqrt{0,1\eta}$
18	13,55	0,00001798	0,001341
19	13,55	0,00001803	0,001343
20	13,55	0,00001808	0,001345
21	13,55	0,00001813	0,001346
22	13,54	0,00001818	0,001348

23	13,54	0,00001823	0,001350
24	13,54	0,00001828	0,001352
25	13,54	0,00001832	0,001354
26	13,53	0,00001837	0,001355
27	13,53	0,00001842	0,001357
28	13,53	0,00001847	0,001359
29	13,53	0,00001852	0,001361
30	13,52	0,00001857	0,001363

Fonte: ABNT NBR 16372

3.2.2.3 Análise de forma por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para análise morfológica, empregou-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura para análise da microestrutura do cimento Portland e das amostras de escória de feroníquel. Amostras dos 6 lotes de FNS e do cimento Portland foram enviadas para o Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins - LUCCAR, do Centro de Ciências da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e com a utilização do microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram obtidas as imagens, o que possibilitou a observação da microestrutura.

A Figura 14 mostra as amostras de FNS separadas para envio ao LUCCAR.

Figura 14 - Amostras identificadas enviadas ao LUCCAR



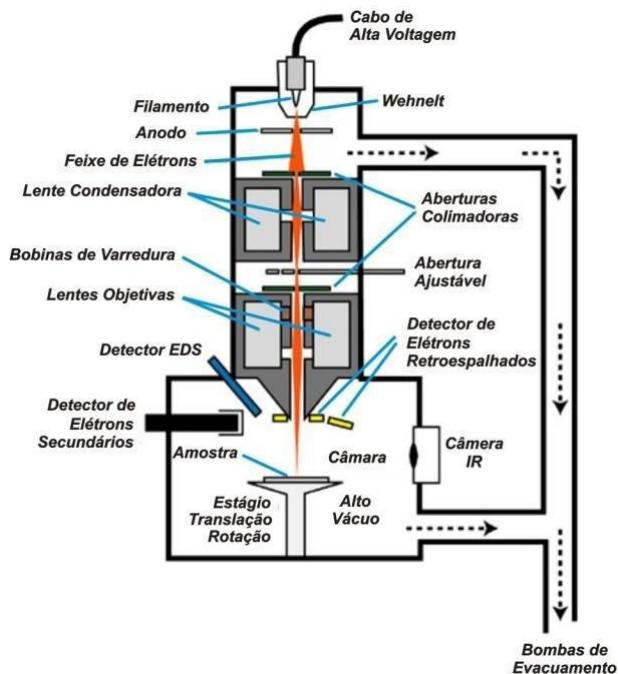
Fonte: Os autores (2023)

Segundo Maliska (2023), a microscopia eletrônica de varredura consiste em irradiar um fino feixe de elétrons através da amostra. Como resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra, uma série de radiações são emitidas tais como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios-X característicos, elétrons Auger, fótons etc. Estas radiações quando captadas corretamente irão

fornecer informações características sobre a amostra, como topografia da superfície, composição e cristalografia.

Uma representação esquemática do funcionamento de um microscópio eletrônico de varredura é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Representação esquemática do MEV



Fonte: Xavier (2018)

3.2.2.4 Detector de energia dispersiva de raios-X (EDS)

Para determinação dos elementos químicos presentes nas amostras de FNS e cimento Portland, empregou-se a técnica de detecção de energia dispersiva de raios-x (EDS), acoplado ao MEV. Amostras dos 6 lotes de FNS e do cimento Portland foram enviadas para o Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins - LUCCAR, do Centro de Ciências da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Este método consiste em irradiar a amostra por um feixe de raios X não monocromatizado, mantendo o ângulo de espalhamento inalterado. O padrão de difração é coletado por meio da medição do espectro de energia desse feixe policromático depois que ele é espalhado pela amostra (GENEROSI et al., 2007).

Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais os elementos químicos

estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado (LMIC, 2023).

3.2.2.5 Perda ao fogo

A determinação da perda ao fogo do cimento é estabelecida por meio da NBR NM 18 (ABNT, 2012): Cimento Portland – Análise química – Determinação da perda ao fogo. Este ensaio tem por objetivo identificar se o uso da escória aumentará, ou não, a quantidade de materiais voláteis e identificar o seu comportamento ao fogo. O percentual de perda pode ser obtido pela Equação 5:

$$\mathcal{P}\mathcal{F}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:

$\mathcal{P}\mathcal{F}$: é a perda ao fogo, em porcentagem;

m_1 : é a massa do cadinho mais massa da amostra ensaiada, em gramas;

m_2 : é a massa do cadinho mais massa da amostra, após a calcinação, em gramas;

m : é a massa de amostra utilizada no ensaio, em gramas.

Os valores máximos de perda permitidos aos cimentos usuais, são estabelecidos pela norma NBR 16697 (ABNT, 2018), apresentados na Tabela 5. Espera-se que o CPV apresente porcentagem de perda ao fogo inferior à 6,5%. Os cimentos compostos, CP II, possuem perda ao fogo máxima de 8,5%, para CP II-E e para o CP II-Z e 12,5% para o CP II-F.

3.2.2.6 Resíduo Insolúvel

O ensaio de resíduo insolúvel é um indicativo da quantidade de material insolúvel presente na amostra, de acordo com o procedimento descrito na NBR NM 22 (ABNT, 2012): Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química – Método de arbitragem. Seu valor (%) será utilizado como parâmetro para estimar o teor de material presente no cimento resistente ao ácido clorídrico. Esse ensaio está associado a identificação dos teores de materiais pozolânicos no cimento,

que geralmente são insolúveis ao ataque ácido, diferente dos outros componentes do cimento.

A porcentagem de resíduo insolúvel presente no cimento e na FNS será determinada por meio da Equação 6.

$$\mathcal{RJ} (\%) = \frac{m_2 - m_1}{m} \cdot 100 \quad (6)$$

Em que:

\mathcal{RJ} : é o resíduo insolúvel, em porcentagem;

m_1 : é a massa do cadiño, em gramas;

m_2 : é a massa do cadiño com resíduo calcinado, em gramas;

m_1 : é a massa da amostra utilizada no ensaio, em gramas.

É esperado pela NBR 16697 (ABNT, 2018), conforme Tabela 5, que os cimentos CPV apresentem porcentagem de resíduo insolúvel inferior a 3,5%. Enquanto no CP II-E, CP II-F e CP II-Z esse valor pode chegar a 5,0, 7,5 e 18,5%, respectivamente.

3.2.3 Dosagem de argamassas

3.2.3.1 Dosagem

A fim de conhecer a influência da FNS em misturas cimentícias, conduziu-se um estudo de dosagem em argamassa. A composição das misturas foi determinada utilizando o traço de referência da NBR 7215 (ABNT, 2019), com a alteração da relação água/cimento. Como não foram usados aditivos, adotou-se uma relação água cimento superior ao que é indicado pela norma, a fim de se obter misturas mais plásticas. O traço referência utilizado foi 1:3:0,56 (cimento : agregado miúdo : água), em massa.

Após a determinação do traço referência, adotou-se a substituição de 20% do cimento por escória de ferroníquel, em massa. A quantidade de agregado miúdo e água permaneceu constante.

Foram produzidas sete argamassas, sendo uma mistura de referência (com 0% de FNS) e as demais contendo 20% de FNS em substituição ao cimento, variando a granulometria da FNS.

3.2.3.2 Produção das argamassas

Definida a dosagem, foi possível iniciar a confecção dos corpos de prova. Para isso foi seguido o procedimento indicado pela NBR 7215 (ABNT, 2019): Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão, compostos pelas etapas a seguir: preparação das amostras, preparação da argamassa de cimento, moldagem dos corpos de prova e cura.

Os materiais foram preparados previamente, com a pesagem nas proporções de acordo com a dosagem. Em seguida o cimento e a escória de ferroníquel foram misturados, a fim de proporcionar uma homogeneização dos materiais. Pode-se seguir com a preparação da argamassa de cimento, conforme procedimento descrito na NBR 7215 (ABNT, 2019).

As argamassas foram produzidas no LEMAC, utilizando uma argamassadeira como misturador mecânico, com capacidade de 3,5 litros.

Imediatamente após o amassamento (Figura 16), para análise das propriedades da argamassa de cimento no estado fresco, realizaram-se dois ensaios: Índice de consistência normal e Massa específica.

Figura 16 - Consistência da argamassa logo após preparação



Fonte: Os autores (2023)

3.2.3.3 Propriedades no estado fresco

a) Índice de consistência

A determinação do índice de consistência normal da mistura (Flow Table), foi realizado conforme NBR 13276 (ABNT, 2016): Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Por meio deste ensaio é obtido o índice de consistência da argamassa, calculando a média aritmética das medidas dos diâmetros ortogonais.

A quantidade de golpes na mesa foi adaptada em relação ao que é estabelecido pela NBR 13276 (ABNT, 2016), visto a obtenção de misturas mais plásticas devido à relação água cimento adotada. Foram aplicados dez golpes na mesa em cada uma das misturas.

b) Massa específica e Teor de ar incorporado

A massa específica foi determinada de acordo com o procedimento descrito na NBR 13278 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Foi utilizado um recipiente cilíndrico plástico de volume igual a 429,00 cm³, conforme Figura 17.

Figura 17 - Recipiente usado para cálculo da massa específica



Fonte: Os autores (2023)

Após a realização do preenchimento em três camadas de 20 golpes cada camada, bem como rasamento da superfície, conforme indicados pela NBR 13278 (ABNT, 2005), pesou-se a massa inserida no recipiente, a fim de calcular a densidade de massa da argamassa (d), por meio da Equação 7.

$$d = \frac{mc - mv}{v_r} \cdot 1000 \quad (7)$$

Em que:

d : é a densidade de massa da argamassa (massa específica), em kg/m³;

mc : é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas;

mv : é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;

V_r : é o volume do recipiente cilíndrico, em cm^3 .

O teor de ar incorporado na argamassa (A) segundo a NBR 13278 (ABNT, 2005), deve ser determinado pela Equação 8.

$$A = 100 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (8)$$

Em que:

d : é o valor da densidade de massa da argamassa, em g/cm^3 ;

d_t : é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios, em g/cm^3 .

Considerando argamassas dosadas e preparadas em obra, a densidade de massa teórica deve ser calculada por meio da Equação 9.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \gamma_i} \quad (9)$$

Em que:

m_i : é a massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa de água;

γ_i : é a massa específica de cada componente da argamassa.

3.2.3.4 Moldagem dos corpos de prova

O procedimento de moldagem dos corpos de prova foi realizado após a execução dos ensaios no estado fresco da argamassa, de acordo com NBR 7215 (ABNT, 2019). Para cada mistura, foram preenchidos dez corpos de prova metálicos cilíndricos, de dimensões $5 \times 10 \text{ cm}$ (Figura 18), untados internamente previamente à execução do ensaio com desmoldante.

Figura 18 - Corpos de prova usados na moldagem



Fonte: Os autores (2023)

Para execução da moldagem dos corpos de prova, foi seguido o procedimento descrito a seguir:

- I. Preenchimento do molde em duas camadas de alturas aproximadamente iguais, com o auxílio de uma espátula. A quantidade de camadas foi adaptada em relação ao que é estabelecido pela NBR 7215 (ABNT, 2019), visto a obtenção de misturas mais plásticas devido à relação água cimento adotada.
- II. Aplicação de 30 golpes uniformes em cada camada com soquete, homogeneamente distribuídos;
- III. Rasadura dos corpos de prova, com deslizamento de uma régua pela borda, em um movimento de vaivém, do centro para as laterais.
- IV. Proteção da face superior dos corpos de prova.

A Figura 19 apresenta os corpos de prova imediatamente a moldagem.

Figura 19 - Corpos de prova após a moldagem



Fonte: Os autores (2023)

Os corpos de prova devem ser submetidos a um período de cura inicial ao ar e a um período final na água (ABNT NBR 7215).

A cura inicial ao ar foi realizada com a colocação dos corpos de prova na câmara úmida, com umidade superior à 95%, conforme especificado pela NBR 9479 (ABNT, 1994), onde permaneceram por um período de 20h a 24h, identificados por lote de escória ou lote referência (Figura 20).

Figura 20 - Cura inicial ao ar



Fonte: Os autores (2023)

Passado o período de cura inicial, os corpos de prova foram desmoldados e identificados, com as iniciais dos pesquisadores, data de moldagem e lote da escória

ou lote referência. Um dos corpos de prova do lote de referência está exemplificado na Figura 21. Em seguida, foram submersos em tanques com cal na câmara úmida (Figura 22), onde permaneceram até a execução do ensaio de resistência à compressão.

Figura 21 - Identificação dos corpos de prova



Fonte: Os autores (2023)

Figura 22 - Corpos de prova submersos em tanques na câmara úmida



Fonte: Os autores (2023)

3.2.3.5 Resistencia à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em argamassas com areia natural e teve como base normativa a NBR 7215 (ABNT, 2019). Antes da obtenção da resistência à compressão, o topo e base de cada corpo de prova foram retificados

com o objetivo de produzir superfícies lisas e distribuir de forma uniforme a carga axial. Além disso, foram registradas a altura e dois diâmetros dos corpos de prova, com paquímetro digital, apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Utilização do paquímetro digital para medição dos corpos de prova.



Fonte: Os autores (2023)

A resistência à compressão de cada corpo de prova foi obtida utilizando uma prensa hidráulica EMIC, linha DL 30000, conforme Figura 24. A resistência à compressão do corpo de prova foi adotada como a carga máxima na fratura.

Figura 24 - Prensa hidráulica utilizada no ensaio de resistência à compressão



Fonte: Os autores (2023)

O ensaio foi realizado nas idades de 7 dias, com o rompimento de 4 corpos de prova por lote de FNS ou da referência, e 28 dias, com rompimento de 6 corpos de prova por lote de FNS ou da referência. Os resultados deverão apresentar valores mínimos exigidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018) nas idades de 7 e 28 dias.

Após os ensaios com os cimentos, foi realizada uma avaliação dos resultados de resistência à compressão obtidos, comparando-os com os requisitos da norma de cimento (ABNT NBR 16697, 2018) para 7 e 28 dias, disponíveis na Tabela 5. Inicialmente será verificado as determinações necessárias em norma avaliando se os cimentos estão dentro dos estabelecidos.

Posteriormente, havendo potencial pozolânico e reatividade na escória de ferroníquel, a partir da verificação dos resultados de resistência à compressão, os cimentos serão avaliados de acordo com o CPII-E, e não havendo apresentando reatividade na escória, será realizado um comparativo de acordo com o CPII-F.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

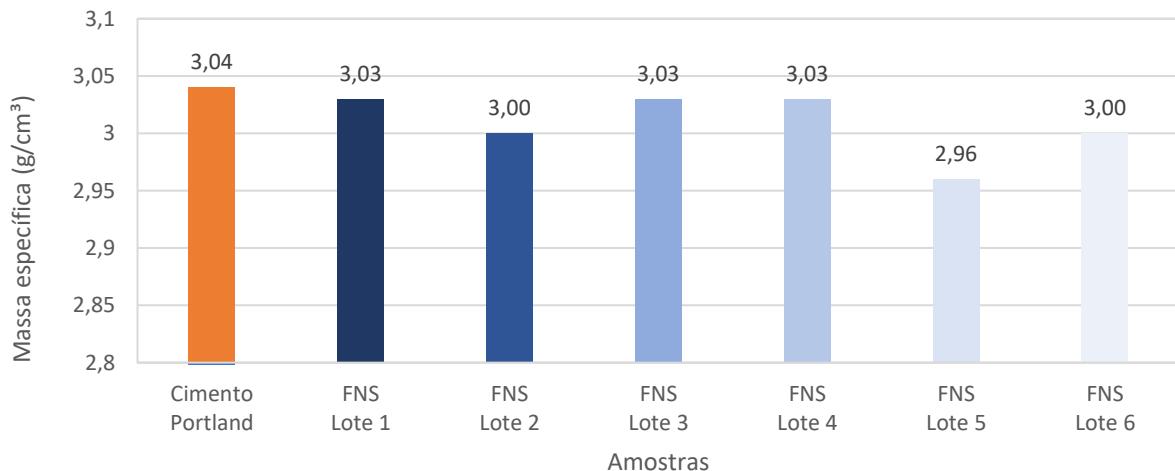
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais realizados ao longo da pesquisa, bem como os resultados obtidos para as misturas no estado fresco e no estado endurecido.

4.1 Caracterização físico-química

4.1.1 Massa específica

Neste ensaio foram obtidas as massas específicas para o cimento Portland e para os seis lotes de FNS. A relação entre as massas específicas dos lotes de escória de ferroníquel com diferentes teores de finuras, comparadas também com a massa específica do cimento Portland utilizado, são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 - Massas específicas do Cimento Portland e das FNS



Fonte: Os autores (2023)

De acordo com os resultados obtidos, não houve variação significativa nas massas específicas entre os lotes de escória de ferroníquel, com o aumento da finura. As massas específicas das FNSs apresentaram valores bem próximos à massa específica do Cimento Portland.

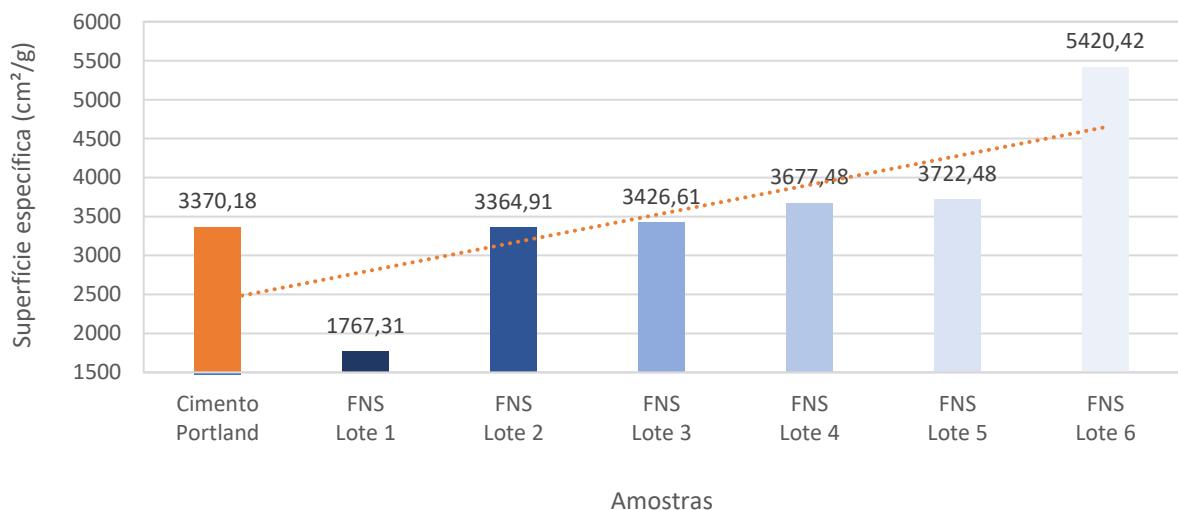
A massa específica do cimento Portland obtida por meio do ensaio não apresentou variação quando comparada com a massa específica disponibilizada no laudo do fabricante.

Os valores obtidos para as seis amostras de escória de ferroníquel estão de acordo com a faixa de variação para massas específicas apresentadas por Han et al. (2023)., cujo valores variam em uma faixa de 2,95 a 3,28 g/cm³.

4.1.2 Permeabilidade de Blaine

O ensaio foi realizado para o Cimento Portland, bem como para os seis lotes de FNS, conforme resultados apresentados na Figura 26.

Figura 26 - Superfície Específica do Cimento Portland e da FNS



Fonte: Os autores (2023)

O Lote 1 de escória de ferroníquel foi a amostra com menor valor de finura obtido a partir do ensaio. Cabe ressaltar que a moagem deste lote foi de apenas uma hora, o que explica o resultado em comparação com as demais amostras do mesmo material.

Nos lotes 2 a 5 de escória de ferroníquel houve um aumento da finura, a partir da análise dos resultados do Ensaio de Blaine, o que era esperado, visto o aumento gradual no tempo de moagem.

No lote 6 de FNS, devido ao elevado tempo de moagem e condições do moinho, houve uma maior perda de material durante as primeiras horas, finalizando a moagem com uma quantidade de material inferior ao que foi obtido nas outras amostras de

FNS. A redução na quantidade de material pode ser um fator que tenha contribuído para maior moagem do material e consequentemente, aumento superior da finura, em comparação com os lotes 2 a 5.

Ainda, em relação à finura, é possível observar que os valores dos Lotes 2 a 5 se assemelham ao valor obtido para o CP V, sendo um dos fatores que justifique o uso da FNS em substituição ao cimento.

Fica evidente que os resultados obtidos para a superfície específica dos lotes de escória de ferroníquel comprovam a eficiência da moagem, ao se observar o aumento na finura, de acordo com o aumento no tempo de moagem das amostras.

Os resultados para os Lotes 2 a 5 de FNS se assemelham aos valores de finura utilizados na literatura. Han et al. (2023) afirmam que a FNS pode ser considerada como materiais cimentícios suplementares (SCMs) em concreto após a moagem em pó com área de superfície específica de 4000 a 5000 cm²/g.

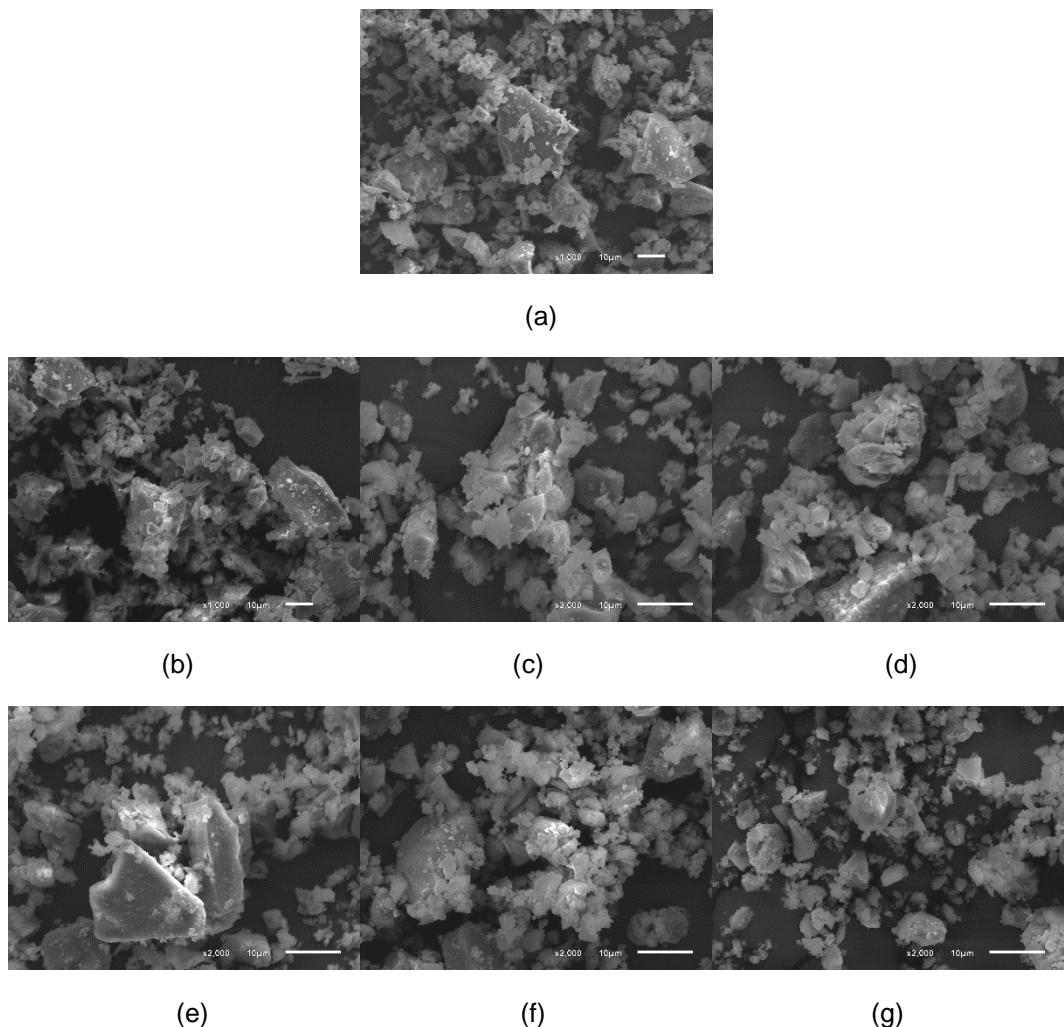
Além disso, as finuras resultantes dos ensaios de superfície específica dos lotes 1 a 5 são menores se comparadas as que foram adotadas por Kim et al. (2019), Han et al. (2023) e Lemonis et al. (2015), os quais concentram suas pesquisas para a análise do desempenho da FNS em teores de 20% ou 30% em substituição ao cimento. Kim et al (2019) utilizou FNS com teores de finuras de 4660 cm²/g, 8140 cm²/g e 26300 cm²/g. Lemonis et al (2015) adotou a incorporação da FNS com um Blaine de 4000 cm²/g. Han et al. (2023) adotaram uma faixa de 4360 a 4610 cm²/g para a finura.

Já o lote 6, apresentou finura um pouco superior à adotada por Rahman et al. (2017). Rahman et al. (2017) concentrou suas pesquisas na análise da FNS com área superficial de 5000 cm²/g.

4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por microscopia eletrônica de varredura ilustrou a morfologia do CPV e dos seis lotes de escória de ferroníquel, após o processo de moagem, apresentadas na Figura 27. O Apêndice A contém as demais imagens obtidas por meio do ensaio, de forma mais detalhada, separadas por lote de escória e cimento Portland.

Figura 27 - Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). (a) MEV do lote Referência; (b) MEV do lote 1 de FNS; (c) MEV do lote 2 de FNS; (d) MEV do lote 3 de FNS; (e) MEV do lote 4 de FNS; (f) MEV do lote 5 de FNS; (g) MEV do lote 6



Fonte: LUCCAR (2023)

Percebe-se que há uma diminuição gradual do tamanho das partículas, conforme o tempo de moagem aumenta. As partículas possuem morfologia similar, apresentando-se mais cúbicas do que o cimento, com exceção do Lote 6 de FNS.

Wang et al. (2022), por meio da análise de imagens da microestrutura do pó de FNS, descreve a escória de ferro níquel com uma forma de partícula relativamente limpa, de estrutura densa e de seção lisa. Já Huang et al. (2017) observaram que as partículas do pó de FNS se apresentam irregulares umas em relação à outra, para uma finura de aproximadamente $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$. As mesmas características pontuadas pelos autores podem ser observadas pelas imagens obtidas para todos os lotes de FNS utilizadas nesta pesquisa.

4.1.4 Detector de energia dispersiva de raios-X (EDS)

Os resultados obtidos por meio do Detector de Energia Dispersiva de Raios-X estão detalhados no Apêndice B.

Para a FNS não houve variações significativas nos elementos químicos de um lote para o outro, visto que as escórias passaram pelo mesmo processo de produção, exceto o tempo de moagem.

A Tabela 8 a seguir apresenta o resumo dos compostos das amostras analisadas, em porcentagem.

Tabela 8 - Composição química do cimento e dos lotes de FNS

Composto químico	CPV	FNS-Lote 1	FNS-Lote 2	FNS-Lote 3	FNS-Lote 4	FNS-Lote 5	FNS-Lote 6
Oxigênio	44,37	34,4	43,05	47,25	56,31	51,97	42,14
Carbono	29,98	51,74	47,68	42,52	21,62	32,12	51,49
Cálcio	17,14	-	-	-	-	-	-
Silício	4,63	5,57	3,63	3,81	8,86	6,32	2,37
Alumínio	1,9	0,60	0,35	0,40	0,88	0,67	0,32
Magnésio	0,99	4,61	3,13	3,31	7,08	5,35	2,13
Ferro	0,67	3,09	2,17	2,72	5,25	3,56	1,54
Enxofre	0,32	-	-	-	-	-	-

Fonte: Os autores (2023)

Observam-se a ausência de cálcio e enxofre nas amostras de FNS. As quantidades de silício e alumínio apresentam-se um pouco variáveis dentre os lotes de escória de ferroníquel. Esses compostos químicos se relacionam com a reatividade do material. Segundo Rahman et al. (2017), o índice de atividade de força pode ser aumentado ou reduzido de acordo com as proporções de sílica e alumina presente na escória de ferroníquel. Além disso, os autores afirmam que altos teores de sílica e alumina podem ajudar a reduzir a permeabilidade e melhorar a durabilidade por meio das reações pozolânicas (RAHMAN et al., 2017).

Comparando os valores obtidos de silício e alumínio para os seis lotes de FNS, é esperado uma maior reatividade no Lote 4 de FNS.

São percebidas variações nos teores de ferro e magnésio, compostos estes que podem influenciar na solidez e no desenvolvimento de resistência do ligante (RAHMAN et al., 2017).

4.1.5 Perda ao fogo

Os valores obtidos para a perda ao fogo dos seis lotes de FNS e do CPV são apresentados na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Valores obtidos de Perda ao fogo

Amostra	Perda ao fogo (%)
Cimento Portland	1,93
FNS – Lote 1	-1,10
FNS – Lote 2	-1,51
FNS – Lote 3	-1,46
FNS – Lote 4	-1,05
FNS – Lote 5	-1,43
FNS – Lote 6	-1,22

Fonte: Os autores (2023)

É percebido que os lotes de FNS ganharam massa durante a perda ao fogo, o que não era esperado, e consiste em um erro de execução. Possivelmente o erro aconteceu devido à balança não estar calibrada. Os ensaios foram repetidos, mas os resultados continuaram inconsistentes. Dessa forma, considerando o erro da balança, foi considerado que não houve perda de massa da escória de ferroníquel ao passar pelo ensaio de perda ao fogo.

Para a amostra de CPV, o valor obtido atende aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018), no qual a perda ao fogo deve ser inferior à 6,5%. Já para o CP II, o valor máximo é de 8,5%, o que está também em conformidade.

4.1.6 Resíduo Insolúvel

Os resultados obtidos por meio do ensaio de Resíduo Insolúvel para as seis amostras de FNS e para o cimento Portland estão representados na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores obtidos no ensaio de Resíduo Insolúvel

Amostra	Resíduo Insolúvel (%)
Cimento Portland	0,81%
FNS – Lote 1	39,38%
FNS – Lote 2	25,78%
FNS – Lote 3	25,63%
FNS – Lote 4	25,31%
FNS – Lote 5	22,25%
FNS – Lote 6	26,38%

Fonte: Os autores (2023)

Os valores obtidos para os lotes de FNS se encontram superiores se comparados ao CPV. Durante o ensaio, não houve queima total do filtro nas amostras da escória de feroníquel, que é um fator que corrobora para estes valores inconsistentes.

Foram utilizados filtros novos e foi realizado o ensaio de branco para verificação e houve queima total do filtro, não sendo possível identificar pelos técnicos e pelos pesquisadores o motivo dos filtros não estarem sendo queimados nas amostras de FNS, mesmo após a repetição do ensaio. No entanto, fica evidente a influência deste fator nos resultados nos lotes de escória de feroníquel, ou seja, era esperados valores menores para os resíduos insolúveis de todos os lotes de FNS.

Para o cimento Portland, o resultado ficou dentro do que é esperado pela NBR 16697 (ABNT, 2018), no qual o resíduo insolúvel deve ser inferior à 3,5%.

4.2 Ensaios em argamassa

4.2.1 Índice de consistência

O ensaio foi realizado para cada uma das 7 misturas, conforme apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Diâmetro médio das argamassas obtidos no ensaio de índice de consistência. (a) Medida de um dos diâmetros do lote Referência; (b) Medida de um dos diâmetros do lote 1 de FNS; (c) Medida de um dos diâmetros do lote 2 de FNS; (d) Medida de um dos diâmetros do lote 3 de FNS.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



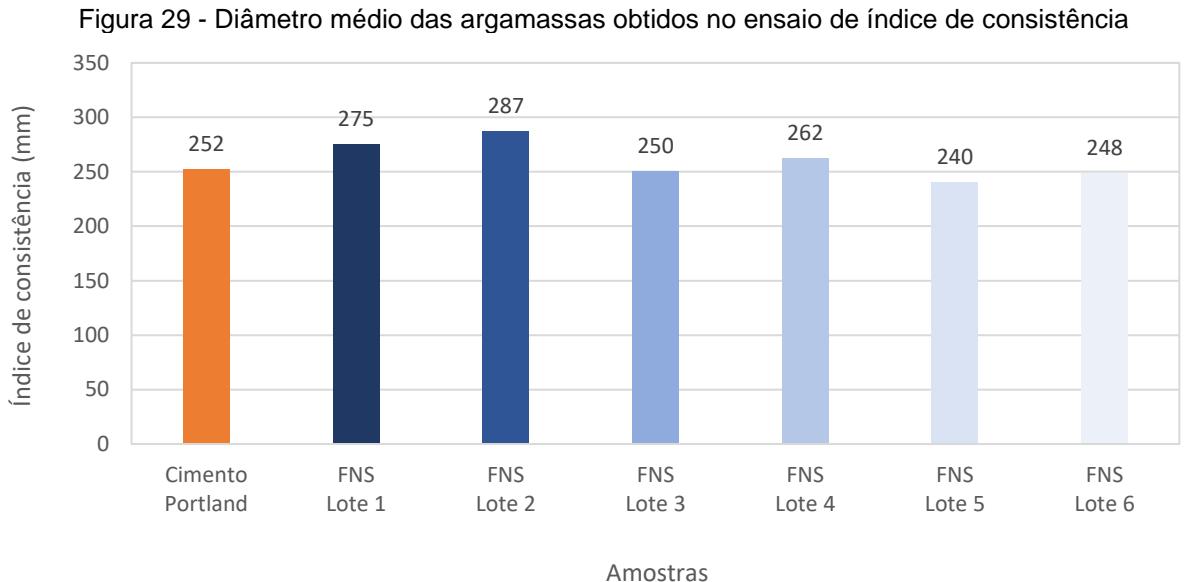
(f)



(g)

Fonte: Os autores (2023)

Os resultados obtidos estão representados na Figura 29.



Fonte: Os autores (2023)

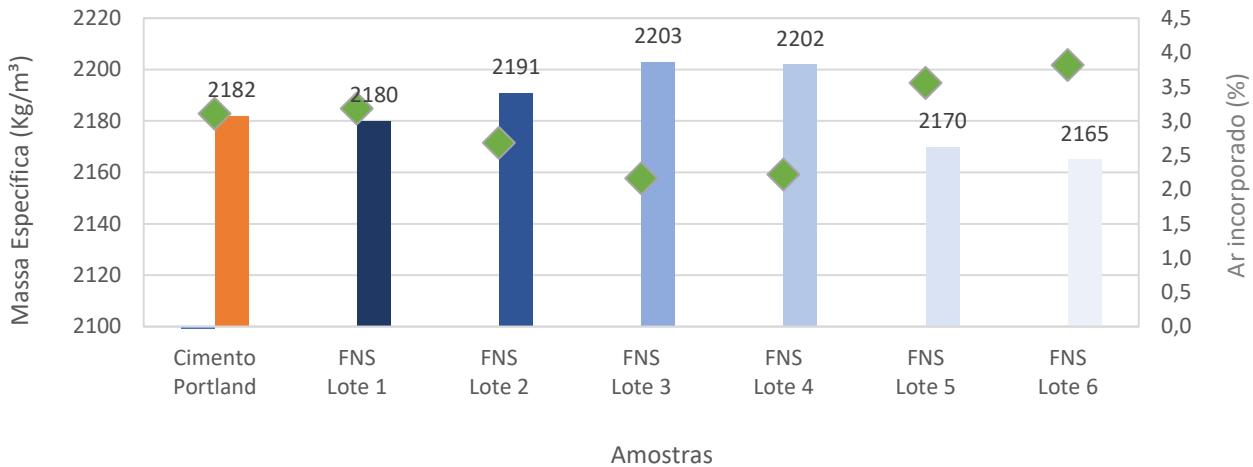
Apesar dos resultados oscilarem, como a quantidade de água foi constante em todas as misturas, observou-se uma pequena redução na fluidez das pastas com o aumento da finura, o que está de acordo com o que é apresentado nos estudos de Kim et al. (2019).

Lemonis et al. (2015) e Han et al. (2023) observaram uma melhora no índice de consistência nos traços contendo escória de ferroníquel em comparação com a referência, contendo apenas cimento Portland, o que pode ser observado também para os lotes 1, 2 e 4. Conforme citado anteriormente por Lemonis et al (2015), a melhora na consistência das misturas contendo FNS em comparação com a referência é explicado pelo retardamento na hidratação da escória, por ser menos reativo que o cimento Portland.

4.2.2 Massa específica e teor de ar incorporado

A partir dos valores obtidos para massa específica, foram calculados os teores de ar incorporado. Os resultados para os cálculos realizados segundo as equações 8 e 9 estão apresentados na Figura 30 juntamente com as respectivas massas específicas.

Figura 30 - Massa específica e teor de ar incorporado das argamassas do CPV e dos lotes de FNS



Fonte: Os autores (2023)

Conforme se observa nos valores obtidos para massa específica e teor de ar incorporado, o aumento nos valores da massa específica acarreta na diminuição no teor de ar incorporado.

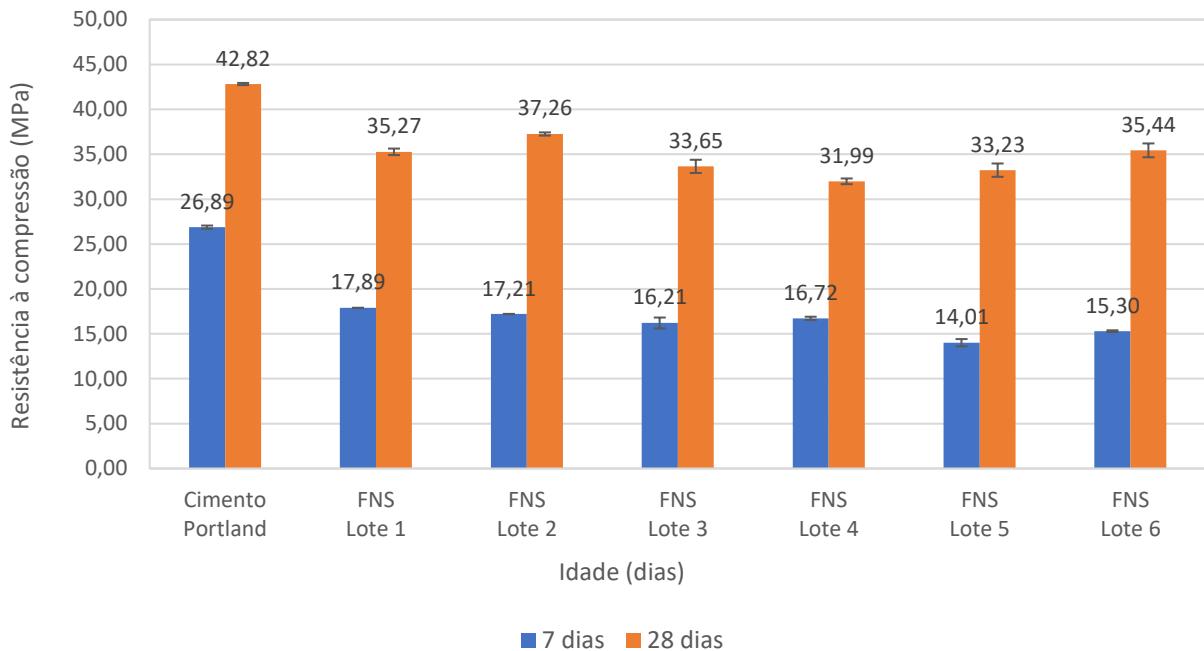
Os lotes 5 e 6 de FNS, quando comparados as demais misturas, apresentaram menor massa específica, e consequentemente, valores maiores para os teores de ar incorporado.

Segundo Schankoski (2021) o teor de ar incorporado/aprisionado no material, quando elevado, pode levar a reduções significativas na resistência do concreto.

4.3 Resistência à compressão

Para obtenção dos resultados dos ensaios de resistência à compressão, os corpos de prova foram rompidos na prensa hidráulica. Na Figura 31 apresenta os valores de resistência à compressão dos seis lotes de FNS e do lote de referência, nas idades de 7 e 28 dias.

Figura 31 - Resistência mecânica à compressão para os lotes referência e FNS



Fonte: Os autores (2023)

Pode se observar que, tanto para o lote referência, como para os lotes contendo FNS, as resistências foram proporcionais ao tempo, ou seja, as resistências à compressão sofreram um aumento conforme as reações de hidratação iam ocorrendo, o que era esperado.

Quando comparados com o lote de referência, os traços contendo FNS sofreram uma redução na resistência, tanto para a idade de 7 dias, como para a idade de 28 dias. Na idade de 7 dias, em comparação com o lote referência, com o aumento da finura, os lotes de FNS tiveram uma redução de respectivamente 33,47%, 36%, 39,72% 37,82%, 47,90% e 43,10%, percebendo-se uma maior variação no Lote 5. Já para a idade de 28 dias, a redução entre os lotes de escória de ferroníquel, com o aumento do tempo de moagem, em comparação com a referência, foi de respectivamente 17,63%, 12,98%, 21,42%, 25,29%, 22,40% e 17,23%, com uma maior variação no Lote 4.

Esses resultados eram esperados, visto que Lemonis et al. (2015), Rahman et al (2017), Kim et al. (2019) e Han et al. (2023) afirmam em seus estudos que a incorporação da escória de ferroníquel em substituição ao cimento reduziu as resistências à compressão em todas as idades. Os autores consideram que a redução na resistência mecânica ocorre devido ao retardo na taxa de hidratação ao se

adicionar FNS, mas que é possível uma contribuição da atividade pozolânica para o desenvolvimento da resistência em idade tardia.

Por meio dos resultados obtidos, fica evidente que o aumento da finura da FNS, em substituição à 20% do cimento, não contribuiu para a melhoria da resistência nas idades de 7 e 28 dias.

A Tabela 11 mostra o índice de cimento para as argamassas produzidas. Este índice é útil para comparar o desempenho mecânico de misturas com diferentes teores de cimento (SCHANKOSKI et al, 2019). A mistura referência apresentou 11,16 kg/m³.MPa. Os lotes 1, 2, 3 e 6 de FNS apresentaram valores um pouco menores. Isso significa que para atingir a mesma resistência, as misturas contendo FNS citadas requerem menos cimento, o que é vantajoso do ponto de vista ambiental e econômico.

Tabela 11 - Índice de cimento para as argamassas produzidas

Amostra	Consumo de cimento	kg.m³/MPa
Referência	478,509	11,162
FNS – Lote 1	382,456	10,562
FNS – Lote 2	384,386	10,409
FNS – Lote 3	386,491	11,055
FNS – Lote 4	386,316	11,217
FNS – Lote 5	380,702	14,323
FNS – Lote 6	379,825	10,717

Fonte: Os autores (2023)

5 CONCLUSÃO

A incorporação de escória de feroníquel em substituição ao cimento Portland é uma alternativa promissora para a produção de concreto sustentável e de baixo impacto ambiental. Com base nos estudos e pesquisas realizadas, é possível concluir que essa substituição pode trazer benefícios ambientais como melhorias para o concreto no estado fresco e endurecido.

A adição de escória de feroníquel ao concreto apresentou melhorias no índice de consistência em alguns lotes, por conta do seu retardo na hidratação. Já na resistência à compressão, os valores encontrados ficaram abaixo do lote referência. Para a idade de 7 dias, os valores obtidos para os lotes de FNS tiveram seus valores reduzidos em uma faixa de 33% à 47%, em relação à referência. Para a idade de 28 dias, essa redução dos lotes de FNS em relação à referência variou de 12% à 25%. No entanto, a partir da revisão de literatura, considera-se uma possibilidade no aumento da resistência em idades mais avançadas. Isso pode ser explicado pela atividade pozolânica que ocorre em idades tardias e pelo retardo na hidratação que a escória de feroníquel proporciona.

Portanto, o aumento da finura não foi um fator que interferiu no aumento da resistência mecânica das argamassas para 7 e 28 dias, quando comparadas à referência.

Outros indicadores como Perda do Fogo e Resíduo Insolúvel, apresentaram resultados não conclusivos e fenômenos fora do padrão, o que faz crer que também são necessários mais estudos para tal.

É importante ressaltar que a incorporação de escória de feroníquel requer uma análise cuidadosa das características específicas da escória e das propriedades desejadas em misturas cimentícias, a fim de otimizar as proporções e garantir o desempenho adequado do material.

Além disso, é fundamental observar as normas técnicas relacionadas à utilização de adições minerais no concreto, a fim de garantir a conformidade com as especificações técnicas e garantir a durabilidade das estruturas construídas.

Portanto, a utilização da escória de feroníquel como adição mineral no concreto deve ser incentivada e explorada principalmente como uma alternativa ambientalmente amigável na indústria da construção civil.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

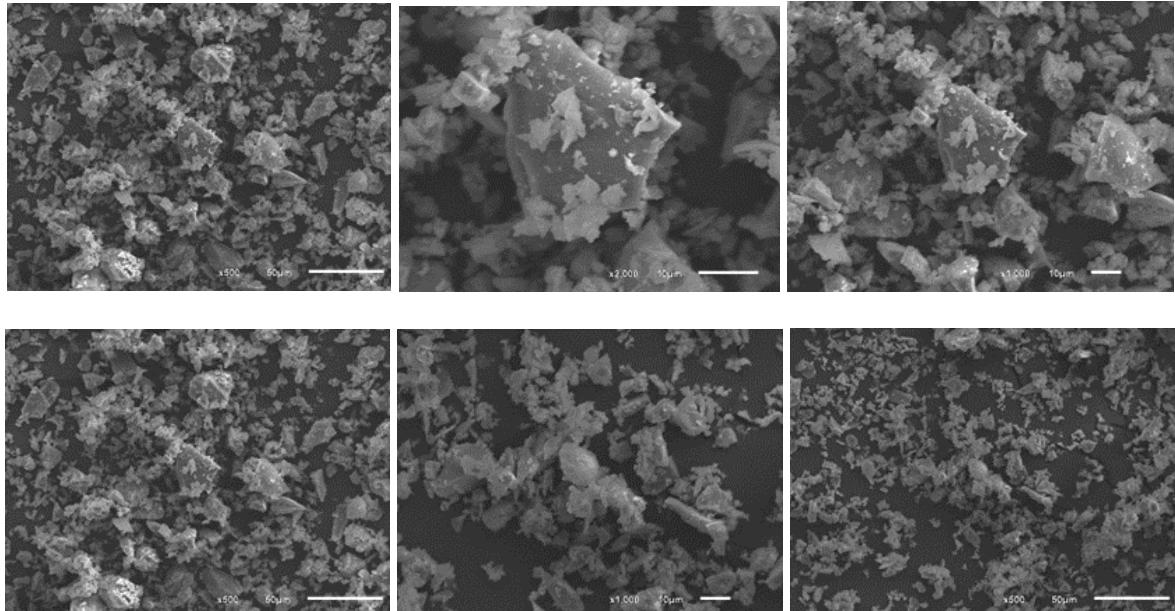
A seguir são pontuadas sugestões para trabalhos futuros, que podem contribuir na evolução das pesquisas e entendimento do uso da FNS com diferentes teores de moagem como material cimentício suplementar.

- Realizar o ensaio de granulometria a laser das amostras de FNS e do Cimento Portland, a fim de comparar suas granulometrias e compará-las aos resultados de superfície específica obtido, além de analisar os resultados de resistência à compressão, verificando a influência da finura nas propriedades no estado endurecido;
- Avaliar a resistência à compressão em idades superiores a 28 dias, visto que muitas literaturas afirmam que pode haver uma melhoria nas resistências mecânicas em idades tardias;
- Avaliar o uso da escória moída, com os mesmos tempos de moagem, em diferentes teores de FNS incorporada, e não apenas em 20% em substituição ao cimento;
- Realizar ensaios para analisar o tempo de pega do concreto ou argamassa, com o objetivo de verificar a influência da reatividade da escória de ferroníquel nas misturas.

7 APÊNDICE

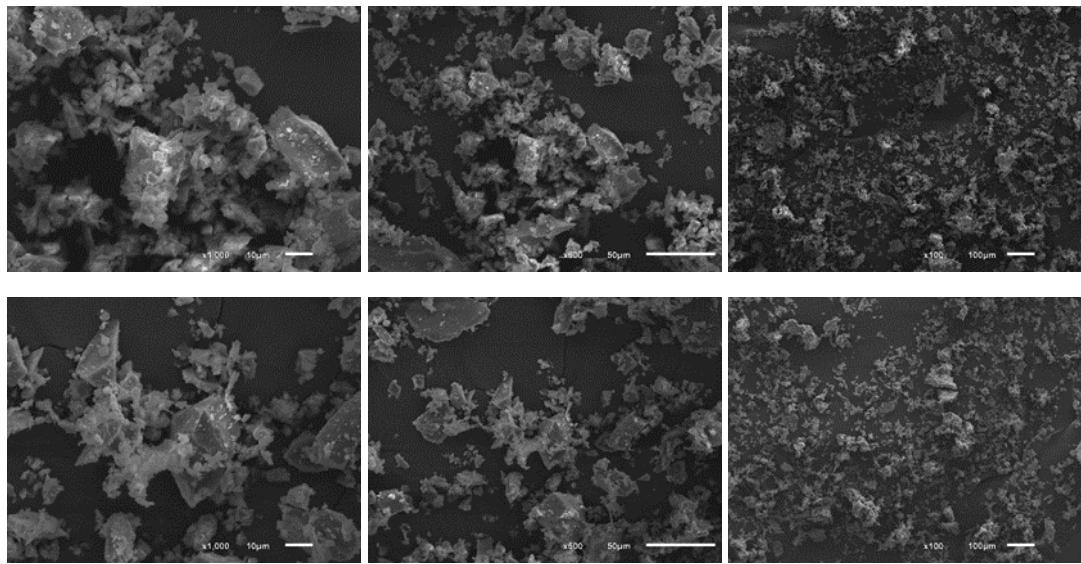
APÊNDICE A – IMAGENS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A) Cimento Portland



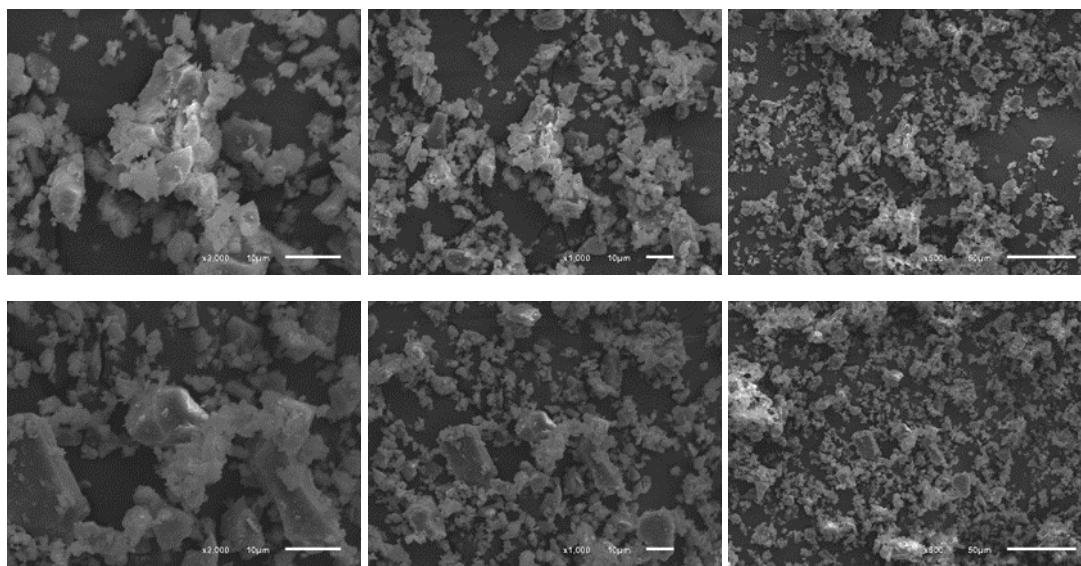
Fonte: LUCCAR (2023)

B) FNS – LOTE 1



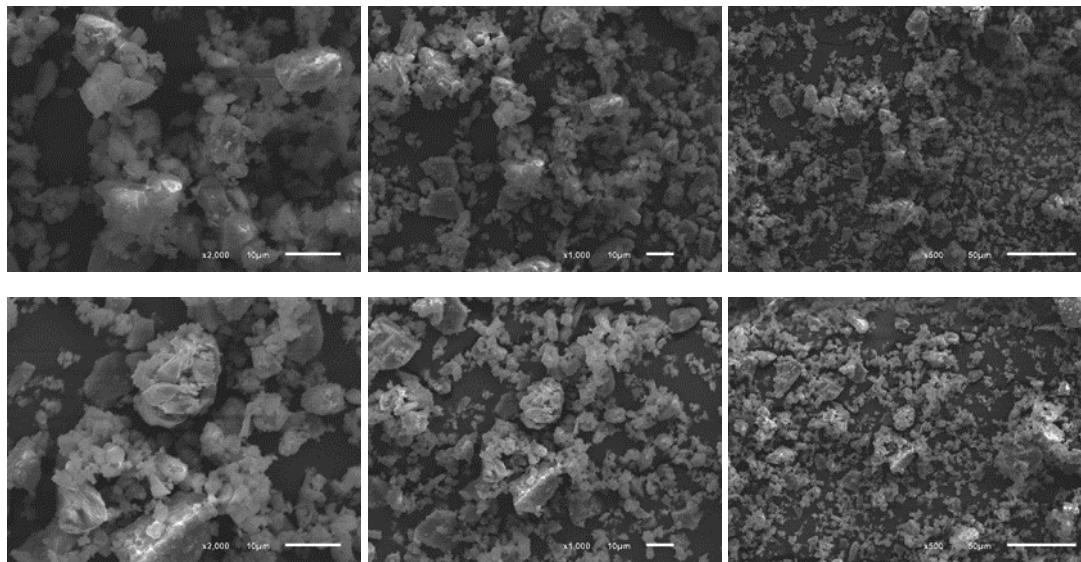
Fonte: LUCCAR (2023)

C) FNS – LOTE 2



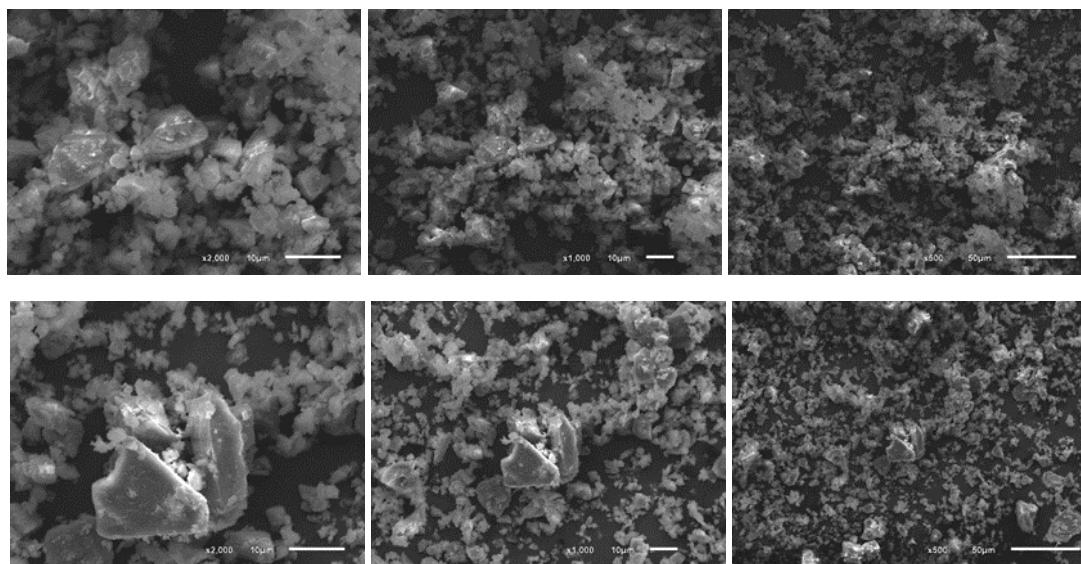
Fonte: LUCCAR (2023)

D) FNS – LOTE 3



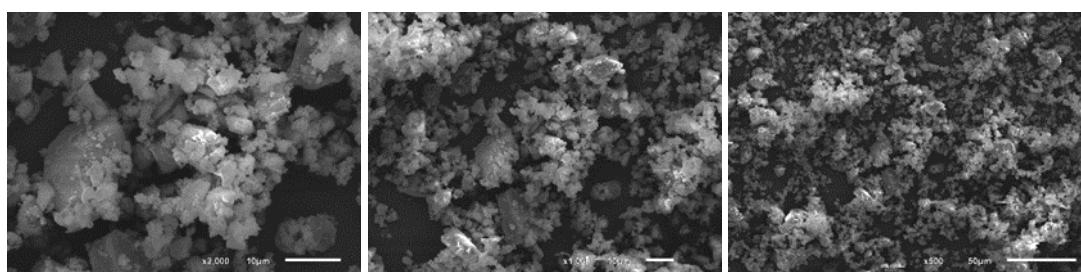
Fonte: LUCCAR (2023)

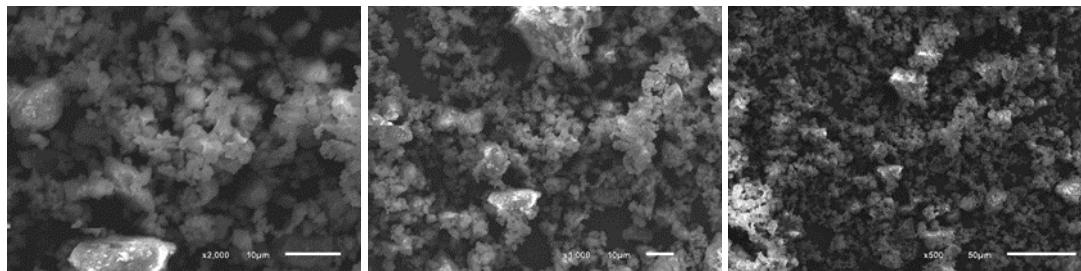
E) FNS – LOTE 4



Fonte: LUCCAR (2023)

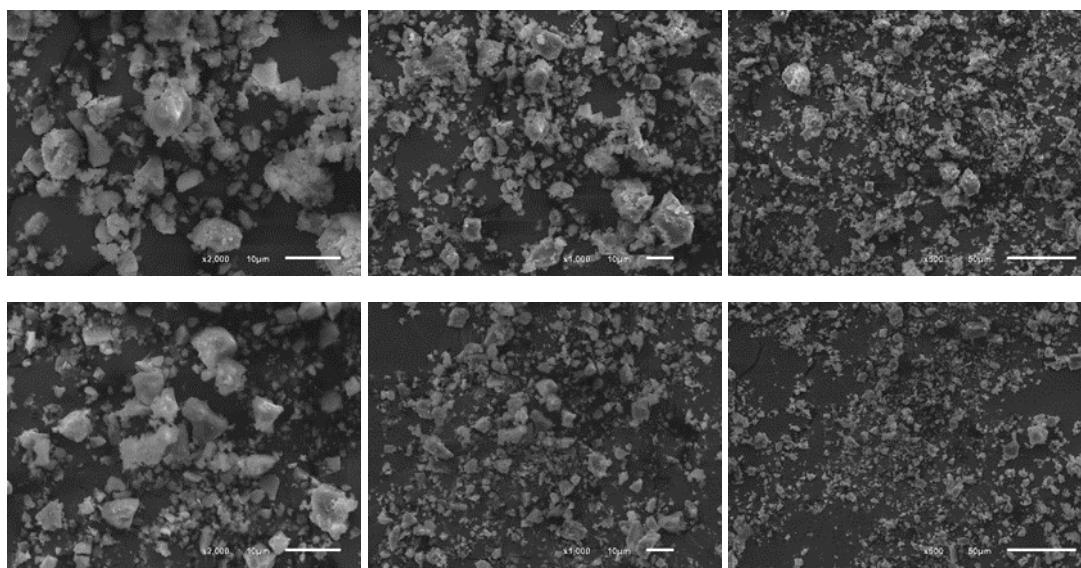
F) FNS – LOTE 5





Fonte: LUCCAR (2023)

G) FNS – LOTE 6



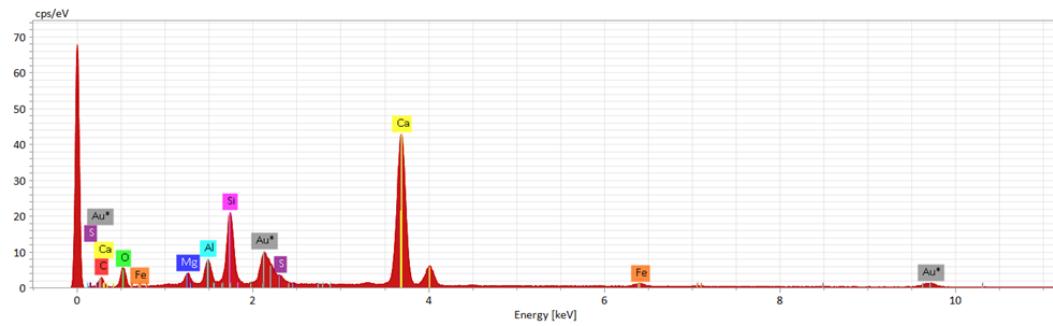
Fonte: LUCCAR (2023)

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS POR EDS

A) Cimento Portland

cpv 65

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Oxygen	8	5173	47.89	44.37	46.26	2.61	5.45
Carbon	6	1998	32.35	29.98	41.63	1.90	5.86
Calcium	20	80062	18.50	17.14	7.14	0.52	2.78
Silicon	14	26874	4.99	4.63	2.75	0.21	4.17
Aluminium	13	8023	2.05	1.90	1.17	0.10	5.06
Magnesium	12	3284	1.07	0.99	0.68	0.07	6.53
Iron	26	1767	0.72	0.67	0.20	0.04	4.86
Sulfur	16	1697	0.34	0.32	0.17	0.02	7.08
		Sum	107.92	100.00	100.00		

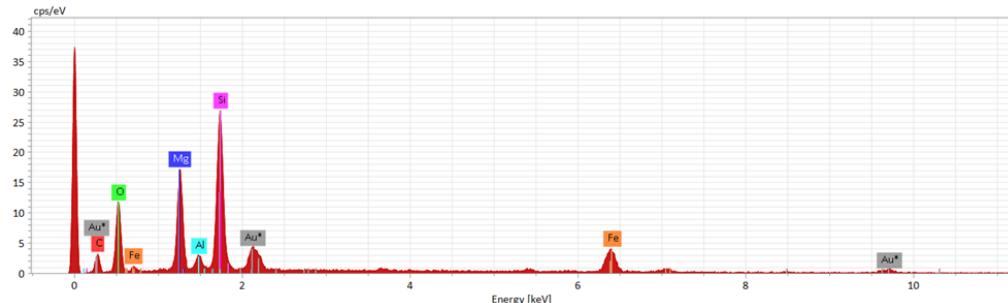


Fonte: LUCCAR (2023)

B) FNS – LOTE 1

1 66

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Oxygen	8	5466	73.38	51.74	49.27	3.80	5.19
Carbon	6	1214	48.79	34.40	43.64	3.00	6.16
Silicon	14	16923	7.90	5.57	3.02	0.43	5.39
Magnesium	12	9054	6.53	4.61	2.89	0.45	6.87
Iron	26	4310	4.38	3.09	0.84	0.21	4.89
Aluminium	13	1353	0.85	0.60	0.34	0.06	7.46
		Sum	141.83	100.00	100.00		

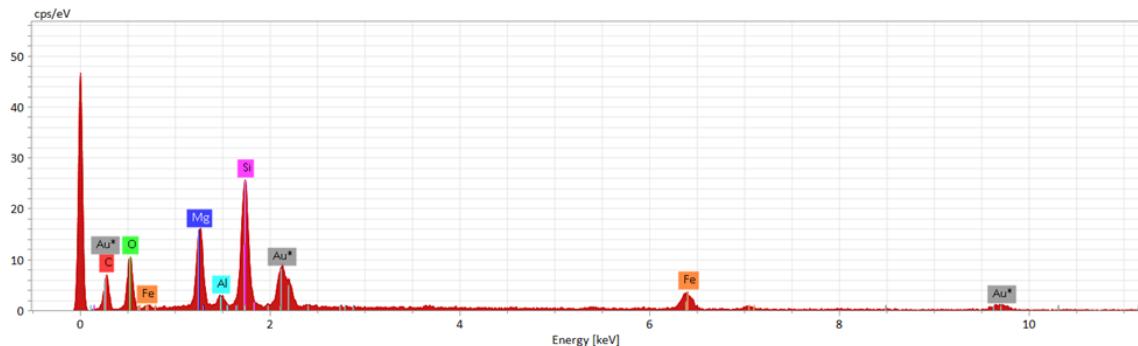


Fonte: LUCCAR (2023)

C) FNS – LOTE 2

2.67

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	1612	47.68	47.68	56.96	2.76	5.78
Oxygen	8	2742	43.05	43.05	38.60	2.38	5.52
Magnesium	12	5047	3.13	3.13	1.85	0.25	7.88
Silicon	14	9251	3.63	3.63	1.85	0.23	6.24
Iron	26	2104	2.17	2.17	0.56	0.14	6.47
Aluminium	13	664	0.35	0.35	0.19	0.03	9.80
		Sum	100.00	100.00	100.00		

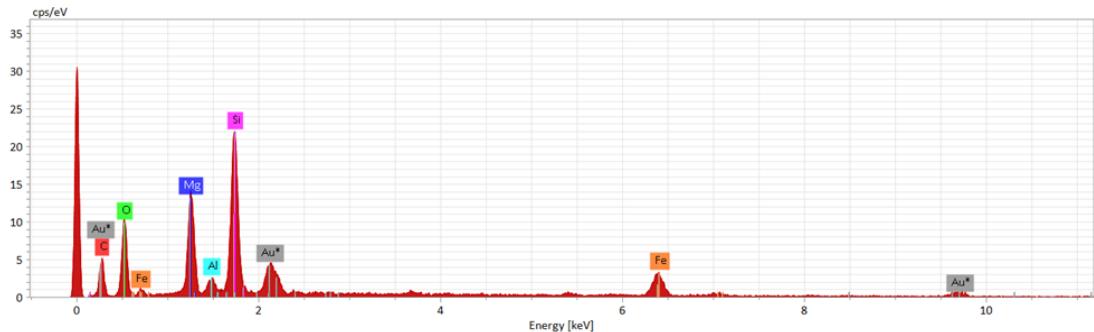


Fonte: LUCCAR (2023)

D) FNS – LOTE 3

3.68

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Oxygen	8	3593	90.43	47.25	43.25	4.86	5.37
Carbon	6	1464	81.38	42.52	51.85	4.81	5.92
Silicon	14	10708	7.29	3.81	1.99	0.45	6.12
Magnesium	12	5847	6.33	3.31	1.99	0.49	7.70
Iron	26	2590	5.20	2.72	0.71	0.35	6.65
Aluminium	13	839	0.77	0.40	0.22	0.07	8.74
		Sum	191.38	100.00	100.00		

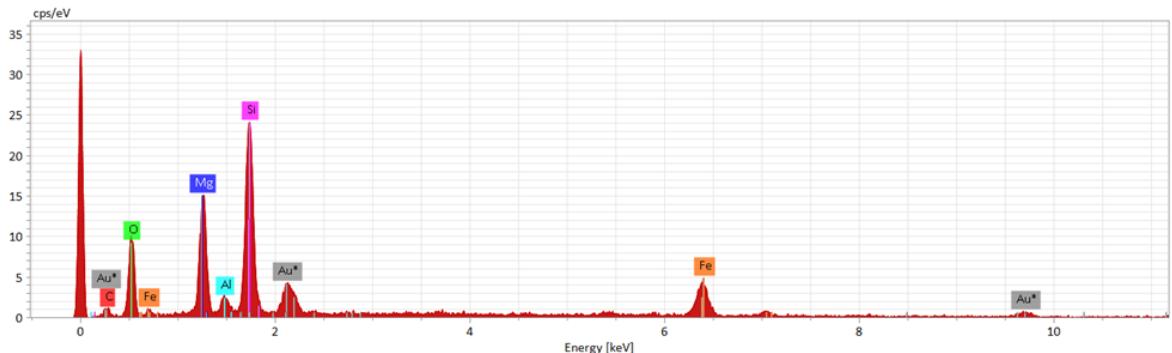


Fonte: LUCCAR (2023)

E) FNS – LOTE 4

4 69

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Oxygen	8	2422	61.91	56.31	58.15	3.28	5.30
Carbon	6	188	23.77	21.62	29.74	2.56	10.76
Silicon	14	8180	9.74	8.86	5.21	0.69	7.04
Magnesium	12	4289	7.78	7.08	4.81	0.67	8.64
Iron	26	2380	5.77	5.25	1.55	0.39	6.76
Aluminium	13	600	0.97	0.88	0.54	0.10	10.03
		Sum	109.94	100.00	100.00		

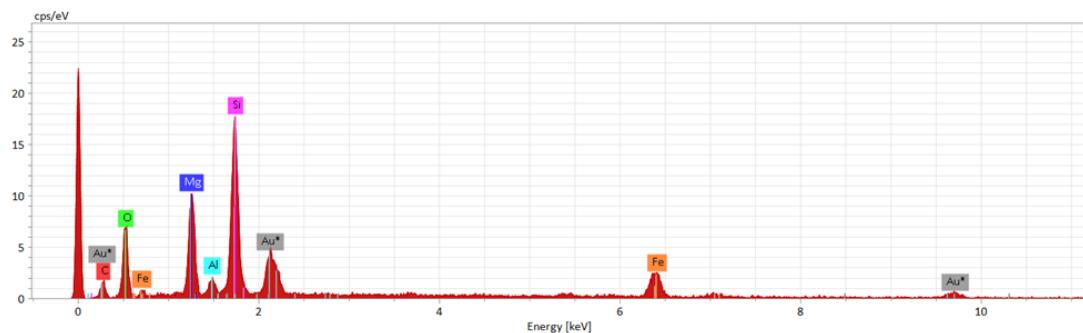


Fonte: LUCCAR (2023)

F) FNS – LOTE 5

5 70

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Oxygen	8	2600	66.52	51.97	50.31	3.59	5.40
Carbon	6	484	41.11	32.12	41.42	3.10	7.54
Silicon	14	8922	8.09	6.32	3.49	0.53	6.59
Magnesium	12	4579	6.85	5.35	3.41	0.57	8.32
Iron	26	2335	4.55	3.56	0.99	0.29	6.44
Aluminium	13	678	0.86	0.67	0.38	0.08	9.53
		Sum	127.98	100.00	100.00		

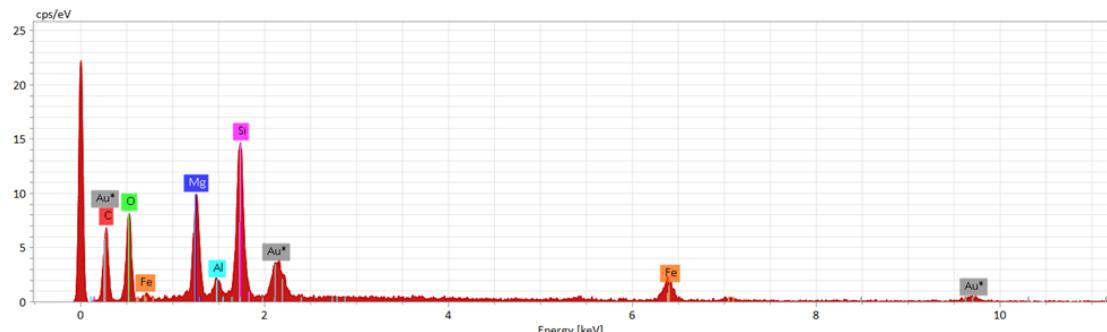


Fonte: LUCCAR (2023)

G) FNS – LOTE 6

6 71

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	rel. error [%] (1 sigma)
Carbon	6	1912	51.49	51.49	60.11	2.88	5.59
Oxygen	8	2458	42.14	42.14	36.93	2.35	5.59
Silicon	14	6078	2.37	2.37	1.18	0.16	6.90
Magnesium	12	3414	2.13	2.13	1.23	0.18	8.61
Iron	26	1343	1.54	1.54	0.39	0.12	7.95
Aluminium	13	612	0.32	0.32	0.17	0.03	9.99
		Sum	100.00	100.00	100.00		



Fonte: LUCCAR (2023)

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto**, 2013. Disponível em <<https://abcp.org.br/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>> Acesso em: Novembro de 2022.

ABED, M. H.; ABBAS, I. S.; HAMED, M.; CANAKCI, H. **Rheological, fresh, and mechanical properties of mechanochemically activated geopolymers grout: A comparative study with conventionally activated geopolymers grout**. Construction and Building Materials, Turkey, v. 322, 2022.

ANGLO AMERICAN. **Visita técnica a Usina de Barro Alto – Go**. Entrevista concedida a Dr. Ronaldo Pilar. Dezembro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479 – Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582 – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 22 – Cimento Portland com adição de materiais pozolânicos – Análise química – Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012.

BORGAS, J.A.; CARRIÇO, A.; REAL, S. **Durability of concrete produced with recycled cement from waste concrete.** Materials Today: Proceedings, Lisbon, v.58, part 4, p. 1149-1154, 2022.

CHOI, Y.C.; CHOI, S. **Alkali–silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions.** Construction and Building Materials, Korea, v. 99, p. 279-287, 2015.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Indústria brasileira de cimento. Base para a construção do desenvolvimento. Encontro da indústria para a sustentabilidade,** 2012. Disponível em <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002162355200901e.pdf> Acesso em: Outubro de 2022.

DALVI, A. D.; BACON, W. G.; OSBORNE, R. C. **The Past and the Future of Nickel Laterites.** PDAC 2004 International Convention, n. Figure 2, p. 1–28, 2004.

GENEROSI, A.; SMIRNOV, V.V.; RAU, J.V.; ALBERTINI, ROSSI ALBERTINI, V.; FERRO, D.; BARINOV, S.M. **Phase development in the hardening process of two calcium phosphate bone cements: an energy dispersive X-ray diffraction study.** Materials Research Bulletin, Italy, v. 43, p. 561-571, 2008.

GUIMARÃES, C.D.G.G. **Caracterização Tecnológica de Minério de Níquel Laterítico.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 16-73, 2019.

HAN, C.; HONG, Y. **Adverse health effects of ferronickel manufacturing factory on local residents: An interrupted time series analysis.** Environment International, Republic of Korea, v. 114, p. 288-296, 2018.

HAN, F.; ZHANG, H.; LI, Y.; ZHANG, Z. **Recycling and comprehensive utilization of ferronickel slag in concrete.** Journal of Cleaner Production, China, v. 414, 2023.

HAN, F.; ZHANG, H.; PU, S.; ZHANG, Z. **Hydration heat and kinetics of composite binder containing blast furnace ferronickel slag at different temperatures.** Thermochimica Acta, China, v. 702, p. 1-12, 2021.

HUANG, Y.; WANG, Q.; SHI, M. **Characteristics and reactivity of ferronickel slag powder.** Construction and Building Materials, China, v.156, p. 773-789, 2017.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D.; BARTZAS, G. **Effect of sulphate and nitrate anions on heavy metal immobilisation in ferronickel slag geopolymers.** Applied Clay Science, Greece, v. 73, p. 103-109, 2013.

LEMONIS, N.; TSAKIRIDIS, P.E.; KATSIOTIS, N.S.; ANTIOHOS, S.; PAPAGEORGIOU, D.; KATSIOTIS, M.S.; BEAZI-KATSIOTI, M. **Hydration study of ternary blended cements containing ferronickel slag and natural pozzolan.** Construction and Building Materials, Greece, v. 81, p. 130-139, 2015.

LI, B; HUO, B; CAO, R; WANG, S. ZHANG. **Sulfate resistance of steam cured ferronickel slag blended cement mortar.** Cement and Concrete Composites, China, v. 96, p. 204-211, 2019.

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, China, v. 320, p. 2-13, 2022.

LIMA, A.B DE. O processo produtivo de cimento Portland. Dissertação do curso de especialização. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 13-14, 2011.

LIU, P.; LI, B.; CHEUNG, S.C.P.; WU, W. Material and energy flows in rotary kiln-electric furnace smelting of ferronickel alloy with energy saving. Applied Thermal Engineering, China, v. 109, p. 542-559, 2016.

LIU, X.; LI, T.; TIAN, W.; WANG, Y.; CHEN, Y. Study on the durability of concrete with FNS fine aggregate. Journal of Hazardous Materials, China, v. 381, p. 1-9, 2020.

LIU, Y.; LI, Y.; MU, J.; LI, H.; SHEN, J. Modeling and analysis of creep in concrete containing supplementary cementitious materials based on machine learning. Construction and Building Materials, China, v. 392, 2023.

LU, J.; YUAN, H.; WANG, D. Understanding the improvement of Mg-rich electrical ferronickel slag on magnesium potassium phosphate cement's performance. Journal of Building Engineering, China, v. 75, 2023.

LUO, J.; LI, G.; RAO, M.; PENG, Z.; LIANG, G.; JIANG, T.; GUO, X. Control of slag formation in the electric furnace smelting of ferronickel for an energy-saving production. Journal of Cleaner Production, China, v. 287, 2021.

MALISKA, ANA MARIA. Microscopia eletrônica de varredura. Laboratório de caracterização microestrutural e análise de imagens. Disponível em: <https://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: Junho de 2023.

MEHTA P.K, MONTEIRO P.J.M. Concrete: Microstructure, properties, and materials. 3ed. p.205. 2006.

MUDD, GAVIN. **Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites.** Ore Geology Reviews, Australia, v. 38, p. 9-26, 2010.

NAKAJIMA, K.; NANSAI, K.; MATSUBAE, K.; TOMITA, M.; TAKAYANAGI, W.; NAGASAKA, T. **Global land-use change hidden behind nickel consumption.** Science of The Total Environment, Japan, v. 586, p. 730-737, 2017.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** 5ed. p.02-09, 2016.

NORGATE, T.; JAHANSHAHI, S. **Assessing the energy and greenhouse gas footprints of nickel laterite processing.** Minerals Engineering, Japan, v.24, p. 698-707, 2011.

RAHMAN, M.A.; SARKER P.K.; SHAIKH F. U. A.; SAHA A.K. **Soundness and compressive strength of Portland cement blended with ground granulated ferronickel slag.** Construction and Building Materials, Australia, v. 140, p. 194-202, 2017.

RAO, M., LI, G., JIANG, T. ET AL. **Carbothermic Reduction of Nickeliferous Laterite Ores for Nickel Pig Iron Production in China: A Review.** JOM 65, p. 1573–1583, 2013.

ROMERO, J. M.; PARDO, Y. S.; PARRA, M.; CASTILLO, A. J.; MAURY, H.; CORREDOR, L.; SÁNCHEZ, I.; RUEDA, B.; GONZALEZ-QUIROGA, A. **Improving the rotary kiln-electric furnace process for ferronickel production: Data analytics-based assessment of dust insufflation into the rotary kiln flame.** Alexandria Engineering Journal, Colombia, v. 61, p. 3215-3228, 2022.

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

SAHA, A.K.; SARKER, P.K. **Compressive Strength of Mortar Containing Ferronickel Slag as Replacement of Natural Sand.** Procedia Engineering, Australia, v. 171, p. 689-694, 2017.

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

SAHA, A.K.; SARKER, P.K. **Sustainable use of ferronickel slag fine aggregate and fly ash in structural concrete: Mechanical properties and leaching study.** Journal of Cleaner Production, China, v. 162, p. 438-448, 2017.

SCHANKOSKI, R.A.; PILAR, R.; MATOS, P.R.; PRUDÊNCIO, L.R.; FERRON, R.D. **Fresh and hardened properties of self-compacting concretes produced with diabase and gneiss quarry by-product powders as alternative fillers.** Construction and Building Materials, Brazil, v. 224, p. 659-670, 2019.

SCHANKOSKI, R.A. **Notas de aula.** Apostila da disciplina Materiais de Construção da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, p. 50-56, 2020.

SCHANKOSKI, R.A. **Subprojeto de Iniciação Científica – Piic.** Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória, 2021.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry.** Cement and Concrete Research, Switzerland, v. 114, p. 2-26, 2018.

SHEN, W.; CAO, L.; LI, Q.; ZHANG, W.; WANG, G. **Quantifying CO₂ emissions from China's cement industry.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 50, p. 1004- 1012, 2015.

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

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, **Relatório Anual**, 2013. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2013.pdf>. Acesso em: Novembro de 2022.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria de Cimento. **Processo Produtivo**, 2022. Disponível em <<http://snic.org.br/processo-de-producao.php>>. Acesso em: Outubro de 2022.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, **Relatório Anual**, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf>. Acesso em: Novembro de 2022.

SOUZA, V.C.; RIPPER, T., **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo, Pini, 1998.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO (UFOP). Laboratório de Microscopia Eletrônica (LMIC). **Microscopia Eletrônica**. Disponível em: <<https://lmic.degeo.ufop.br/microscopia-eletr%C3%A9nica>>. Acesso em: Junho de 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (UFES). **Laboratório de Computação Científica de Alto Desempenho (LUCCAR)**. Infraestrutura. Disponível em: <<https://luccar.ufes.br/infraestrutura>>. Acesso em: Junho de 2023.

USGS – U.S. Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries 2022**, 2022. Disponível em <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>>. Acesso em: Julho de 2022.

WANG, D.; WANG, Q.; ZHUANG, S.; YANG, J. **Evaluation of alkali-activated blast furnace ferronickel slag as a cementitious material: Reaction mechanism, engineering properties and leaching behaviors**. Construction and Building Materials, China, v. 188, p. 860-873, 2018.

WANG, H.; LIU, X.; ZHANG, Z. **Pozzolanic activity evaluation methods of solid waste: A review.** Journal of Cleaner Production, China, v. 402, p. 1-14, 2023.

WANG, X.; WU, W.; ZHANG, L.; FU, L.; LI, X. **Preparation of one-part alkali-activated nickel slag binder using an optimal ball milling process.** Construction and Building Materials, China, v. 322, p. 1-15, 2022.

WANG, J.; XU, L.; LI, M.; WANG, Y.; HE, H.; XIANG, D.; LI, K.; H, T. **Investigations on factors influencing physical properties of recycled cement and the related carbon emissions and energy consumptions.** Journal of Cleaner Production, China, v. 414, p. 1-14, 2023.

WARNER, A.E.M.; DÍAZ, C.M.; DALVI, A.D.; MACKEY, P.J.; TARASOV, A.V. **JOM World Nonferrous Smelter Survey, Part III: Nickel: Laterite.** Industrial Survey, 2016.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050.** 2009. Disponível em: <<https://www.wbcsd.org/>>. Acesso em: Novembro de 2022.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency, 2018.** Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>>. Acesso em: Julho de 2023.

XAVIER, P. H. **Preparação de Cerâmicas Nanoestruturadas de Ca₃Co₄O₉ para Aplicação em Dispositivos Termoelétricos.** Universidade Federal de Alfenas, Minas Gerais, 2018.

YANG, H. J.; LEE, C.; SHIM, S.; KIM, J.J; LEE, H. PARK, J. **Performance evaluation of cement paste incorporating ferro-nickel slag powder under**

elevated temperatures. Case Studies in Construction Materials, Republic of Korea, v.15, p. 1-14, 2021.

ZAMPIERI, Valdir Aparecido. **Cimento Portland aditivado com pozolanas argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico.** São Paulo, 1993.