

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

THIAGO ALMEIDA QUINQUIM

**DURABILIDADE DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE
FERRONÍQUEL COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR: MIGRAÇÃO
DE ÍONS CLORETO, CARBONATAÇÃO E ANÁLISE MICROESTRUTURAL**

VITÓRIA - ES

2026

THIAGO ALMEIDA QUINQUIM

**DURABILIDADE DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE
FERRONÍQUEL COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR: MIGRAÇÃO
DE ÍONS CLORETO, CARBONATAÇÃO E ANÁLISE MICROESTRUTURAL**

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

Orientador: Prof. Dr Ronaldo Pilar

Coorientador: Prof. Dr. Rafael Dors Sakata

VITÓRIA - ES

2026

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

Q7d Quinquim, Thiago Almeida, 1995-
Durabilidade de concretos com incorporação de escória de
Ferroníquel como material cimentício suplementar : migração de
íons cloreto, carbonatação e análise microestrutural / Thiago
Almeida Quinquim. - 2026.
158 f. : il.

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

1. Concreto. 2. Cimento Portland. 3. Durabilidade
(Engenharia). 4. Escória (Metalurgia). I. Pilar, Ronaldo. II.
Sakata, Rafael Dors. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624



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

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Às quatorze horas do dia vinte e seis de fevereiro do ano de dois mil e vinte e seis, , teve início por meio de vídeoconferência a sessão pública de defesa da dissertação intitulada “**Durabilidade de Concretos com Incorporação de Escória de Ferroníquel como Material Cimentício Suplementar: Migração de Íons Cloreto, Carbonatação e Análise Microestrutural**”, do aluno **Thiago Almeida Quinquim**, candidato ao título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Construção Civil, perante a Banca Examinadora composta pelos seguintes professores: **Prof. Dr. Ronaldo Pilar**, Doutor em Engenharia Civil, Orientador do aluno e Presidente da banca; **Prof. Dr. Rafael Dors Sakata**, Doutor em Engenharia Civil; **Profa. Dra. Geilma Lima Vieira**, Doutora em Engenharia Civil; **Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros**, Doutor em Engenharia Civil e **Profa. Dra. Georgia Serafim Araújo**, Doutora em Engenharia Civil. Concluída a apresentação oral, o aluno foi arguido por todos os membros da Banca Examinadora e, a seguir, foi facultada a palavra ao público presente. Terminada a arguição do aluno, a Banca Examinadora reuniu-se, em separado, para deliberação. Ao final, o Presidente comunicou aos presentes que a dissertação havia sido **APROVADA**. Encerrada a sessão, eu, Prof. Dr. Ronaldo Pilar, presidente da banca examinadora, lavrei a presente Ata, que, depois de lida, foi assinada pelos outros membros da Banca Examinadora e por mim.

Vitória-ES, 26 de fevereiro de 2026

Prof. Dr. Ronaldo Pilar
Orientador – UFES

Prof. Dr. Rafael Dors Sakata
Coorientador – UTFPR

Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Examinadora Interna – UFES

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Examinador Externo - UFPR

Profa. Dra. Georgia Serafim Araújo
Examinadora Externa - IFES



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

DURABILIDADE DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR: MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO, CARBONATAÇÃO E ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Thiago Almeida Quinquim

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

Aprovada no dia **26 de fevereiro de 2026** por:

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

Prof. Dr. Rafael Dors Sakata
Doutor em Engenharia Civil
Coorientador - UTFPR

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

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Externo - UFPR

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

Vitória – ES, fevereiro de 2026





DOCUMENTOS DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO ALUNO THIAGO ALMEIDA QUINCO

Data e Hora de Criação: 10/03/2026 às 12:43:55

Documentos que originaram esse envelope:

- ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)
- FOLHA DE ROSTO.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)



Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: 235c99ff3d8df76f9dff9a9a92079994134d55cb42c98e56402fe09e2621cee7

[SHA512]: cc7aa89073766069270d6bcbce26ab055c4a97dc16fa39cfe2889b3ff2a0d3160581757350d8e50b3efd789e63608d0040829d37255f5fb44c161bc65aaffd5f

Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope



ASSINADO - Geilma Lima Vieira (geilma.vieira@gmail.com; geilma.vieira@ufes.br;)

Data/Hora: 10/03/2026 - 19:37:32, IP: 187.36.171.27, Geolocalização: [-20.289015, -40.296299]

[SHA256]: 7f607270d746f4ac443a33bb65b769e10c0d9487aef10ee0b165f4e662506553

Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)



ASSINADO - Georgia Serafim Araújo (georgia@unedcol.etefes.br; georgia@ifes.edu.br)

Data/Hora: 10/03/2026 - 12:55:27, IP: 200.137.71.153, Geolocalização: [-20.310210, -40.318878]

[SHA256]: f7a2980c9bf25123ceb45d473816208617d133963c8c4cd5b77fc83aef889ad9

Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)



ASSINADO - Marcelo Henrique Farias de Medeiros (medeiros.ufpr@gmail.com)

Data/Hora: 11/03/2026 - 09:26:03, IP: 191.177.161.133

[SHA256]: d55e872e6beb0c5406979d3c4213b583e4ae09d7101901af52003002fda9e823

Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)



ASSINADO - Rafael Dors Sakata (rafaelsakata@utfpr.edu.br)

Data/Hora: 10/03/2026 - 13:27:20, IP: 189.40.69.219, Geolocalização: [-24.732916, -53.765730]

[SHA256]: 57b1a2d2d969bfb9a3c9b0a68aefa4d1374ff1fdb02f2a54ca6346db3cee8b6

Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)



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

Data/Hora: 10/03/2026 - 12:46:36, IP: 104.28.59.40, Geolocalização: [-20.536514, -40.452542]

[SHA256]: 4c79c2a6280363316360a8804ad2816be37ca0621df5758a82ba5f58b5fbdeb0

Assinatura Eletrônica Avançada (Conforme Lei nº 14.063/20, art. 4º, II)

Histórico de eventos registrados neste envelope

11/03/2026 09:26:03 - Envelope finalizado por medeiros.ufpr@gmail.com, IP 191.177.161.133

11/03/2026 09:26:03 - Assinatura realizada por medeiros.ufpr@gmail.com, IP 191.177.161.133

11/03/2026 09:25:40 - Envelope visualizado por medeiros.ufpr@gmail.com, IP 191.177.161.133

10/03/2026 19:37:32 - Assinatura realizada por geilma.vieira@gmail.com; geilma.vieira@ufes.br, IP 187.36.171.27

10/03/2026 19:37:24 - Envelope visualizado por geilma.vieira@gmail.com; geilma.vieira@ufes.br, IP 187.36.171.27

10/03/2026 13:27:20 - Assinatura realizada por rafaelsakata@utfpr.edu.br, IP 189.40.69.219

10/03/2026 13:27:11 - Envelope visualizado por rafaelsakata@utfpr.edu.br, IP 189.40.69.219

10/03/2026 12:55:27 - Assinatura realizada por georgia@unedcol.etefes.br; georgia@ifes.edu.br, IP 200.137.71.153

10/03/2026 12:55:16 - Envelope visualizado por georgia@unedcol.etefes.br; georgia@ifes.edu.br, IP 200.137.71.153

10/03/2026 12:46:36 - Assinatura realizada por ronaldo_pilar@hotmail.com; ronaldo.pilar@ufes.br, IP 104.28.59.40

10/03/2026 12:46:33 - Envelope visualizado por ronaldo_pilar@hotmail.com; ronaldo.pilar@ufes.br, IP 104.28.59.40

10/03/2026 12:45:27 - Envelope registrado na Blockchain por sidney.barbara@ufes.br, IP 187.36.138.85

10/03/2026 12:45:27 - Envelope encaminhado para assinaturas por sidney.barbara@ufes.br, IP 187.36.138.85

10/03/2026 12:43:56 - Envelope criado por sidney.barbara@ufes.br, IP 187.36.138.85

AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento desse trabalho, muitas pessoas foram necessárias e contribuíram sem mensuração de esforços.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por toda luz e amparo proporcionado. Obrigado pela sabedoria e discernimento a mim conferido.

Sou grato aos meus pais Aroaldo e Janne (*in memoriam*), que, além de todo amor recebido e exemplos de coragem, sempre me incentivaram aos estudos.

Agradeço a minha noiva Camila, que ininterruptamente acreditou em mim e pude sempre contar com teu acolhimento nos momentos mais difíceis. Obrigado por andar ao meu lado e se fazer presente.

Ao meu orientador Dr. Ronaldo Pilar e meu coorientador Dr. Rafael Sakata, por toda disponibilidade e ensinamento, que me conduziram a uma experiência acadêmica de ponta. O incentivo, exemplo e parceria de vocês foram fundamentais para toda pesquisa.

Aos colegas de mestrado e laboratório em especial Pâmela, Felipe e o grupo do NIMAC, por deixarem os dias mais leves e descontraídos.

Aos técnicos laboratoristas Luana S., Márcio L., Henrique H., Carolina B., Sidneidy I. e Felipe C., que além de toda função desempenhada com zelo e capricho, foram ótimas amigas e parceiros de conversas com bom café a qualquer momento.

Agradeço também a todos os laboratórios que disponibilizaram suas instalações: LEMAC, LabGEO, LEST, LUCCAR, LDX-LabPetro, esses da UFES. Também de muita valia as contribuições do LDX da UFSC, do GEMASC da UFSM, do PROPPEM do IFES pelo software FactSage, Também, à equipe da linha de luz PAINEIRA do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron - Sírius (LNLS/CNPEM).

Ao PPGEC-UFES, por toda transmissão de conhecimento, em especial aos docentes Dra. Geilma Vieira, Dra. Rudiele Shcankoski e Dr. Patrício Pires.

À Coordenadoria de Edificações do IFES-Campus Vitória onde pude ter minha primeira experiência na docência durante o ano de 2025.

Às parcerias da Anglo American e da Mizu cimentos por fornecerem insumos necessários e o fomento a pesquisa acadêmica.

Por fim, agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado do Espírito Santo - FAPES pelo indispensável suporte financeiro.

“Somos míopes porque somos breves”.

Juliano Righetto

RESUMO

QUINQUIM, Thiago Almeida. **DURABILIDADE DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE FERRONÍQUEL COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR: MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETO, CARBONATAÇÃO E ANÁLISE MICROESTRUTURAL.** 2026. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2026.

A substituição parcial do cimento Portland por materiais cimentícios suplementares (MCS) constitui uma estratégia consistente para aumentar a sustentabilidade da construção civil, reduzindo o fator clínquer e seus impactos ambientais, sobretudo quando esses materiais são regionalmente disponíveis. Neste estudo, investigou-se a viabilidade técnica da incorporação de escória de Ferroníquel (EFN) moída como MCS em concretos, avaliando desempenho mecânico, indicadores de durabilidade e evidências microestruturais. As misturas foram produzidas com relação água/aglomerante constante e diferentes teores de substituição (incluindo referência e uma composição com fíler calcário inerte). O desempenho foi analisado por resistência à compressão, ensaios de transporte de cloretos (carga passante e coeficiente de migração), resistividade elétrica, volume de poros permeáveis e carbonatação acelerada. A interpretação dos resultados foi sustentada em nível microestrutural por difração de raios X em luz síncrotron com refinamento quantitativo e termogravimetria, permitindo relacionar composição/mineralogia e evolução da hidratação. A EFN, caracterizada por baixa razão Ca/Si e considerável fração amorfa silicosa, apresentou reatividade pozolânica predominantemente tardia, consumindo Ca(OH)_2 e formando C–S–H adicional, o que promoveu densificação da matriz. Em idades avançadas, observou-se redução consistente do transporte iônico e do volume de vazios, acompanhada de aumento da resistividade elétrica, indicando maior resistência à entrada de cloretos. Em contrapartida, teores elevados de substituição ampliaram a vulnerabilidade à carbonatação principalmente nas primeiras idades, atribuída à diluição do clínquer e à menor reserva alcalina, embora a densificação tardia atenuasse parcialmente esse efeito. De modo geral, teores em torno de 30% mostraram melhor equilíbrio entre desempenho mecânico, ganhos de durabilidade e resistência à carbonatação.

Palavras-Chave: Concreto; Escória de Ferroníquel; Durabilidade

ABSTRACT

QUINQUIM, Thiago Almeida. **DURABILITY OF CONCRETES INCORPORATING FERRONICKEL SLAG AS SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS: CHLORIDE ION MIGRATION, CARBONATION AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS**. 2026, Vitória, 2026.

Partial replacement of Portland cement with supplementary cementitious materials (SCMs) is a consistent strategy to enhance the sustainability of the construction sector by reducing the clinker factor and its environmental impacts, especially when these materials are regionally available. This study investigated the technical feasibility of incorporating ground ferronickel slag (FNS) as an SCM in concrete, evaluating mechanical performance, durability indicators, and microstructural evidence. The mixtures were produced with a constant water-to-binder ratio and different replacement levels (including a reference mixture and a composition with inert limestone filler). Performance was assessed through compressive strength, chloride transport tests (passed charge and migration coefficient), electrical resistivity, volume of permeable voids, and accelerated carbonation. The interpretation of the results was supported at the microstructural level by synchrotron X-ray diffraction with quantitative refinement and thermogravimetric analysis, enabling relationships between composition/mineralogy and hydration evolution to be established. FNS, characterized by a low Ca/Si ratio and a considerable siliceous amorphous fraction, exhibited predominantly late pozzolanic reactivity, consuming Ca(OH)_2 and forming additional C–S–H, which promoted matrix densification. At later ages, a consistent reduction in ionic transport and volume of permeable voids were observed, accompanied by increased electrical resistivity, indicating greater resistance to chloride ingress. However, high replacement levels increased vulnerability to carbonation, mainly at early ages, attributed to clinker dilution and reduced alkaline reserve, although late-age densification partially mitigated this effect. Overall, replacement levels around 30% provided the best balance between mechanical performance, durability gains, and carbonation resistance.

Keywords: Concrete; Ferronickel Slag; Durability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de CO ₂ da indústria do cimento em 2023	22
Figura 2 – Representação esquemática de hidratação do C ₃ S.....	28
Figura 3 – Diagrama Ternário de Fases representativo de diversos MCS.	30
Figura 4 – Representação esquemática da hidratação de matrizes cimentícias.....	31
Figura 5 – Resistência à compressão de argamassas com adições	32
Figura 6 – Resistência Elétrica volumétrica de concretos em diferentes composições com MCS variados.	32
Figura 7 – Fluxograma da planta de Barro Alto- GO.	34
Figura 8 – Espectro de DRX de 3 amostras de EFN (EFS1, EFS2 e EFS3).....	39
Figura 9 – EFN resfriada via: a)Ar (FNS-A); b)Água (FNS-W)	40
Figura 10 – Influência do teor de EFN na trabalhabilidade: a) abatimento (slump) do concreto; b) espalhamento (flow) da argamassa.....	42
Figura 11 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura – produtos hidratados de concreto com EFN como agregado miúdo em teor 50%	42
Figura 12 – Resistência a compressão de pastas com incorporação de EFN	44
Figura 13 – Modelo de vida útil de estruturas de concreto armado	46
Figura 14 – Tipos de corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado.	49
Figura 15 – Análise da camada película passiva por (a) MET e (b) EDS- Perfil composicional atômico.	50
Figura 16 – Mecanismo de difusão nos poros do concreto	51
Figura 17 - Avanço da frente de carbonatação no concreto ao longo do tempo com identificação colorimétrica por pH	52
Figura 18 - Rompimento da camada passiva do aço e “reciclagem” dos íons cloretos	53
Figura 19 – Esquema de ensaio proposto pela ASTM C1202.....	55
Figura 20 – Medidas de profundidade de penetração de íons cloretos.....	56
Figura 21 – Resumo do ensaio proposto pela NT Build 492.	57
Figura 22 – Métodos de Leitura de Resistividade Elétrica: a) Método superficial; b) Método Volumétrico.....	59
Figura 23 – Fluxograma do Programa Experimental.....	61
Figura 24 – Fluxograma para detalhe da Etapa III.	62

Figura 25 – Elaboração dos concretos: a)CPs Cilíndricos moldados; b)CPs Cúbicos moldados; c)CPs em tanque de cura submersa; d)Controle de pH da água do tanque (pH aprox. 10).	71
Figura 26 – Elaboração das pastas: a)Homogeneização manual; b)Mistura em misturador mecânico; c)Detalhe da pasta misturada; d)Moldes das Pastas	72
Figura 27 – Amostras dos Materiais aglomerantes utilizados.....	73
Figura 28 – Armazenamento do Cimento: a)Fracionamento com indicador de umidade; b)Sacos fracionados em Câmara seca.....	74
Figura 29 – Depósito de Escória de ferroníquel em Barro Alto-GO.....	75
Figura 30 – Processo de beneficiamento: a)Moinho de bolas; b)EFN moída ensacada.	76
Figura 31 – Escória de ferroníquel: a)Granulada <i>in natura</i> ; b)Beneficiada.....	77
Figura 32 – Fíler Calcário em armazenamento.	78
Figura 33 – Determinação da massa específica - leitura do frasco volumétrico de Le Chatelier.	79
Figura 34 – Aparato de Granulômetro a Laser e unidade de dispersão.	80
Figura 35 – Granulometrias, d50 e passante acumulado dos aglomerantes.	80
Figura 36 – Caracterizações químicas: a)Espectrômetro Shimadzu - FRX; b)Ensaio de Perda ao Fogo.....	81
Figura 37 – Caracterização mineralógica: a) Estação experimental do difratômetro SDRX – Sirius LNLS; b) Amostrador Capilar de Kapton.	82
Figura 38 – Equipamentos de Microscopia Eletrônica: a) Microscópio JEOL b) Detalhe do Detector EDS acoplado ao microscópio.....	83
Figura 39 – Etapas de beneficiamento da areia a)Ensaio matéria orgânica inicial; b)Calcinação da areia; c)Comparativo areia não calcinada e calcinada; d)Ensaio matéria orgânica final.	84
Figura 40 – Peneiramento da brita e separação entre malhas #9,5 e #4,75mm.	85
Figura 41 – Agregados armazenados para uso a)Areia; b)Brita 0.....	85
Figura 42 – Curvas Granulométricas agregados.....	86
Figura 43 – Leitura da condutividade elétrica da água com condutivímetro portátil. .	87
Figura 44 – Leitura do abatimento de tronco de cone para o traço EFN50.....	89
Figura 45 – Ensaio de resistência à compressão em máquina universal de ensaios.	90

Figura 46 – Tanque de ebulição com corpos de prova submersos durante o ensaio de imersão em água.....	91
Figura 47 - Preparação e saturação dos corpos de prova: a) corte dos espécimes ($\varnothing 10 \times 5$); b) sistema de vácuo com dessecador para saturação; c) corpos de prova após o preparo.	92
Figura 48 - Componentes e montagem da célula de migração: a) corpo da célula aberto e acessórios; b) Conjunto de anéis vedantes (polietileno e borracha); c) célula montada.	93
Figura 49 - Aquecimento dos corpos de prova em banho térmico: a) equipamento com controle de temperatura; b) corpos de prova posicionados no interior do banho.	94
Figura 50 - Arranjo experimental do ensaio RCPT.	95
Figura 51 - Saturação a vácuo das amostras para o ensaio RCMT (NT Build 492): a) Sistema de vácuo com dessecador; b) Detalhe para o processo simultâneo de saturação, entrada de água e saída do vácuo.	97
Figura 52 - Montagem do aparato do ensaio RCMT: a) conjunto de vedação e acoplamento do espécime; b,c) Eletrodos de aço inox; d) Eletrodo inferior com espaçadores; e) Posicionamento dos corpos de prova no suporte inclinado; f) Arranjo experimental completo com células e sistema de leitura de corrente.	98
Figura 53 - Determinação da profundidade de penetração de cloretos após o ensaio RCMT: a) Corpo de prova fraturado diametralmente; b) Leitura da frente de cloretos após aplicação de AgNO_3	99
Figura 54 - Câmara climática de carbonatação utilizada com CPs cúbicos no interior.	99
Figura 55 – Corpos de prova carbonatados: a) 28 dias; b) 56 dias; c) 91 dias.	101
Figura 56 – Equipamento de ensaio de Resistividade - Proceq Resipod.....	102
Figura 57 – Equipamento Resipod em uso.	102
Figura 58 – Interrupção de hidratação de pastas: a) Filtração à vácuo; b) Amostras secas e prontas.	104
Figura 59 – Difratoograma da Escória de Ferroníquel.	109
Figura 60 – Difratoogramas: a) CPV; b) Fíler Calcário; c) Fíler Quartzo.	109
Figura 61 – Diagrama ternário de fases: Fe_2O_3 - SiO_2 - MgO	111
Figura 62 – Imagens da EFN em MEV, ganhos a) $\times 2000$; b) $\times 1000$; c) $\times 500$; d) $\times 100$; e) Diagrama de escaneamento superficial em área com EDS e tabela de elementos.	112

Figura 63 – Massa específica aparente e teor de ar incorporado dos concretos avaliados.	113
Figura 64 – Relação entre o abatimento (mm) e o teor de ar incorporado (%). Os pontos representam os valores experimentais e a linha tracejada indica o ajuste linear.	115
Figura 65 – Carga total Passante em 28, 56 e 91 dias, e VPP para as composições.	116
Figura 66 - Correlação linear entre Carga passante (RCPT) e VPP. a) Correlação incluindo todas as idades (28, 56, e 91 dias); b) Correlação considerando apenas 56 e 91d, quando a hidratação e as reações secundárias da EFN estão mais desenvolvidas.....	119
Figura 67 – D_{nssm} dos concretos aos 28, 56 e 91 dias conforme NT Build 492.	119
Figura 68 – Evolução da Resistividade elétrica volumétrica nas idades de ensaio.	121
Figura 69 – Correlações usando resistividade elétrica às idades de 56 e 91 dias: a) RCPT vs. Resistividade; b) RCMT vs. Resistividade.....	123
Figura 70 – Correlação entre a resistividade superficial e a resistividade volumétrica.	123
Figura 71 – Variação de Resistividade elétrica em relação à temperatura.....	124
Figura 72 – Profundidade média de carbonatação (dk) dos concretos após 70 dias em câmara de CO ₂ , aos 28, 56 e 91 dias.	125
Figura 73 – Resistência a compressão média dos concretos avaliados.	127
Figura 74 – Índice de cimento (Ci) de REF e traços com EFN.....	129
Figura 75 - Teor de C–S–H e água quimicamente combinada nas pastas aos 28 e 56 dias.....	130
Figura 76 – Correlação entre C-S-H e BW apenas de amostras EFN.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland.	27
Tabela 2 - Nomenclaturas e siglas do Cimento Portland	28
Tabela 3 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)....	29
Tabela 4 - Composição Química teórica do material calcinado.	35
Tabela 5 - Ilustração dos Mecanismos de Transporte.	48
Tabela 6 - Faixas de penetrabilidade de Cl^- em relação à carga elétrica medida.....	54
Tabela 7 – Tensão e duração do ensaio baseado na corrente inicial à 30 V.	56
Tabela 8 – Resistência a difusividade para o ensaio RCMT/NT Build 492 aos 28d. .	58
Tabela 9 – Parâmetros de resistividade elétrica do concreto.	60
Tabela 10 – Nomenclatura das Misturas.	65
Tabela 11 – Quantificação de CPs por ensaio e por composição.....	66
Tabela 12 – Quantitativo total de CPs.	67
Tabela 13 – Composições adotadas.	68
Tabela 14 – Consumo de materiais – 72L.	68
Tabela 15 - Consumo de materiais com acréscimo para 36L.....	69
Tabela 16 – Simulação de cronograma de moldagens.....	69
Tabela 17 – Descrição de betonadas e ensaios.	70
Tabela 18 - Composições adotadas para pastas.....	72
Tabela 19 – Aspectos Físicos dos aglomerantes.....	80
Tabela 20 – Resultados ensaios caracterização agregados.....	86
Tabela 21 - Composição química em óxidos dos aglomerantes.....	107
Tabela 22 – Fases encontradas e respectivos códigos cristalográficos.	110
Tabela 23 –Valores de abatimento de Tronco de Cone para concretos avaliados. .	114
Tabela 24 – Diferença média entre métodos de cálculo de carga passante.	150
Tabela 25 – ANOVA duas vias para RCPT.	151
Tabela 26 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para RCPT.....	152
Tabela 27 – ANOVA duas vias para RCMT.....	153
Tabela 28 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para RCMT.	153
Tabela 29 – ANOVA duas vias para Resistividade Elétrica.....	154
Tabela 30 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para Resistividade Elétrica para idades 7, 14 e 21 dias.	155

Tabela 31 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para Resistividade Elétrica para idades 28, 56 e 91 dias.	155
Tabela 32 – ANOVA duas vias para Carbonatação Acelerada.	156
Tabela 33 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para Carbonatação Acelerada.	156
Tabela 34 – ANOVA duas vias para Resistência à Compressão.	157
Tabela 35 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para Resistência à Compressão.	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/agl - Relação água aglomerante

a/c - Relação água cimento

ABNT - Associação brasileira de Normas Técnicas

ANOVA - Análise de Variância

ASTM - American Society for Testing and Materials

CESAN - Companhia Espírito-santense de Saneamento

Cl⁻ - Íon Cloreto

CO₂ - Dióxido de Carbono, Gás Carbônico

CPV ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

ddp - diferença de potencial

DRX - Difractometria de Raios-X

EDS - Energia Dispersiva de Raios-X

EFN - Escória de Ferroníquel

Fe-Ni - Liga de Ferroníquel

FNS – Ferronickel Slag (Escória de Ferroníquel em inglês)

FRX - Fluorescência de Raios-X

LEMAC - Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

LNLS- Laboratório Nacional de Luz Síncrotron

LUCCAR - Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins

mA – Miliampère (1mA = 0,001A)

MCS - Materiais Cimentícios Suplementares

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

Ni - Níquel

NT - Nord Test

pH - potencial hidrogeniônico

PNMA - Política Nacional de Meio Ambiente

Q - Carga total passante (em Coulombs - C)

RKEF - Rotary Kiln Electric Furnace

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

V – Volts

LISTA DE SIMBOLOS

BW – Água quimicamente combinada (Bound Water)

C₃S - Silicato tricálcico

C₂S - Silicato dicálcico

C₃A - Aluminato tricálcico

C₄AF - Ferroaluminato tetracálcico

Ø - diâmetro

µm – micrometros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Objetivos	25
1.1.1	Objetivo Geral	25
1.1.2	Objetivos Específicos	25
2	REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1	O Cimento Portland	26
2.2	Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)	29
2.3	A produção da Liga Ferroníquel e seus coprodutos	33
2.3.1	O Processo Pirometalúrgico RKEF	34
2.4	A Escória de Ferroníquel (EFN)	37
2.4.1	Aplicações da Escória - Estudos em andamento	40
2.4.1.1	<i>EFN como Agregado Miúdo</i>	41
2.4.1.2	<i>EFN como Material Cimentício Suplementar</i>	43
2.5	Durabilidade no Concreto	46
2.5.1	Mecanismos de penetração de agentes agressivos	47
2.5.2	Corrosão das armaduras	49
2.5.3	Despassivação de armaduras por carbonatação	50
2.5.4	Penetração e despassivação de armaduras por íons cloreto	52
2.5.5	Resistividade Elétrica	58
3	ABORDAGEM METODOLÓGICA	61
3.1	Introdução	61
3.2	Programa Experimental	61
3.3	Planejamento Experimental	63
3.3.1	Variáveis da Pesquisa	64
3.3.2	Nomenclatura das Misturas	65
3.3.3	Quantificação de Corpos de Prova e Apresentação dos ensaios realizados	65

3.3.4	Dosagem e quantidade de material	67
3.4	Materiais e Métodos de Caracterização	73
3.4.1	Materiais Aglomerantes	73
3.4.1.1	<i>Cimento</i>	<i>73</i>
3.4.1.2	<i>EFN.....</i>	<i>74</i>
3.4.1.3	<i>Fíler Calcário</i>	<i>77</i>
3.4.1.4	<i>Fíler Quartzo.....</i>	<i>78</i>
3.4.1.5	<i>Caracterizações dos aglomerantes.....</i>	<i>78</i>
3.4.1.5.1	Massa Específica e Granulometria a Laser.....	78
3.4.1.5.2	Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X (FRX).....	81
3.4.1.5.3	Caracterização Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX).....	81
3.4.1.5.4	Caracterização Microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Detector de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)	82
3.4.2	Agregados.....	83
3.4.2.1	<i>Agregado Miúdo</i>	<i>83</i>
3.4.2.2	<i>Agregado Graúdo.....</i>	<i>84</i>
3.4.2.3	<i>Caracterização dos agregados.....</i>	<i>85</i>
3.4.3	Água	87
3.4.4	Aditivo Plastificante	88
3.5	Métodos de Ensaios	88
3.5.1	Ensaio no Estado Fresco	88
3.5.1.1	<i>Consistência pelo tronco de cone – Slump Test.....</i>	<i>88</i>
3.5.1.2	<i>Massa Específica aparente e teor de ar incorporado.....</i>	<i>89</i>
3.5.2	Ensaio no Estado Endurecido.....	90
3.5.2.1	<i>Resistência à Compressão Axial</i>	<i>90</i>
3.5.2.2	<i>Índice de Vazios – Volume de Poros Permeáveis</i>	<i>91</i>
3.5.2.3	<i>Ensaio acelerado de Penetração de Cloretos – RCPT - Método ASTM C1202 adaptado</i>	<i>92</i>

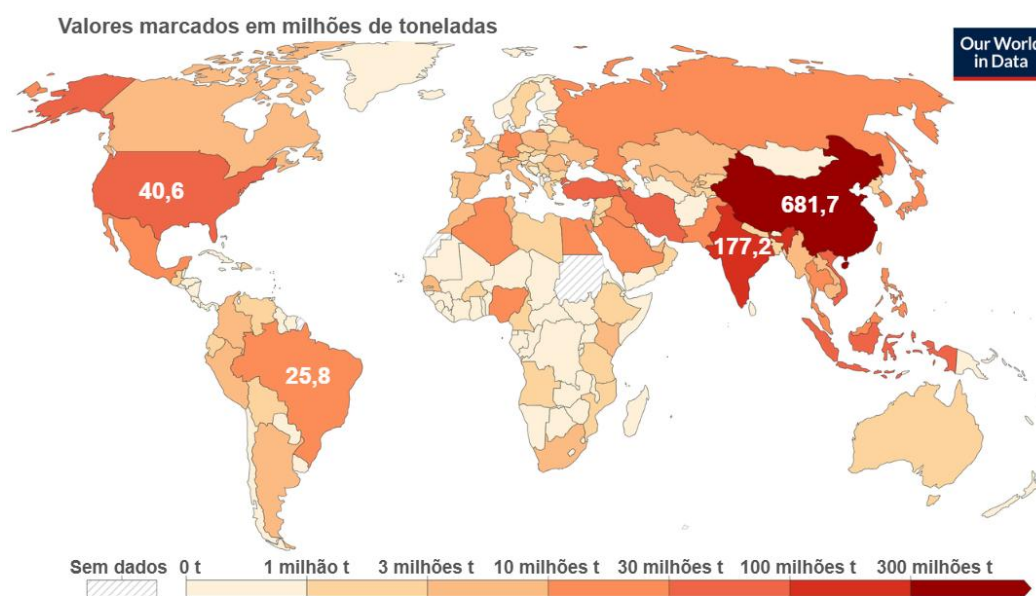
3.5.2.4	<i>Ensaio de Migração de Cloretos em regime não estacionário - RCMT - NT Build 492</i>	96
3.5.2.5	<i>Carbonatação Acelerada</i>	99
3.5.2.6	<i>Resistividade Elétrica</i>	101
3.5.2.7	<i>Análise Microestrutural em pastas</i>	103
3.5.2.7.1	Análise Termogravimétrica	104
3.5.2.7.2	Análise Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) – Método de Rietveld	105
3.6	Análise dos Resultados	106
4	RESULTADOS	107
4.1	Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X (FRX)	107
4.2	Caracterização Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX)	108
4.3	Caracterização por MEV e EDS	112
4.4	Massa específica e Ar Incorporado	113
4.5	Abatimento de tronco de cone	114
4.6	Migração de Íons Cloreto - Método ASTM C1202 Adaptado – RAPID CHLORIDE PENETRATION TEST (RCPT)	116
4.7	NT Build 492 – RAPID CHLORIDE MIGRATION TEST (RCMT)	119
4.8	Resistividade Elétrica	121
4.9	Carbonatação Acelerada	125
4.10	Resistência à Compressão	127
4.11	Análise Microestrutural em Pastas	129
5	CONCLUSÕES	132
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	133
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
	APÊNDICE A – CÓDIGO PYTHON	149
	APÊNDICE B – TESTE PILOTO CÓDIGO DE FILTRAGEM RCPT	150
	APÊNDICE C – ANÁLISES ESTATÍSTICAS	151

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos insumos fundamentais da cadeia produtiva da indústria da construção civil, atuando como o principal material aglomerante e constituindo a matéria-prima básica para a produção de concretos e argamassas, sendo, portanto, imprescindível para o desenvolvimento social e econômico de qualquer nação (Belaïd, 2022; Odoko, 2019).

No entanto, a produção de cimento está associada a significativos impactos ambientais, pois, além do intenso consumo de matérias-primas naturais, como calcário e argilas, responde por cerca de 7% a 8% das emissões globais de CO₂. (Andrew, 2019; Metz et al., 2005; SNIC, 2019). Na Figura 1 observa-se a distribuição global do impacto da indústria do cimento, destacando alguns países emissores. Essa repercussão ambiental se deve principalmente ao processo de calcinação do calcário (CaCO₃) para a produção do clínquer ($\text{CaCO}_3 + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), etapa fundamental na fabricação do cimento Portland, que libera grandes quantidades de CO₂ como subproduto químico, além das emissões associadas à queima de combustíveis fósseis utilizados nos fornos, transporte e energia consumida nas instalações fabris (ABDI, 2012; Cheng et al., 2023; Flower; Sanjayan, 2007; Miller; Moore, 2020; Worrell et al., 2001)

Figura 1 – Emissão de CO₂ da indústria do cimento em 2023



OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

Fonte: Adaptado de Friedlingstein et al. (2025) e Global Carbon Project (2024)

Diante desse cenário, a indústria nacional do cimento tem avançado na implementação de iniciativas voltadas à descarbonização de seus processos produtivos, em articulação com instituições relevantes nos âmbitos nacional e internacional (SNIC, 2019). Nesse contexto, destaca-se o Roadmap Tecnológico do Cimento, iniciativa estratégica que estabelece diretrizes e alternativas tecnológicas com o objetivo de reduzir as emissões de CO₂ do setor e alcançar a neutralidade de carbono até 2050. A Política Nacional de Meio Ambiente - PNMA (Lei 6.938/1981, art. 4º) enfatiza a preservação e a renovação dos recursos ambientais para garantir seu uso sustentável e sua disponibilidade contínua, mantendo o equilíbrio ecológico necessário à vida.

Em escala internacional, a International Energy Agency (IEA), em consonância com as metas de limitação do aumento da temperatura global estabelecidas pelo Acordo de Paris, propôs o Technology Roadmap – Low-Carbon Transition in the Cement Industry, que prevê a redução das emissões globais de CO₂ da indústria cimenteira de aproximadamente 2,2 para 1,7 bilhões de toneladas entre 2014 e 2050. A estratégia delineada baseia-se na integração de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, no aumento da eficiência energética e termoeletrica, no uso de combustíveis de menor impacto ambiental e, sobretudo, na redução do teor de clínquer nos cimentos (Supriya et al., 2023).

Nesse contexto de práticas sustentáveis aplicadas à produção de cimento, a reutilização e a incorporação parcial de materiais com potencial cimentício apresentam-se como uma estratégia promissora, desde que não comprometam as propriedades físico-mecânicas e de durabilidade dos cimentos produzidos (Uratani; Griffiths, 2023). Entre essas alternativas, destacam-se os materiais cimentícios suplementares (MCS), também denominados adições minerais, como a sílica ativa, as pozolanas naturais ou artificiais e as escórias industriais, com especial ênfase naquelas oriundas de processos metalúrgicos (Alengaram, 2023; Gupta; Chaudhary, 2022; Lopes Lima et al., 2017).

Nas últimas décadas, especialmente após 2010, a pesquisa em materiais cimentícios suplementares tem se expandido significativamente, porém ainda demanda estudos que consolidem seus efeitos no desempenho do cimento e do concreto e a viabilidade das rotas propostas (Snellings; Suraneni; Skibsted 2023).

A viabilidade de MCS depende não só do desempenho técnico, mas também da disponibilidade, escala produtiva e logística — especialmente dos custos e impactos do transporte. Em muitos mercados, MCS consolidados (como cinza volante e escória de alto-forno) sofrem com fontes concentradas e longas distâncias de transporte, o que reduz competitividade e o ganho real de mitigação de emissões. Por isso, coprodutos regionais tornam-se estratégicos para reduzir o fator clínquer de forma efetiva e compatível com as condições locais de produção, distribuição e consumo, superando abordagens que consideram exclusivamente o desempenho do material isoladamente (Azevedo et al., 2022; Nilimaa, 2023; Snellings; Suraneni; Skibsted, 2023).

Adicionalmente, o crescimento da produção de cimento em países emergentes, como Brasil e China, exige a diversificação das fontes de materiais cimentícios suplementares, uma vez que a disponibilidade de escória de alto-forno e cinza volante é limitada em muitos contextos (Scrivener et al., 2018; SNIC, 2022; Worrell et al., 2001). Nesse contexto, a escória de ferroníquel (EFN), proveniente da indústria metalúrgica do níquel, destaca-se como uma alternativa promissora, com potencial para reduzir o consumo de cimento Portland e os impactos ambientais associados, além de apresentar disponibilidade compatível com aplicações em escala industrial (Bouasria et al., 2022; Neto et al., 2025).

O Brasil possui papel relevante na exploração global de minério de níquel, respondendo por cerca de 16,8% do processamento mundial em 2021 (MME, 2022). As reservas nacionais concentram-se majoritariamente no estado de Goiás, onde estão localizadas as principais plantas produtoras de ferroníquel, nos municípios de Niquelândia e Barro Alto. Estima-se que, até 2031, o volume acumulado de escória de ferroníquel (EFN) gerado nessas unidades alcance aproximadamente 25,66 milhões de toneladas, com possibilidade de expansão dos depósitos até 2040 (Anglo American, 2020, 2022).

Estudos indicam que a incorporação parcial de EFN em matrizes cimentícias pode promover ganhos de resistência mecânica para determinados teores de substituição (Nuruzzaman; Kuri; Sarker, 2022; Saha; Sarker, 2017), bem como contribuir para o aumento da resistência em idades mais avançadas, em função de sua atividade pozolânica (Lemonis et al., 2015).

Apesar desse potencial, aspectos relacionados à durabilidade de concretos contendo EFN ainda demandam investigação aprofundada. Torna-se, portanto, essencial compreender os efeitos desse material no processo de hidratação do cimento e na formação de fases na matriz cimentícia, com impactos diretos sobre as propriedades nos estados fresco e endurecido. Nesse sentido, a EFN, caracterizada por elevada disponibilidade e mineralogia distinta, com frações vítreas silicatadas ricas em Mg e Fe (Sun; Feng; Chen, 2019), permanece menos explorada que materiais convencionais, como cinzas volantes e escória granulada de alto-forno moída (Juenger; Snellings; Bernal, 2019; Ndahirwa et al., 2022). Ademais, é fundamental determinar teores ótimos de substituição do cimento que maximizem os benefícios técnicos e ambientais sem comprometer as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do material.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial da escória de ferroníquel (EFN) como material cimentício suplementar em concretos, em substituição parcial ao cimento Portland, com foco em durabilidade, microestrutura e resistência a compressão.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar a influência da incorporação da EFN, em substituição ao cimento na durabilidade de concretos frente à penetração de cloretos, resistividade elétrica e carbonatação acelerada.
- Avaliar o efeito da incorporação da EFN, em substituição ao cimento na evolução da resistência à compressão com diferentes teores de substituição.
- Investigar a contribuição da EFN, em substituição ao cimento na microestrutura e suas implicações na durabilidade dos concretos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Cimento Portland

O cimento é um material que possui propriedades adesivas que ligam os fragmentos minerais em uma unidade. Essa definição abrange uma ampla gama de materiais aglomerantes, que quando em contato com a água, esse material endurece oferecendo resistência mecânica e pode ser chamado de Cimento Hidráulico (Lavagna; Nisticò, 2023; Neville, 2015) .

De partículas com dimensões variando entre 1 e 50 μm , o cimento é uma mistura heterogênea e basicamente composto da queima e moagem de uma fonte de calcário e uma fonte de sílica (Mehta; Monteiro, 2008). A produção do cimento se inicia com a moagem da matéria prima até obtenção de um pó fino, homogêneo em proporções predefinidas, em seguida, essa mistura é submetida a temperaturas elevadas (cerca de 1400°C) em um forno rotativo, onde ocorre a sinterização e fusão parcial do material, originando o clínquer (Gao et al., 2016) . Após resfriamento, o clínquer é moído novamente junto com gipsita (sulfato de cálcio di-hidratado), resultando no Cimento Portland (Mohammed; Safiullah, 2018; Neville; Brooks, 2013). Ainda, é comum a adição de fíler calcário, que em até 5% em massa reduz a porosidade dos cimentos hidratados e pode aumentar a resistência à compressão em comparação com um Cimento Portland sem a adição, já substituições acima de 10% podem ser prejudiciais, causando diluição do cimento, aumenta a porosidade nas pastas hidratadas e redução da resistência à compressão (Lothenbach; Winnefeld, 2017).

O cimento Portland se baseia em uma mistura de materiais minerais, principalmente cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), e em menor proporção, encontramos magnésia (MgO) e anidrido sulfúrico (SO_3) (Aïtcin, 2016), este último adicionado para controlar o tempo de pega do cimento. Em sua produção, ocorrem as combinações químicas entre os óxidos que os transformam em compostos como silicatos (C_3S ou Alita e C_2S ou Belita), aluminatos (C_3A) e ferroaluminatos (C_4AF) (Bauer, 2008; Neville, 2015). A Tabela 1 apresenta as nomenclaturas e siglas adotadas.

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland.

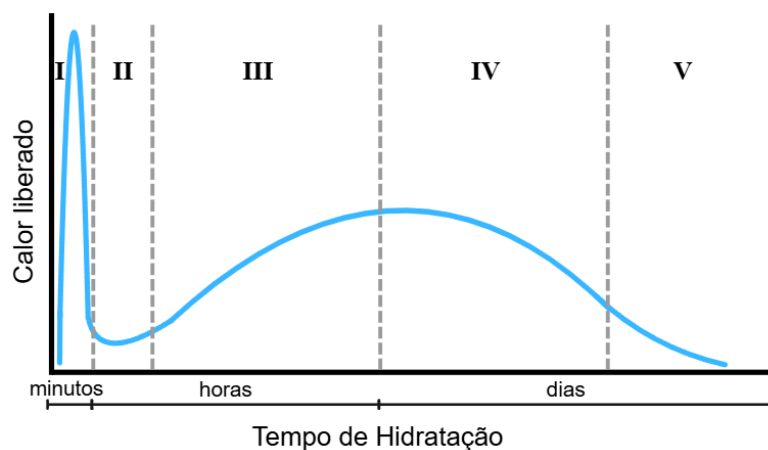
NOME DO COMPOSTO	COMPOSIÇÃO EM ÓXIDOS	ABREVIACÃO
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville (2015)

Quando em contato com a água, o cimento Portland passa por um processo de hidratação, resultando no seu endurecimento através da formação de fases sólidas microestruturais (Artioli; Bullard, 2013). Essas fases incluem o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que desempenha um papel crucial na determinação das propriedades de resistência da pasta; o hidróxido de cálcio (CH ou portlandita), cuja contribuição para a resistência mecânica é significativa nas idades avançadas; e os sulfoaluminatos de cálcio, que desempenham um papel secundário nas relações entre microestrutura e propriedades, garantindo as resistências mecânicas iniciais das matrizes cimentícias (Du et al., 2019; Mehta; Monteiro, 2008; Pushpan et al., 2023).

A Figura 2 mostra a taxa de liberação de calor durante a hidratação do cimento Portland em função do tempo. Logo após o contato com a água (período I) ocorre um pico muito intenso de calor (exotérmico), devido à dissolução rápida das fases do clínquer, sobretudo C_3A e C_3S , com formação inicial de etringita, em seguida vem o período de indução ou dormência (II), em que o fluxo de calor cai e a pasta permanece trabalhável (Dweck et al., 2003). Depois, inicia-se o período de aceleração (III), marcado por um grande pico de calor associado à hidratação acelerada dos silicatos e à formação de C-S-H e portlandita, etapa em que ocorrem pega e ganho de resistência inicial (Marchon; Flatt, 2016). Na sequência, o período de desaceleração (IV) apresenta queda gradual da taxa de calor, pois a camada de produtos hidratados ao redor dos grãos passa a dificultar o transporte de íons e água (John; Lothenbach, 2023).

Por fim, o período V corresponde à reação lenta de longo prazo, com baixa liberação de calor, em que prossegue a hidratação principalmente de partículas maiores e de C_2S , gerando C-S-H adicional e densificação progressiva da microestrutura do concreto.

Figura 2 – Representação esquemática de hidratação do C₃S.

Fonte: Adaptado de Gartner et al. (2002)

Definida pela NBR 16697 (ABNT, 2018a), a diferenciação entre os tipos de cimentos Portland são fundamentais na construção civil devido às suas propriedades variadas e adições específicas que conferem características distintas a cada tipo. Esses cimentos são designados por siglas que representam suas composições e são acompanhadas pela classe de resistência, como 25, 32, 40 ou ARI (Alta Resistência Inicial). Além disso, alguns tipos podem apresentar sufixos adicionais como RS (Resistente a Sulfatos) e BC (Baixo Calor de Hidratação), que indicam propriedades especiais importantes para determinadas aplicações. As Tabela 2 e Tabela 3 a seguir apresentam nomenclaturas e as características esperadas para cada tipo de cimento, vale mencionar que nessas tabelas a abreviatura CP é referente a Cimento Portland.

Tabela 2 - Nomenclaturas e siglas do Cimento Portland

DESIGNAÇÃO NORMALIZADA (TIPO)	SUBTIPO	SIGLA	CLASSE DE RESISTÊNCIA	SUFIXO
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III	25, 32 ou 40	RS ou BC
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	
	Não estrutural	CPB	–	–

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018a) – Adaptado

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

Designação normalizada		Sigla	Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada de alto-forno (%)	Material pozzolânico (%)	Material carbonático (%)
Cimento Portland comum		CP I	95 – 100	0 – 5		
		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 pozzolânico		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 pozzolânico		CP IV	45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	75 – 100	–	–	0 – 25
	Não Estrutural		50 – 74	–	–	26 – 50

Fonte: NBR 16697/2018 (ABNT, 2018a) – Adaptado

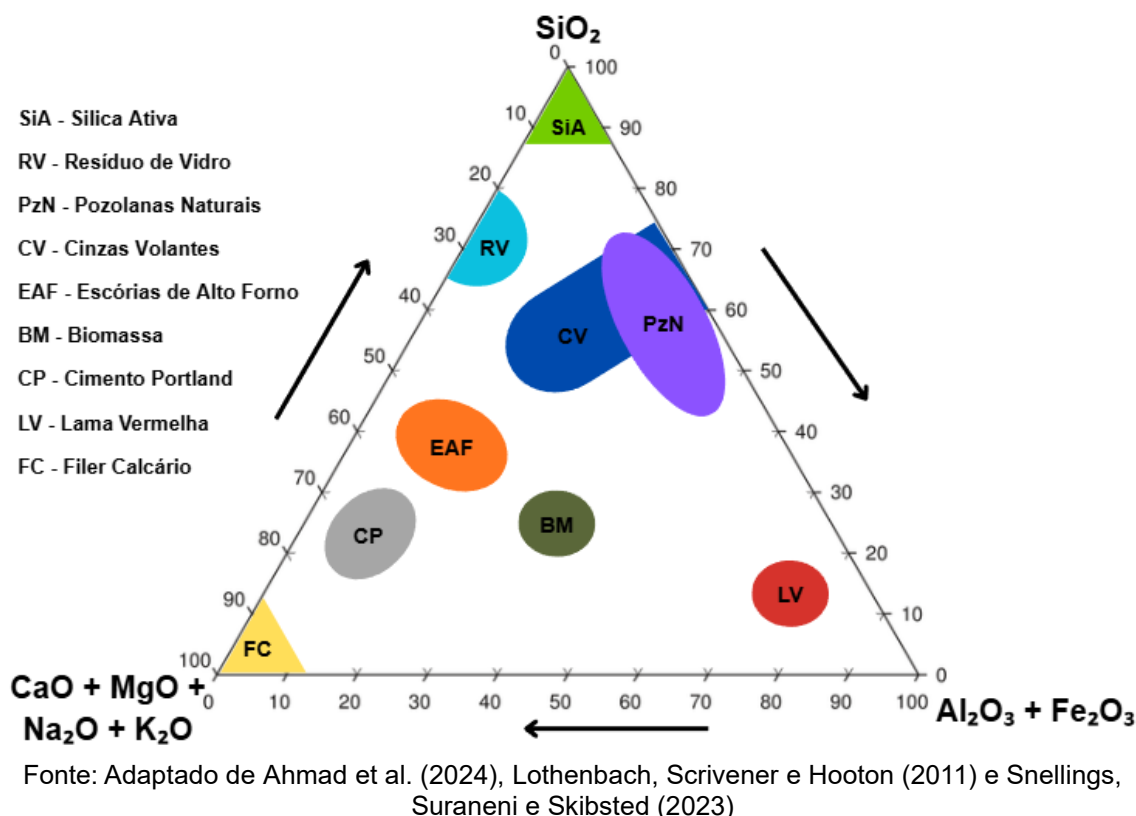
2.2 Materiais Cimentícios Suplementares (MCS)

As adições minerais empregadas em teores normalmente superiores a 5% em massa de cimento se enquadram como materiais cimentícios suplementares (MCS) e constituem hoje uma das principais estratégias para reduzir o fator clínquer e as emissões de gases do efeito estufa associadas ao ligante (ABNT, 2018a; Global Cement and Concrete Association, 2024; Knight; Cunningham; Miller, 2023).

As adições cimentícias são em sua maioria, subprodutos industriais, que quando empregados sem etapas extras de processamento ou clínquerização e com distâncias reduzidas de transporte tendem a ser considerados de impacto ambiental nulo na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), permitindo reciclar e preservar matérias-primas naturais, além de ampliar o portfólio de ligantes sem perda de desempenho

estrutural (Aïtcin, 2016; Lothenbach; Scrivener; Hooton, 2011; Nassiri et al., 2025). A Figura 3 apresenta alguns desses materiais mais empregados e sua composição química principal aproximada.

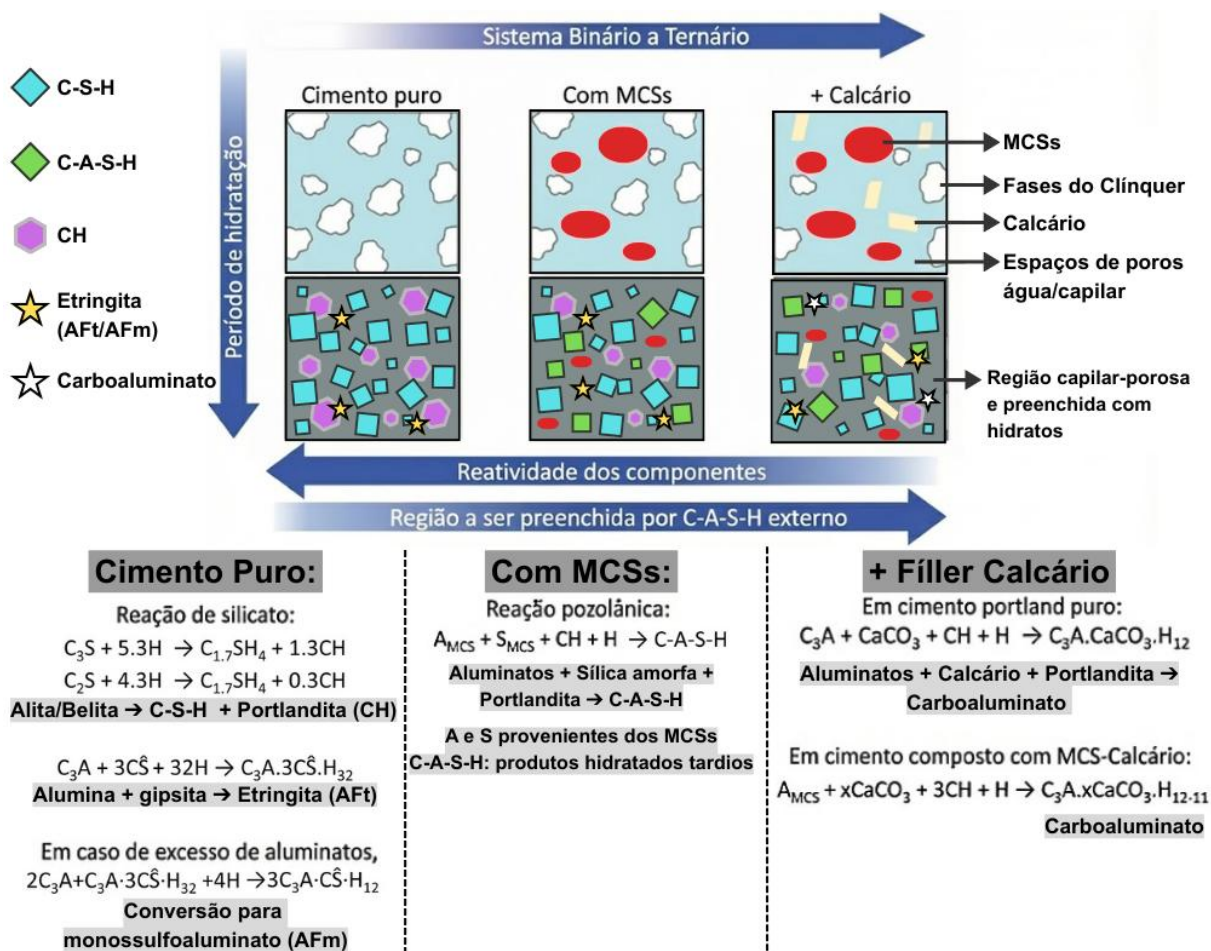
Figura 3 – Diagrama Ternário de Fases representativo de diversos MCS.



Do ponto de vista microestrutural, a incorporação de MCS modifica o arranjo de fases hidratadas e, por consequência, o volume de sólidos, a porosidade e a durabilidade. Modelagens termodinâmicas e resultados experimentais indicam que, nos níveis de substituição usualmente empregados, as principais mudanças são a redução da relação Ca/Si do C-S-H, o consumo de portlandita e o aumento de hidratos aluminatos, sobretudo quando se utilizam MCS ricos em alumina (Lothenbach; Scrivener; Hooton, 2011). Skibsted e Snellings, (2019) ressaltam ainda que a dissolução das fases vítreas de escórias e cinzas altera significativamente a composição da solução de poros, promove refinamento de poros e tende a eliminar poros capilares acima de um raio crítico, o que é decisivo para viabilizar altos teores de substituição de clínquer sem prejuízo de desempenho em serviço. Desta forma, destaca ganhos de resistência à penetração de cloretos, mitigação de reação álcali-agregado e maior resistência a sulfatos em concretos com MCS bem dosados e finamente moídos (Pang et al., 2022; Scrivener et al., 2018).

A Figura 4 apresenta esquematicamente e descreve com equações estequiométricas os produtos formados durante a hidratação de sistemas cimentícios diversos, sejam composições apenas de Cimento Portland (CP), de CP+MCSs (se tornando matrizes binárias – 2 materiais como aglomerantes) e de CP+MCSs+Fíller calcário (matrizes ternárias – 3 materiais aglomerantes).

Figura 4 – Representação esquemática da hidratação de matrizes cimentícias.

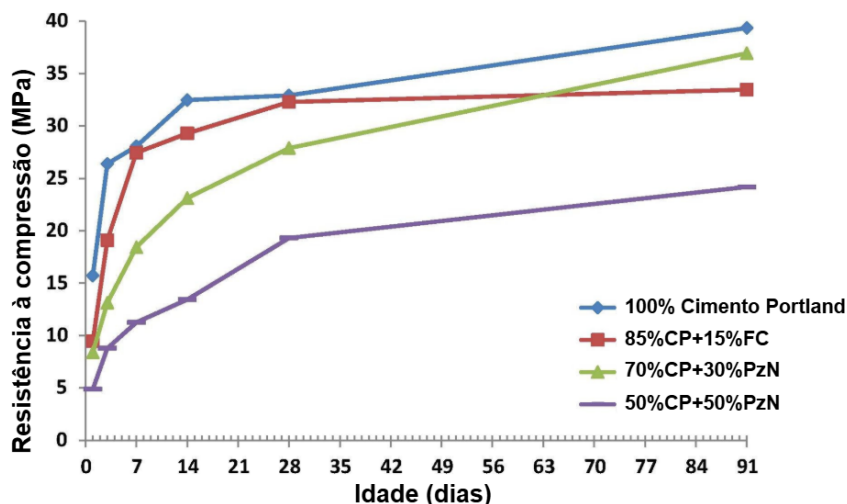


Fonte: Adaptado de Dhandapani et al. (2021)

No campo da cinética de hidratação, a literatura converge para um modelo em que os MCS exercem um duplo papel. Em idades iniciais, predominam efeitos físicos de “filler” e nucleação, que aceleram a hidratação das fases do clínquer; em idades mais avançadas, a reação pozolânica ou latente hidráulica passa a controlar a formação de C-S-H secundário (ou C-A-S-H caso a fonte de MCS possua teores de alumina) e o fechamento da microestrutura (Scrivener; Nonat, 2011). A Figura 5 compara em termos de resistência a compressão de argamassas, a incorporação do fíller calcário, de função meramente de nucleação acelerando as primeiras idades e a reação secundária promovida por uma pozolana natural. Skibsted e Snellings, 2019

enfatizam que a reatividade intrínseca dos MCS depende fortemente da composição química, da fração vítrea, da finura e das condições do meio exposto.

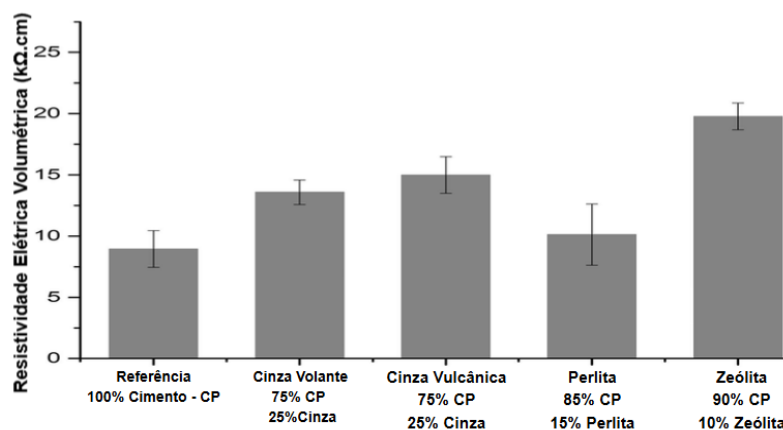
Figura 5 – Resistência à compressão de argamassas com adições



Fonte: Adaptado de Celik et al. (2019)

Os MCS como cinzas volante de baixa e alta cal e escória granulada de alto-forno, são hoje a principal estratégia consolidada para reduzir o teor de clínquer e as emissões de CO₂, com amplo histórico de uso e ganhos em durabilidade em cimentos e concretos de baixo clínquer (Giergiczny, 2019; Juenger; Snellings; Bernal, 2019). A melhoria da durabilidade se evidencia pelo adensamento da matriz cimentícia, indicando que MCSs promovem um refinamento do sistema de poros, com menor fração de poros capilares, como efeito, a adição de MCSs eleva a resistividade volumétrica em relação ao traço de referência, a Figura 6 apresenta esse comportamento.

Figura 6 – Resistividade Elétrica volumétrica de concretos em diferentes composições com MCS variados.



Fonte: Adaptado de Ghafari, Feys e Khayat (2016)

Apesar dos benefícios ambientais, dosagens excessivas de incorporação de MCSs, como de escórias granuladas de alto forno, em matrizes cimentícias podem comprometer a resistência à compressão e a durabilidade, sendo necessário encontrar os teores ideais de substituição ou aplicar técnicas de ativação químicas e moagens ultrafinas (Amran et al., 2021; Nwankwo et al., 2020) .

No entanto, o esgotamento relativo das fontes tradicionais e a pressão por cimentos mais ecoeficientes impulsionam a busca por novas alternativas, incluindo escórias de processos siderúrgicos e metalúrgicos. Entre essas, destacam-se escórias de ligas especiais e ferro-ligas, como as escórias de ferroníquel, cuja reatividade é predominantemente pozolânica, mas pode ser significativamente aumentada por resfriamento rápido e moagem fina, desde que atendidos os requisitos de desempenho e qualidade ambiental, o que fundamenta sua investigação neste trabalho como potencial MCS para compor sistemas cimentícios de menor pegada de carbono.

2.3 A produção da Liga Ferroníquel e seus coprodutos

O Níquel (Ni) é o quinto elemento químico mais abundante na Terra (Huang et al., 2014). É principalmente encontrado em dois tipos de minério: o Sulfeto de Níquel, que tem destino as atividades como a produção de baterias recarregáveis e galvanoplastia, e a Laterita, sendo seu principal produto a liga de Ferroníquel na fabricação de aço inoxidável (Mudd, 2010).

Enquanto no século XIX a exploração comercial do Níquel iniciou-se em jazidas lateríticas situadas na Nova Caledônia, no século XX o elemento passou a ser explorado, também, na forma de minério sulfetado no Canadá (Dalvi et al., 2004). Devido a facilidade da obtenção do produto final, o minério sulfetado foi inicialmente a fonte principal de níquel no mundo, porém representa o menor volume de reservas niquelíferas mundiais conhecidas (cerca de 27,8% do volume). Portanto, tornou-se necessário a exploração das reservas lateríticas (72,2%) a fim de atender à crescente demanda do mercado, mesmo que seus processos de beneficiamento sejam mais desafiadores (Mudd, 2010).

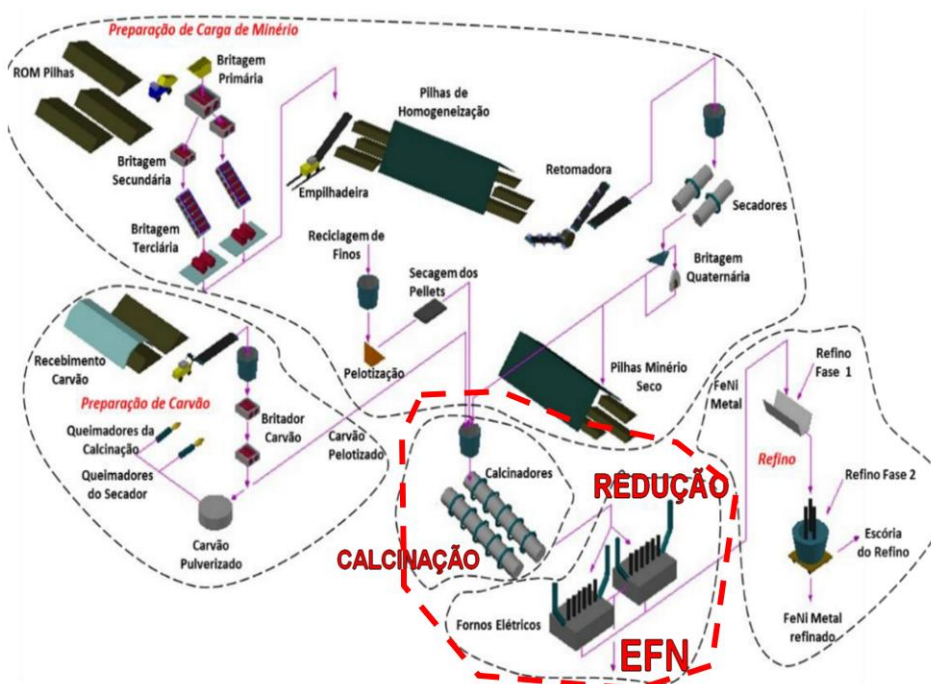
De acordo com Zevgolis e Daskalakis (2022), em 2020, a laterita representou 69% da obtenção total do níquel. Esse tipo de minério pode ser classificado de forma

simplificada em Limonítico ou Saprolítico, a depender da profundidade e pureza do depósito em que é encontrado. O primeiro pertence a uma zona mais próxima a superfície, com processos de intemperismo presentes com maior intensidade e geralmente é processado por rota hidrometalúrgica. Já o segundo, é encontrado em uma faixa mais próxima a rocha mãe, contendo maiores teores de Níquel do que o Limonítico e sua principal forma de processamento é através da rota Pirometalúrgica RKEF (Dalvi et al., 2004; Guimarães, 2019; Nurjaman et al., 2021).

2.3.1 O Processo Pirometalúrgico RKEF

O processo pirometalúrgico RKEF (do inglês *Rotary Kiln Electric Furnace*) é uma técnica de produção da liga Ferroníquel a partir de minérios lateríticos. O processo RKEF é a combinação basicamente de duas etapas de alta temperatura: Calcinação combinada com a Pré-redução a 850–1000°C no Calcinador Rotativo (Rotary Kiln) e Fundição a 1500–1600°C em um Forno por arco Elétrico (Electric Furnace) (Li et al., 2012). Na Figura 7 é mostrado um fluxograma da planta produção da empresa Anglo American localizada em Barro Alto - GO, com destaque para a fase final do processo em que passa pela calcinação e, na sequência, pelos fornos elétricos.

Figura 7 – Fluxograma da planta de Barro Alto- GO.



Fonte: Adaptado de Anglo American (2020)

A seguir as etapas da rota pirometalúrgica RKEF serão descritas:

1. Preparação do Minério:

- O processo começa com a preparação do minério laterítico bruto. Esse minério passa por trituração/britagem e moagem para atingir o tamanho de partícula desejado para os próximos processos, seguido da homogeneização em pilhas.

2. Secagem:

- O minério moído é submetido a secagem em um forno para uma primeira remoção de umidade externamente aderida no minério. Nessa etapa não há fusão da carga, sendo o forno alimentado com material sólido e o produto da etapa também é sólido e umidade total entre 15 e 20% (Warner et al., 2006).

3. Pré-Redução e Calcinação:

- Um forno rotativo é então alimentado com o minério, onde é pré-aquecido a uma temperatura relativamente baixa, geralmente acima de 700°C. Esse pré-aquecimento remove tanto a água residual quanto a de cristalização.
- Após o pré-aquecimento e o processamento das reações de pré-redução, o minério então é calcinado a temperaturas mais elevadas, normalmente ocorrem entre 900°C e 1000°C usando carvão betuminoso ou antracito como agentes redutores. O material calcinado sai do forno a aproximadamente 900°C e suas características de composição serão demonstradas na Tabela 4 a seguir (Crundwell et al., 2011; Warner et al., 2006):

Tabela 4 - Composição Química teórica do material calcinado.

Componente	% Calcinado
Carvão	2
Níquel (Ni)	1,50 a 3 (25% como metal e 75% como óxido)
Ferro (Fe)	15 (em torno de 5% metálico e 95% como FeO)
SiO ₂	40
MgO	25
Al ₂ O ₃	1

Fonte: Adaptado de (Crundwell et al., 2011)

4. Redução Elétrica:

- De acordo com (Guimarães, 2019), a fase de redução é onde ocorre a fusão elétrica em um forno de arco submerso (Electric Arc Furnace), removendo totalmente o oxigênio que estava em ligação com os metais desejados (Níquel e Ferro). Neste estágio, o minério calcinado é alimentado no forno junto com carbono (geralmente coque ou antracito) e um fundente (geralmente calcário). O calor gerado pelo arco elétrico a aproximados 1600°C funde os componentes, e o carbono age novamente como redutor, convertendo os óxidos em metal. Ao fim do processo, é dada origem aos produtos principais: a liga de Ferroníquel a 1450°C (Fe-Ni, composta de 20 a 40% de Ni e 80 a 60% de Fe) e a Escória de Ferroníquel a 1550°C (onde se fazem presentes os óxidos restantes tais como SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 e Al_2O_3) (Crundwell et al., 2011).
- A EFN e a Fe-Ni são imiscíveis por causa de suas ligações moleculares (iônica e metálica respectivamente). Assim, são separadas por diferença de densidade, a liga é mais pesada (7 toneladas/m³) e se deposita no fundo, já a escória (3 toneladas/m³) flutua sob a liga, sendo ambas recolhidas por aberturas em alturas adequadas nas laterais do forno (Crundwell et al., 2011).

5. Refino:

- Segundo Crundwell et al. (2011), finalizada a etapa de redução, é feito o refino logo após a liga ser recolhida do forno elétrico. São adicionados CaO , O_2 e CaC_2 com objetivo de remover as impurezas e outros elementos indesejados tais como Fósforo (P) e Enxofre (S) da liga Fe-Ni. Esse processo também gera uma escória de refino, porém esta possui características e propriedades diferentes da proveniente da etapa de redução elétrica e não será aprofundado no presente estudo.
- O metal refinado é submetido a um processo de granulação, classificação e subsequente estocagem para futura expedição. A liga granulada possui dimensões compreendidas entre 6 e 70mm. A composição final da liga de ferroníquel é de aproximadamente: Níquel (35%), Sílica (0,03%), Carbono

(0,04%), Enxofre (0,06%) e Fósforo (0,03%) e o restante em Ferro.(Anglo American, 2020).

2.4 A Escória de Ferroníquel (EFN)

A escória proveniente da etapa de redução elétrica (fusão de minérios de níquel em fornos elétricos de arco submerso) é resfriada e granulada através de jatos de água em tanques de resfriamento (Anglo American, 2020). O resfriamento da escória de ferroníquel é um processo crucial na produção desse material, portanto, o resfriamento é vital para controlar sua composição e características físicas.

No processo de granulação por jato d'água, o jato de alta pressão é direcionado para a escória líquida quente, levando à fragmentação da escória em grãos menores.

Segundo Geyer (2001) e Lemonis et al. (2015), quando a escória é submetida ao resfriamento brusco e fragmentação por jato d'água, tem-se como resultado um material vítreo com pouca ou nenhuma cristalização, similar em granulometria à areia de rio, isso se dá ao fato do alto teor de sílica somado ao rápido resfriamento. Possuindo estrutura porosa e textura áspera, a EFN é valorizada pelas suas reatividade e ligações hidráulicas. A escória também pode ser resfriada naturalmente ao ar, porém essa perde suas características hidráulicas, tornando-se inerte devido à cristalização de seus óxidos componentes.

Os dados da Indústria Nacional Brasileira indicam que as instalações localizadas nas cidades de Barro Alto e Niquelândia, em Goiás, Brasil, têm uma proporção de cerca de 6 toneladas de escória para cada tonelada de liga de Fe-Ni produzida. Com a informação de aproximadamente 161mil toneladas de minério beneficiado produzidos em 2021 pela Anglo American (ANM, 2022), é possível inferir que são concebidos 966mil toneladas de escória anualmente nessa planta industrial. Esse número pode ser ainda mais alarmante em outros locais no mundo, chegando à proporção entre 10 e 12 toneladas de EFN para 1 tonelada de liga segundo (Nuruzzaman et al., 2023a). Isso demonstra que a geração de escória é relevante em relação à produção de ligas, o que pode ter implicações proeminentes no que diz respeito à gestão de resíduos, aos processos de reciclagem ou o descarte.

O estudo de Han et al. (2023) expôs as composições químicas predominantes da EFN divulgados ao longo dos últimos anos. Segundo o autor, destacam-se como principais constituintes da EFN:

- SiO_2 : entre 40%-60%, com uma média de 49,09%,
- MgO : entre 20%-40%, e média de 28,87%,
- Fe_2O_3 : aproximadamente de 10%, média de 10,51%.

Por outro lado, os teores de CaO e Al_2O_3 revelam-se reduzidos (com médias aproximadas de 2,5 e 3% respectivamente).

A presença notável de óxido de magnésio (MgO) nas escórias de ferroníquel, representando ao menos 20% de sua composição total, é um aspecto de grande importância no contexto de sua aplicação em matrizes cimentícias. A porcentagem significativa de MgO nas escórias é relevante, pois esse componente influencia diretamente suas propriedades físicas e mecânicas, contribuindo para a formação de uma estrutura volumetricamente instável (Saha; Khan; Sarker, 2018). Para materiais aglutinantes, a norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018a), estipula que os cimentos Portland classificados como CP V devem conter (em massa) menos de 6,5% de MgO .

O fenômeno de expansão em uma matriz cimentícia é influenciado pela concentração de MgO , cuja interação com a água se assemelha à do CaO . Portanto, apenas o periclásio, uma fase cristalina de MgO , exibe alguma reação patológica, enquanto o MgO presente na fase vítrea demonstra inofensividade. Até aproximadamente 2% de periclásio, em relação à massa total do cimento, se combina com os compostos cimentícios. No entanto, uma presença excessiva do óxido tende a promover expansão e resulta em uma desintegração gradual do material (Neville, 2015).

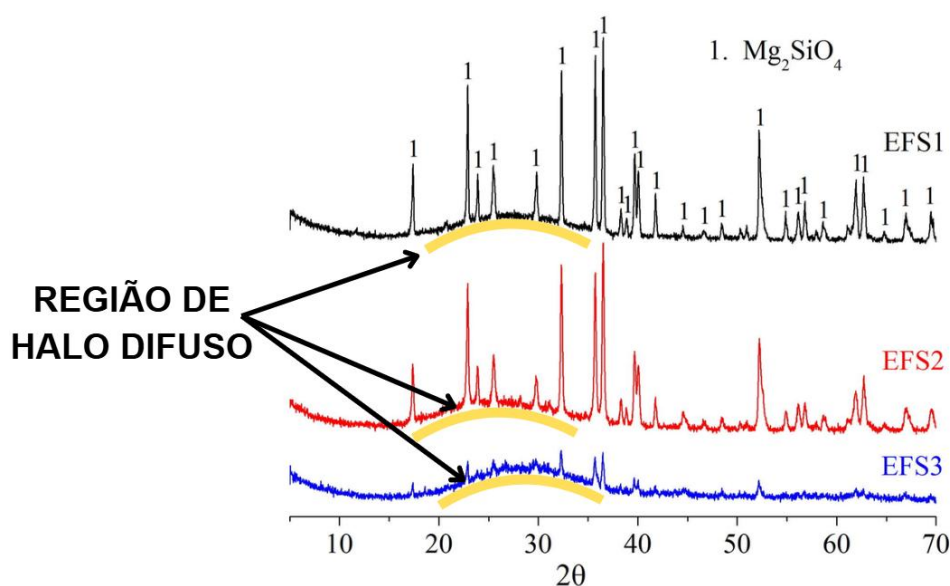
Foi observado por Choi e Choi (2015) que tanto as amostras de EFN resfriadas ao ar quanto as resfriadas com água, não exibiram picos de magnésia livre pela técnica de DRX, o material era principalmente composto por forsterita (Mg_2SiO_4) e enstatita (MgSiO_3). Dessa forma, sugere-se que não haveria condições para que aconteça a expansão. Ainda, Yang, Yao e Zhang (2014) faz menção as altas temperaturas implicadas no processo pirometalúrgico, as quais deixam o MgO da EFN menos reativo do que os agentes promotores de expansão habituais a base de MgO .

A Forsterita encontrada na EFN, é quimicamente estável nas reações de hidratação em concretos de Cimentos Portland (Saha; Khan; Sarker, 2018). Através de DRX e MEV/EDS, Rahman et al. (2017) não encontrou traços de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (brucita) nos produtos de hidratação cimentícias analisadas, uma vez que esse mineral seria o resultado da interação hidráulica de compostos de magnésio.

Já pesquisas como as de Katsiotis et al. (2015) e Lemonis et al. (2015) apresentam composições químicas um pouco diferentes das anteriores, encontrando um teor mais elevado de ferro alcançando valores de 40,02%. Também, mostra que em relação à atividade pozolânica da EFN, foi quantificado um teor de sílica reativa de 40,71% em peso, ao passo que sua pozolanicidade foi avaliada em 5,9 MPa em matrizes de argamassas.

De acordo com Huang, Wang e Shi (2017), o difratograma de raios X de 3 amostras diferentes de escória de ferroníquel indicados na Figura 8, destaca que o material possui caráter essencialmente vítreo, uma vez que o fundo do gráfico é marcado por um halo de protuberância e difuso, típico de fases amorfas. Dentre as fases cristalinas, sobressai-se a Forsterita (Mg_2SiO_4), identificada como o constituinte cristalino dominante e responsável pela maior parte dos máximos de intensidade observados.

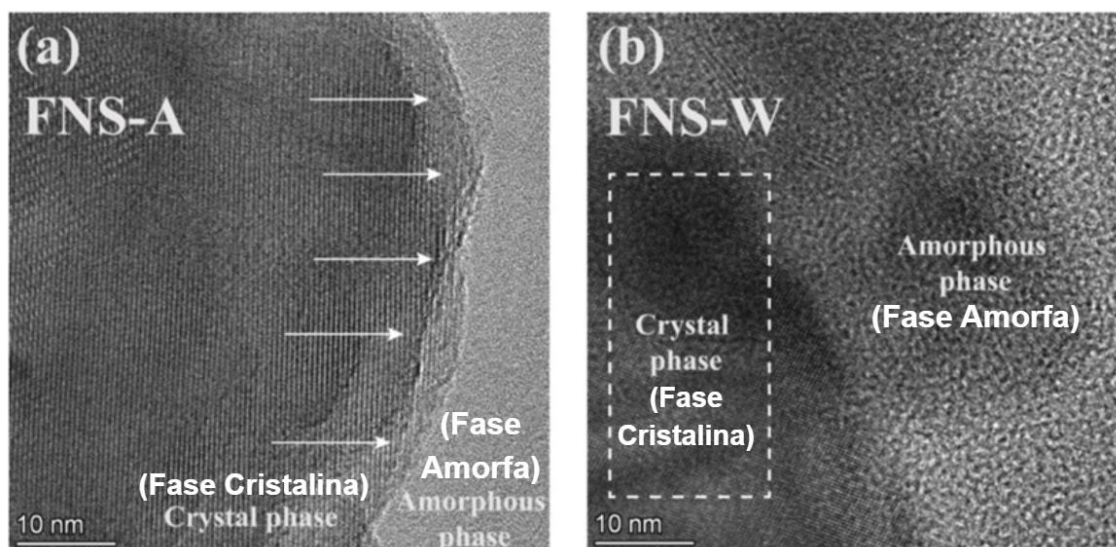
Figura 8 – Espectro de DRX de 3 amostras de EFN (EFS1, EFS2 e EFS3)



Fonte: Adaptado de Huang, Wang e Shi (2017)

A EFN apresenta composição e arranjo de fases que dependem fortemente da jazida, das etapas/rotas de processamento e do modo como o material é resfriado (Saha; Khan; Sarker, 2018). Quando o resfriamento é abrupto, por têmpera em água, o líquido de escória solidifica quase instantaneamente, impedindo o ordenamento dos íons e favorecendo a formação de uma matriz vítrea, rica em fases amorfas, já durante o resfriamento lento ao ar, os íons dispõem de tempo para se reorganizar, o que leva ao desenvolvimento de maior quantidade de fases cristalinas (Yanning et al., 2024), a Figura 9 demonstra a diferença física entre os métodos de resfriamento da EFN analisada por microscopia eletrônica de transmissão (MET). Estudos com EFN da Nova Caledônia conduzido por Bouasria et al. (2022) utilizando espectroscopia Raman, possibilitaram identificar além da Forsterita, Enstatita e sílica amorfa, traços de Akaganéita, Chromita e Calcita, por isso, sempre que houver alteração na origem, no processo produtivo ou no regime de resfriamento, torna-se essencial reavaliar a EFN por meio de caracterização detalhada, a fim de compreender suas propriedades e desempenho potencial em sistemas cimentícios.

Figura 9 – EFN resfriada via: a)Ar (FNS-A); b)Água (FNS-W)



Fonte: Adaptado de Yanning et al. (2024)

2.4.1 Aplicações da Escória - Estudos em andamento

A Escória de Ferroníquel é um subproduto da exploração e beneficiamento do Níquel. Sua incorporação em misturas de concreto apresenta potenciais benefícios tanto ambientais quanto técnicos. Nos últimos anos, diversos estudos têm sido

conduzidos para investigar as propriedades e o desempenho dessa escória como agregado miúdo ou material cimentício suplementar (MCS), explorando suas características físicas, químicas e mecânicas.

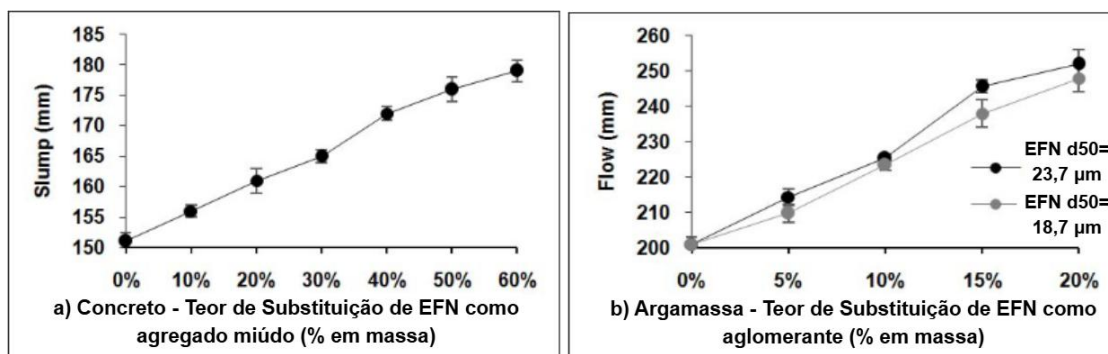
2.4.1.1 EFN como Agregado Miúdo

A pesquisa de Saha e Sarker (2017) avaliou argamassas de cimento com diferentes proporções de EFN como agregado e conclui que a substituição ideal é de 50% de EFN, otimizando a resistência à compressão devido ao eficiente empacotamento das partículas. A presença de 50% de EFN também melhorou a trabalhabilidade, avaliada através de *flow test*.

Os recentes estudos de Ernawan et al. (2023) substituindo os agregados miúdos por EFN resfriada em água, mostram que a inclusão da escória eleva levemente a densidade do concreto, sendo esse aumento proporcional à substituição de areia natural. Substituições de 50% e 100% de EFN resultaram em melhorias na resistência à compressão, alcançando até 21% e 15%, respectivamente, em comparação com o corpo de prova de controle. Esses resultados indicam que a utilização de EFN como agregado fino pode ser uma alternativa viável, apresentando propriedades mecânicas superiores ao concreto convencional.

Foi também investigado por Edwin et al. (2022) o potencial da EFN como substituto para agregado miúdo em concretos e aglomerante em argamassas. Os resultados de trabalhabilidade exibidos na Figura 10, revelaram que o aumento do teor de EFN proporcionou maior trabalhabilidade tanto para o concreto fresco quanto às argamassas. Além disso, a substituição de até 40% do agregado fino por EFN granulada resultou no melhor cenário para a resistência à compressão do concreto. No entanto, na análise da atividade pozolânica das argamassas, conduzida pelo teste de Frattini, indicou ausência de atividade após 28 dias de cura em todas as misturas com EFN.

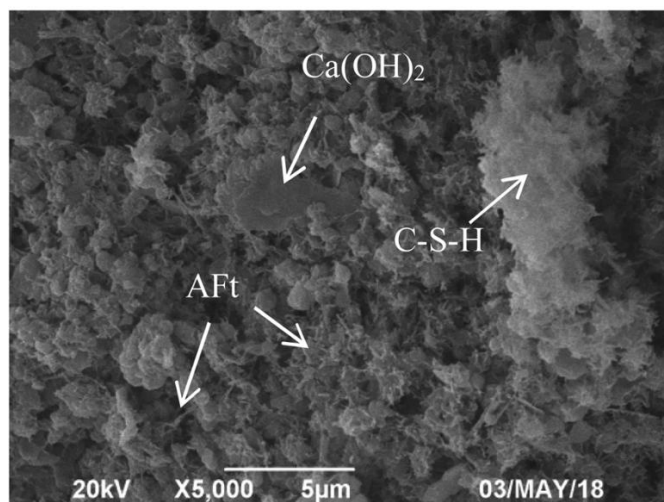
Figura 10 – Influência do teor de EFN na trabalhabilidade: a) abatimento (slump) do concreto; b) espalhamento (flow) da argamassa



Fonte: Adaptado de Edwin et al. (2022)

Em relação as pesquisas envolvendo durabilidade, Liu et al. (2020) conclui que a presença da EFN melhora a resistência à sulfatos no concreto. Os resultados mostraram que a durabilidade, em termos de resistência à penetração de íons cloreto do concreto, tem grande correlação com a resistência à compressão. Através do uso da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi possível perceber que haviam mais produtos de hidratação no concreto contendo EFN do que no concreto de referência, a Figura 11 demonstra os produtos hidratados (C-S-H, portlandita e etringita) na substituição em 50% de areia por EFN. A presença da EFN fortaleceu a estrutura interna do concreto, o que contribuiu para sua melhor resistência frente aos agentes agressivos. Portanto, pode-se inferir que o agregado miúdo de EFN pode ser usado para substituir a areia natural em até 40%, melhorando a durabilidade do concreto.

Figura 11 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura – produtos hidratados de concreto com EFN como agregado miúdo em teor 50%



Fonte: Liu et al. (2020)

Ao substituir parcialmente EFN como agregado fino natural e cinzas volantes como aglomerante na matriz do concreto, Nguyen et al. (2021) demonstrou um notável potencial na mistura, apresentando propriedades mecânicas comparáveis às do concreto convencional usado como referência. Ainda, exibindo um desempenho superior na proteção contra a contaminação por cloretos e na resistência a reações álcali-silica (RAS).

Nguyen et al. (2019), observou que a substituição de 50% de areia natural por EFN granulada faz surgir zonas de transição de porosidade baixa, sendo suficientes para reduzir a interconectividade da rede de zonas de transição porosas de agregados naturais. Assim, a resistência contra a difusão de íons quimicamente agressivos, a absorção de água, volume de vazios, a resistividade volumétrica e superficial são parâmetros significativamente melhorados em comparação com os concretos de referência. Além disso, a mesma substituição de 50% da areia, compensa efeitos negativos das cinzas volantes na resistência a carbonatação que ocorrem pela presença do CO₂.

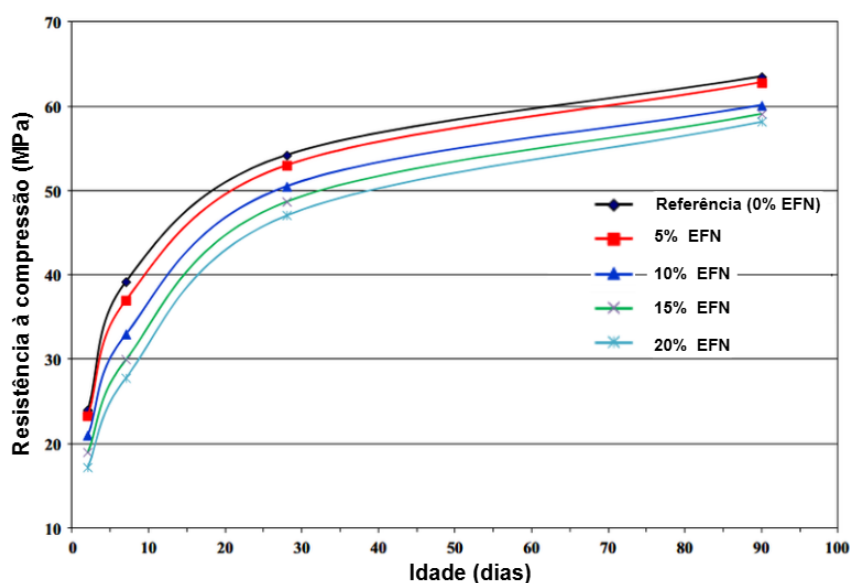
2.4.1.2 EFN como Material Cimentício Suplementar

A escória de ferroníquel, quando moída, pode ser considerada também como um material cimentício suplementar, em substituição ao cimento Portland. Na sequência, são abordadas publicações em que a EFN é considerada uma adição, em substituição ao cimento Portland, aludindo também as principais consequências no comportamento mecânico e de durabilidade de pastas, argamassas e concretos.

Foi observado por Katsiotis et al. (2015), que a incorporação de EFN como MCS aumentou a fluidez das argamassas até teores de 20%, através do flow test. Consequentemente, sua capacidade de substituição ao cimento, como material cimentício suplementar (MCS), é restrita, geralmente sendo mantida abaixo de 20% em massa para garantir um desempenho adequado, especialmente em termos de desenvolvimento de resistência à compressão nas primeiras idades. Para esses dois fatores, a EFN reduziu a taxa de desenvolvimento de resistência e retardou a taxa de hidratação nas idades iniciais. Já em idades avançadas, o desencadeamento da reação pozolânica contribuiu para o desenvolvimento de resistências mecânica. O silicato amorfo dissolveu-se no meio alcalino do cimento hidratado e reagiu com a

portlandita formando C-S-H, alterando a microestrutura hidratada final da pasta. Já os poros sofreram uma redução em seu tamanho, uma vez que a estrutura dos compostos da matriz cimentante ficou mais densa. A Figura 12 demonstra essas tendências apresentadas pelos autores.

Figura 12 – Resistência à compressão de pastas com incorporação de EFN



Fonte: Adaptado de Katsiotis et al. (2015)

Ainda usando a incorporação, em massa, de 20% de EFN sob ciclos de umedecimento e secagem, Li et al. (2019) demonstraram que a adição mineral melhora consideravelmente a resistência à sulfatos nas idades iniciais, independentemente de a cura ser por via úmida ou a vapor.

Segundo a pesquisa de Zhou e Shi (2022), adicionar EFN às pastas de cimento melhorou a trabalhabilidade em comparação com as amostras de controle sem adições. Isso foi evidenciado pela redução da tensão de escoamento e da viscosidade plástica. No entanto, ao comparar diferentes granulometrias de EFN, observou-se uma redução na trabalhabilidade à medida que a área específica aumentava. Além disso, a substituição de cimento por EFN desacelerou a resistência do aglomerante em 72 horas de ensaio. Embora a incorporação de EFN, em substituição ao cimento, tenha reduzido, nas primeiras idades, a resistência à compressão e a resistência à tração dos concretos, observou-se um ganho progressivo em idades mais avançadas. além de uma melhor resistência a penetração de íons cloreto em comparação com o concreto de cimento puro.

A inclusão de EFN moída como um substituto parcial do cimento teve impactos positivos na fluidez da pasta, principalmente devido à sua hidratação mais lenta. Contribui positivamente também para o empacotamento do esqueleto granular da fração fina entre as partículas de cimento. Análises calorimétricas revelaram uma diminuição na liberação de calor durante a hidratação, resultado dos menores teores de cálcio presentes na EFN. Ao substituir 35% do cimento por EFN, observou-se uma redução de 16% na resistência à compressão aos 28 dias em comparação com a mistura de controle. Esse resultado é considerado satisfatório, especialmente ao se considerar o uso de EFN com baixo teor de cálcio como substituto do cimento (Nuruzzaman et al., 2023b).

O estudo realizado por Shan, Zhuang e Zhou (2023) aplicou a EFN em uma moagem ultrafina, chegando a área específica de $13300\text{cm}^2/\text{g}$ enquanto a do cimento utilizado era $4850\text{cm}^2/\text{g}$. Embora a adição de EFN não tenha grande impacto na resistência inicial do concreto, ela traz melhorias significativas na resistência após 28 dias, sendo que a substituição de 20% apresentou os resultados mais promissores. Essa forma ultrafina de EFN também contribui para melhorar a durabilidade do concreto, especialmente contra ação de sulfatos e íons de cloreto, devido à redução da porosidade total e refinamento dos poros promovidos pela adição desse material.

O uso da escória de ferroníquel como MCS ou agregado miúdo tem chamado a atenção como uma opção promissora para empresas de construção (Saha; Khan; Sarker, 2018). Para além das características físicas, é necessário examinar a durabilidade desse material para entender como ele provavelmente se comportará ao longo do tempo, permitindo seu uso em projetos mais amplos.

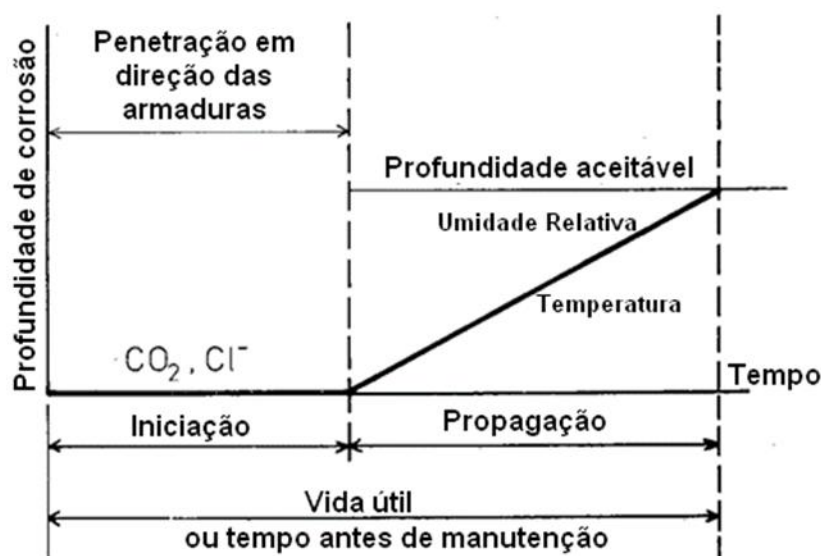
Para garantir a durabilidade, a vida útil e o bom desempenho de composições cimentícias contendo EFN, é crucial investigar o transporte de agentes agressivos como CO_2 e cloretos, e a corrosão das armaduras que eles induzem. A compreensão desses mecanismos permite a mitigação dos efeitos degradantes. A utilização da EFN, por sua vez, é promissora na redução do risco de corrosão, devido à estrutura de poros mais compacta proporcionada pelos ligantes que a contêm (Kim; Lee; Ann, 2019).

2.5 Durabilidade no Concreto

A NBR 6118 (ABNT, 2023a) estabelece que durabilidade é a capacidade da estrutura de concreto armado de enfrentar e resistir às influências previstas nos projetos. A normativa também distingue os mecanismos de deterioração da matriz cimentícia — lixiviação, ataque por sulfatos e reação álcali-agregado — daqueles que afetam diretamente as armaduras, em especial a despassivação induzida por carbonatação e pela penetração de íons cloreto.

Do ponto de vista da corrosão das armaduras, o modelo clássico proposto por Tuutti (1982) apresentado na Figura 13 organiza a vida útil em duas etapas: iniciação e propagação. A etapa de iniciação corresponde ao tempo necessário para que agentes agressivos, como CO_2 e cloretos, alcancem a armadura em teores críticos e rompam a condição de passividade. A etapa de propagação abrange o período em que a corrosão já está ativa e evolui até níveis de dano inaceitáveis. O tempo total até o fim da vida útil resulta da combinação de fatores relacionados aos materiais (relação água/cimento, cobrimento, tipo de ligante), à geometria estrutural e ao ambiente de exposição (teores de CO_2 e cloretos, umidade, temperatura etc.) (Casculo, 1997; Tuutti, 1982).

Figura 13 – Modelo de vida útil de estruturas de concreto armado



Fonte: Adaptado de Tuutti (1982)

Ao longo das últimas décadas, a compreensão de durabilidade migrou de uma visão puramente empírica (baseada em prescrições de traço, cobrimento e resistência característica) para abordagens baseadas em desempenho (*performance-based*

design), em que as propriedades microestruturais de transporte (difusão, permeabilidade, migração iônica) são quantificadas e inseridas em modelos de previsão de vida útil (Alexander, 2018). Assim, a durabilidade das estruturas de concreto depende tanto da configuração da rede de poros e das microfissuras da pasta de cimento, que controlam a penetração e o transporte de agentes agressivos em fase líquida ou gasosa (Silva, 2022), quanto do desempenho que o sistema estrutural é capaz de manter ao longo do tempo em função da interação entre concreto, meio agressivo, condições de uso, operação e manutenção (Medeiros; Andrade; Helene, 2022).

A permeabilidade e, de forma mais geral, a estrutura de poros da pasta de cimento, constituem o parâmetro microestrutural central que governa entrada de agentes agressivos (Nazari; Azimzadegan, 2012). Ela é fortemente condicionada pela relação água/aglomerante, pelo grau de hidratação e pela qualidade da cura (Jambor, 1990). À medida que a hidratação progride, a rede de poros se torna mais descontínua e refinada, reduzindo a mobilidade de soluções e gases e, conseqüentemente, a suscetibilidade a processos de deterioração (Mehta; Monteiro, 2008).

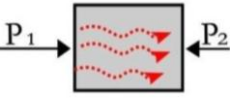
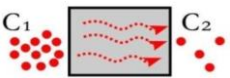
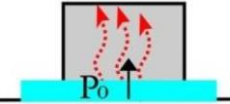
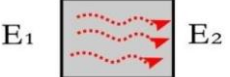
2.5.1 Mecanismos de penetração de agentes agressivos

A penetração de umidade, íons cloreto, dióxido de carbono e outros agentes agressivos ocorre basicamente porque o concreto é um meio poroso e, portanto, permite diferentes mecanismos de transporte (Nilsson, 2003). Em termos de durabilidade, o que interessa é como esses mecanismos se combinam ao longo do tempo para levar os agentes da superfície até a região de cobrimento e, por fim, até as armaduras.

De forma simplificada, o fluxo inicial de água e soluções ocorre por sucção capilar, sobretudo nas camadas superficiais, em seguida, gradientes de concentração passam a controlar a difusão iônica no interior da pasta. (Conciatori; Sadouki; Brühwiler, 2008; Medeiros; Helene, 2009).

Na Tabela 5 a seguir, Possan (2010) resume e elenca as principais características de cada mecanismo de transporte:

Tabela 5 - Ilustração dos Mecanismos de Transporte.

MECANISMO	PARÂMETRO	DEFINIÇÃO	ILUSTRAÇÃO	FATORES DE INFLUÊNCIA	RELEVÂNCIA
PERMEABILIDADE	Coeficiente de Permeabilidade a água: K (mm/s)	Fluxo de um fluido através do concreto devido a um gradiente de pressão ($P_1 > P_2$)		Depende do tamanho dos e continuidade dos poros, podendo ser descrita pela lei de Darcy.	Relacionada à conectividade dos poros do concreto.
DIFUSÃO	Coeficiente de Difusão: D (cm²/s)	Ingresso de íon Cl ou CO ₂ através do concreto devido a um gradiente de concentração dos agentes agressivos ($C_1 > C_2$).		Depende da composição e estrutura dos poros do concreto, da temperatura e do teor de umidade, sendo representado pela 1ª e 2ª leis de Fick.	Importante para estudos e modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto armado.
SUCÇÃO CAPILAR (ABSORÇÃO)	Coeficiente de Absorção de água: A (g/cm².h^{1/2})	Ingresso de agentes agressivos e água através do concreto devido à pressão capilar (P_0).		Depende do diâmetro dos poros, da tensão superficial do líquido e da sua viscosidade.	Determinação da velocidade de penetração de água através do concreto, o que está diretamente relacionado à durabilidade.
MIGRAÇÃO IÔNICA	Resistividade elétrica: p (ohm.cm)	Movimento de íons através dos poros do concreto devido a um potencial elétrico (E_1 e E_2).		Depende do teor de umidade, da temperatura e da tensão aplicada.	Monitoramento do desenvolvimento da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado (no período da propagação).

Fonte: Adaptado de Possan (2010)

Todos esses mecanismos dependem essencialmente da conectividade, do tamanho dos poros e da relação água/aglomerante, que definem o grau de refinamento da microestrutura (Dehwah; Hamidane; Xi, 2024; Xu et al., 2024; Zheng et al., 2021).

2.5.2 Corrosão das armaduras

De forma geral, a corrosão pode ser definida como o processo de deterioração de um material por interação química ou eletroquímica com o meio resultando em perda progressiva de seção e de propriedades mecânicas, podendo a corrosão das armaduras ocorrer de forma generalizada (devido à carbonatação que reduz o pH do concreto) ou localizada por pite/puntiforme (ataque localizado por íons cloreto) e por tensão fraturante (sob grandes esforços mecânicos), conforme ilustra a Figura 14 (Ali et al., 2024; Cascudo, 1997).

Figura 14 – Tipos de corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado.



Fonte Adaptado de Cascudo (1997)

Quando a alcalinidade é reduzida por carbonatação ou quando íons cloreto atingem a superfície do aço em teores críticos, a camada passiva é rompida e se estabelece uma célula de corrosão, e gera diferença de potenciais (ddp) com regiões anódicas e catódicas sobre a própria barra. Em concretos já contaminados por cloretos, a combinação dos dois mecanismos é particularmente perigosa, pois ambos os efeitos agressivos se somam, intensificando a corrosão.

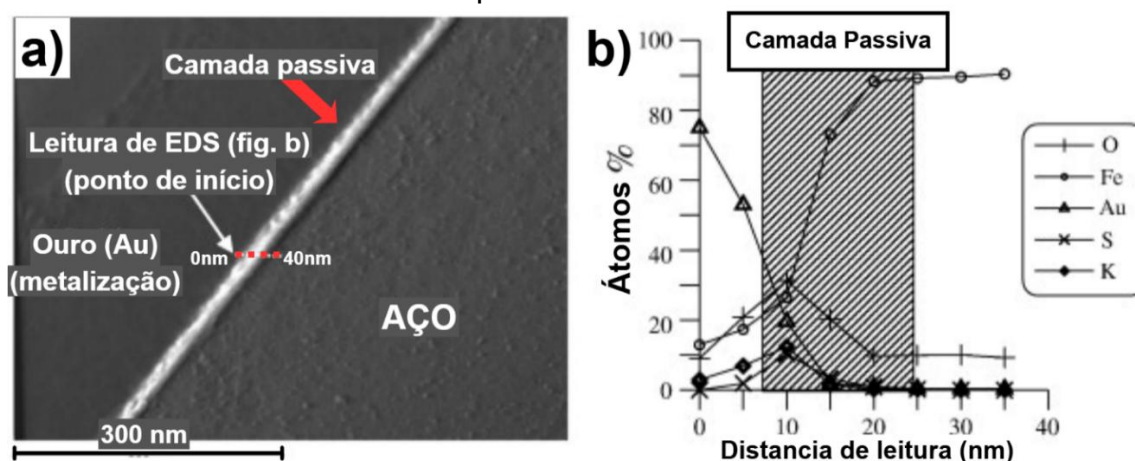
A continuidade de poros preenchidos com solução eletrolítica no concreto permite o fluxo de corrente e a formação de produtos de corrosão volumosos, que geram fissuração do concreto, destacamento do cobrimento e perda de aderência aço–concreto (Souza; Ripper, 1998). Por essa razão, a corrosão das armaduras é reconhecida como o principal mecanismo de degradação em estruturas de concreto armado expostas, condicionando de maneira decisiva a vida útil da estrutura (Mehta; Monteiro, 2008; Shi et al., 2012).

2.5.3 Despassivação de armaduras por carbonatação

A camada passiva formada sobre a armadura é constituída predominantemente por óxidos e hidróxidos de ferro, sendo estável e pouco solúvel em meios altamente alcalinos, típicos do concreto não carbonatado ($\text{pH} > 12,5$), com o avanço da carbonatação, ocorre a redução da alcalinidade da matriz cimentícia, o que aumenta a instabilidade e a solubilidade dessa camada passiva, geralmente com $\text{pH} < 9,4$ (Freire et al., 2009; Huet et al., 2005). Essa despassivação não implica corrosão imediata, mas cria as condições necessárias para o estabelecimento de um processo eletroquímico, permitindo reações de oxirredução na superfície do aço na presença de oxigênio e umidade, e, conseqüentemente, o início do processo corrosivo.

O concreto de cimento Portland apresenta solução de poros altamente alcalina, com pH em torno de 12,5–13,5, devido principalmente ao hidróxido de cálcio liberado na hidratação dos silicatos de cálcio (Helene, 1986; Mehta; Monteiro, 2008). Esse meio favorece a formação, na superfície das barras de aço, de uma película passiva e estável de aproximadamente 10 nanômetros que protege o metal contra a corrosão (Ghods et al., 2013; Poursaee, 2016; Williamson; Isgor, 2016). Na Figura 15-a é possível visualizar essa camada, onde foi realizado microscopia eletrônica de transmissão (MET) na seção transversal do aço, evidenciando a camada passiva na superfície (cor esbranquiçada) indica-se também o ponto inicial do varrimento por EDS (linha pontilhada, 0–40 nm), a Figura 15-b exibe o perfil composicional obtido por EDS linear ao longo da direção indicada em (a), mostrando a variação do percentual atômico dos elementos pela película.

Figura 15 – Análise da camada película passiva por (a) MET e (b) EDS- Perfil composicional atômico.

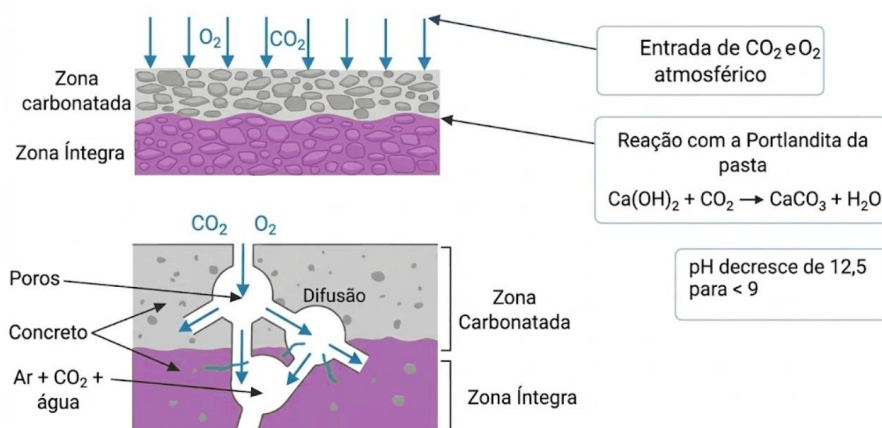


Fonte: adaptado de Ghods et al. (2013)

A carbonatação representa um mecanismo clássico de despassivação, associado à redução da alcalinidade dos poros do concreto pela reação do CO_2 atmosférico com hidróxidos presentes na pasta hidratada, em especial $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O processo resulta na formação de carbonatos (CaCO_3) e na progressão de uma frente de carbonatação que separa uma zona ainda altamente alcalina ($\text{pH} > 12\text{-}13$) de outra com pH já reduzido ($\text{pH} < 9$), na qual a película passiva das armaduras deixa de ser estável.

Embora a formação de CaCO_3 possa, inicialmente, reduzir a porosidade superficial, a carbonatação torna-se prejudicial quando a frente atinge a armadura, permitindo a instalação de corrosão generalizada. Tanto o CO_2 quanto o O_2 adentram o concreto por difusão, a velocidade desse avanço depende também da presença de adições minerais que modificam o balanço de hidróxidos e o refinamento de poros, além de fatores já discutidos como a/c, cura e umidade. (Rodriguez-Navarro et al., 2023; Shah; Bishnoi, 2018; Yoon, 2018). A Figura 16 ilustra a entrada dos gases pelos poros do concreto.

Figura 16 – Mecanismo de difusão nos poros do concreto



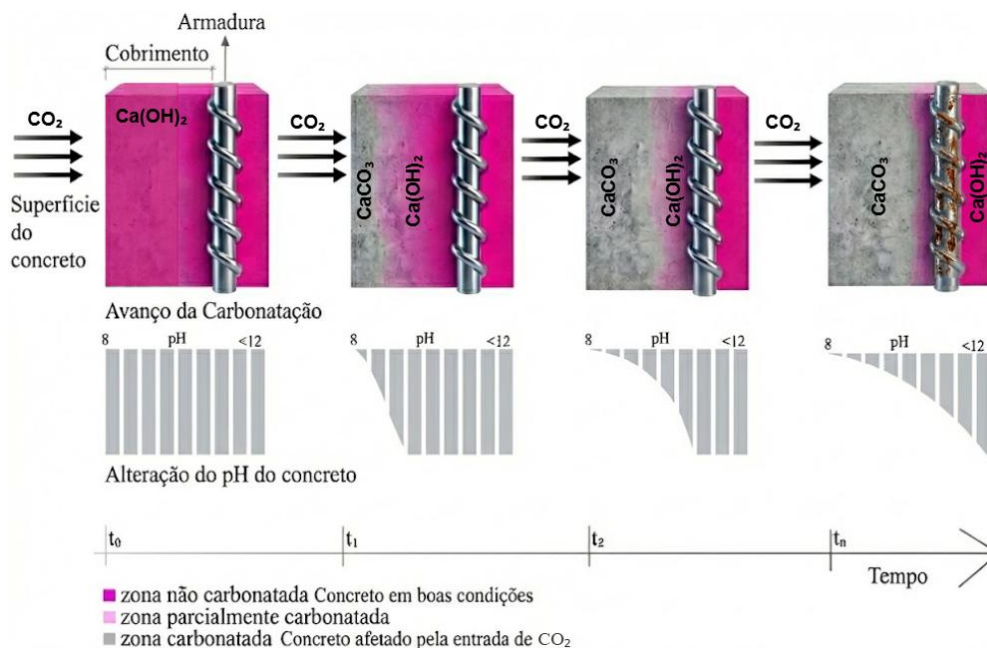
Fonte Adaptado de Cascudo (1997)

É importante destacar que a carbonatação, por si só, não provoca a corrosão barras de aço. O processo de carbonatação remove a película protetora formada na superfície do aço, criando a condição para a deterioração efetiva do metal por outros agentes agressivos, como umidade e oxigênio (Fuhaid; Niaz, 2022).

Na prática, a carbonatação é frequentemente avaliada por métodos acelerados em câmaras de CO_2 , com posterior determinação da profundidade carbonatada via aspersão de solução de fenolftaleína, conforme Figura 17 (Merah, 2024; Vogler et al.,

2020). Ensaios desse tipo permitem comparar concretos com diferentes ligantes e podem evidenciar se a substituição do cimento por MCS altera a cinética de carbonatação em relação ao concreto de referência (Morandeau; Thiéry; Dangla, 2015).

Figura 17 - Avanço da frente de carbonatação no concreto ao longo do tempo com identificação colorimétrica por pH



Fonte: Adaptado de Possan (2010)

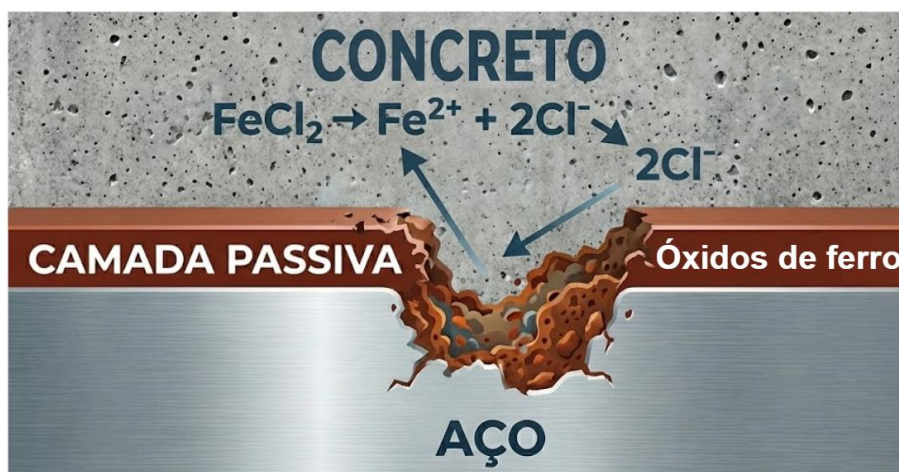
2.5.4 Penetração e desp passivação de armaduras por íons cloreto

Cascudo (1997) afirma que nenhum outro contaminante é tão comentado na bibliografia quanto são os cloretos, mostrando assim o quão importante é o seu entendimento. Em ambientes marinhos ou salinos, esses íons penetram no concreto ao longo do tempo, podendo ser descritos pelas leis de Fick, apesar de sua aplicação ter algumas limitações na prática em estruturas reais, uma vez que parte das estruturas não estão saturadas ou submersas a todo momento (Ma et al., 2025; Taffese; Espinosa-Leal, 2022).

Ao atingir a armadura, os cloretos rompem a película passiva de óxidos estáveis formada na superfície do aço, promovendo a dissolução anódica localizada e a formação de pites de alta taxa de dissolução de ferro. Essa corrosão por pite é particularmente perigosa porque pode causar perda significativa de seção de armadura com manifestações superficiais discretas (Ahmad, 2003). Mesmo em teores

relativamente baixos de cloreto, tal quantidade podem sustentar reações de corrosão sucessivas, uma vez que o íon não é consumido nas etapas eletroquímicas e permanece disponível para “reciclagem” no processo, sendo possível interpretar esse mecanismo na Figura 18 (Rivetti et al., 2018).

Figura 18 - Rompimento da camada passiva do aço e “reciclagem” dos íons cloretos



Fonte: Adaptado de Broomfield (2007)

Na avaliação experimental da resistência à penetração de cloretos, dois procedimentos se destacam por explorarem, de forma acelerada, os principais mecanismos de transporte iônico no concreto: o ensaio de indicação elétrica da capacidade do concreto em resistir à penetração de íons cloreto - Rapid Chloride Permeability Test (RCPT), idealizado por Whiting (1981) e normatizado pela ASTM C1202 (ASTM, 2025), e o ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário - Rapid Chloride Migration Test (RCMT), padronizado pela NT Build 492 (1999) (NORDTEST). Apesar dos nomes, o RCPT é verificado a migração e RCMT a difusão. Em ambos os casos, busca-se reproduzir em laboratório o ingresso de cloretos em materiais cimentícios por eletro-migração e difusão, porém comprimindo em horas ou poucos dias fenômenos que, em campo, ocorrem ao longo de anos, o que torna esses métodos particularmente atrativos para estudos comparativos de microestruturas e para o desenvolvimento de concretos de maior durabilidade.

O ensaio da ASTM C1202 ou RCPT consiste em submeter corpos de prova de concreto (100mm de diâmetro x 50mm de altura) saturados por água em vácuo a uma diferença de potencial de 60V em corrente contínua durante 6 horas, entre uma célula contendo solução de NaCl a 3% (polo negativo) e outra contendo solução de NaOH de concentração 0,3N (polo positivo), induzindo os íons Cl^- a migrarem do cátodo para

o ânodo através do concreto. Mede-se a corrente elétrica em função do tempo e integra-se essa corrente ou aplica-se a Equação 1 para se obter a carga total que atravessa o corpo de prova (em Coulombs).

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

Onde:

Q = Carga total passante (Coulombs)

I_0 = Corrente medida imediatamente após aplicação da tensão (Amperes)

I_t = Corrente medida em um tempo t a cada 30 minutos após aplicação da tensão (Amperes)

Esse valor é interpretado como um índice da condutividade elétrica do sistema poroso e, por extensão, como uma “indicação rápida” da capacidade do concreto de resistir à penetração de íons cloreto (Silva et al., 2015), permitindo classificar concretos em faixas conforme a Tabela 6.

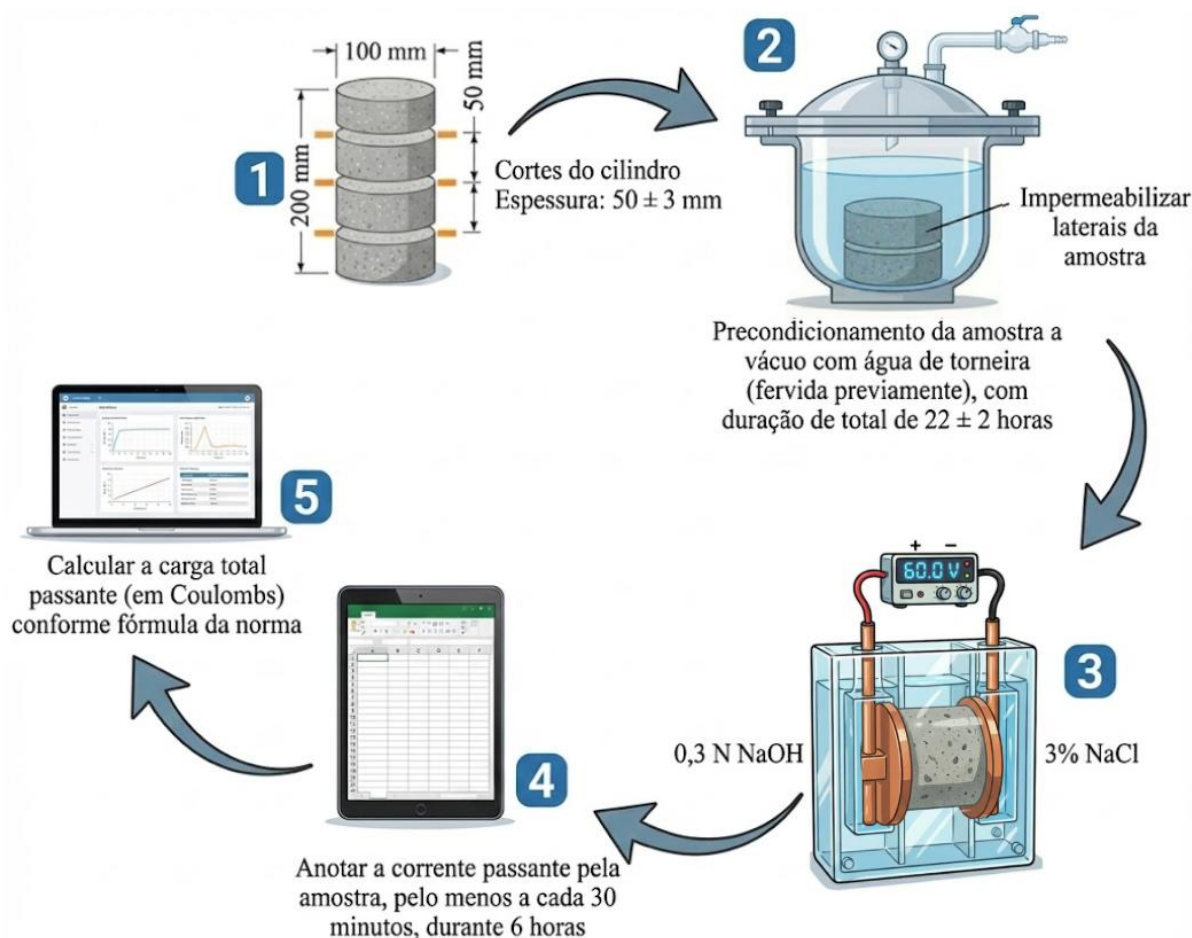
Tabela 6 - Faixas de penetrabilidade de Cl^- em relação à carga elétrica medida.

Total de Carga passante Q (Coulombs)	Penetrabilidade de íons cloretos
> 4000	Alta
2000 a 4000	Média/Moderada
1000 a 2000	Baixa
100 a 1000	Muito Baixa
< 100	Negligenciável

Fonte: ASTM C1202 (2025)

Do ponto de vista físico, o ensaio da norma ASTM C1202 mede a facilidade de passagem de corrente iônica através da solução de poros e da rede de poros interconectados. A corrente total transportada é fortemente influenciada pela condutividade do meio, relação água/cimento, temperatura e pela presença de MCS, portanto, quando esses fatores são controlados, o ensaio se mostra como um bom comparativo de interconectividade dos poros (Hasan; Allena; Gilbert, 2024; Julio-Betancourt; Hooton, 2004; Mousavinezhad; Nozari; Newton, 2025). A Figura 19 demonstra um resumo esquemático do ensaio RCPT.

Figura 19 – Esquema de ensaio proposto pela ASTM C1202.



Fonte: Adaptado de Cascudo, Lopes e Oliveira (2022)

O procedimento NT Build 492, por sua vez, foi desenvolvido com o objetivo de determinar um coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário (D_{nssm} em m^2/s), diretamente relacionado ao transporte de cloretos no material. No ensaio, discos de concreto ou argamassa também de 100mm de diâmetro por 50mm de espessura, são previamente saturados em solução de $Ca(OH)_2$, e submetidos a uma diferença de potencial entre uma solução de 10% NaCl e outra com 0,3N de NaOH. Inicialmente aplica-se uma tensão de 30V em corrente contínua, e baseado na corrente resultante, o tempo de duração e a tensão do teste serão estabelecidos de acordo com a Tabela 7 e a temperatura inicial é registrada.

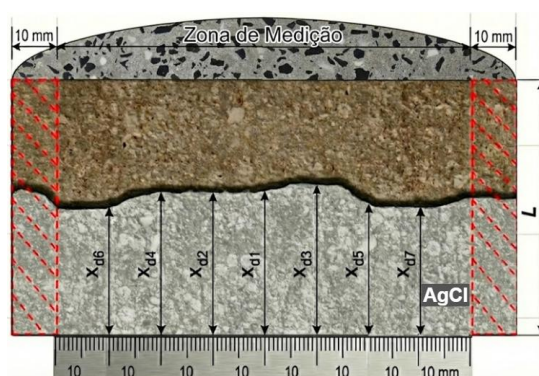
Tabela 7 – Tensão e duração do ensaio baseado na corrente inicial à 30 V.

Corrente inicial I_{30V} (mA)	Tensão a ser aplicada (V)	Possível nova Corrente I_0 (mA)	Tempo de Duração do ensaio (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: NT Build (1999)

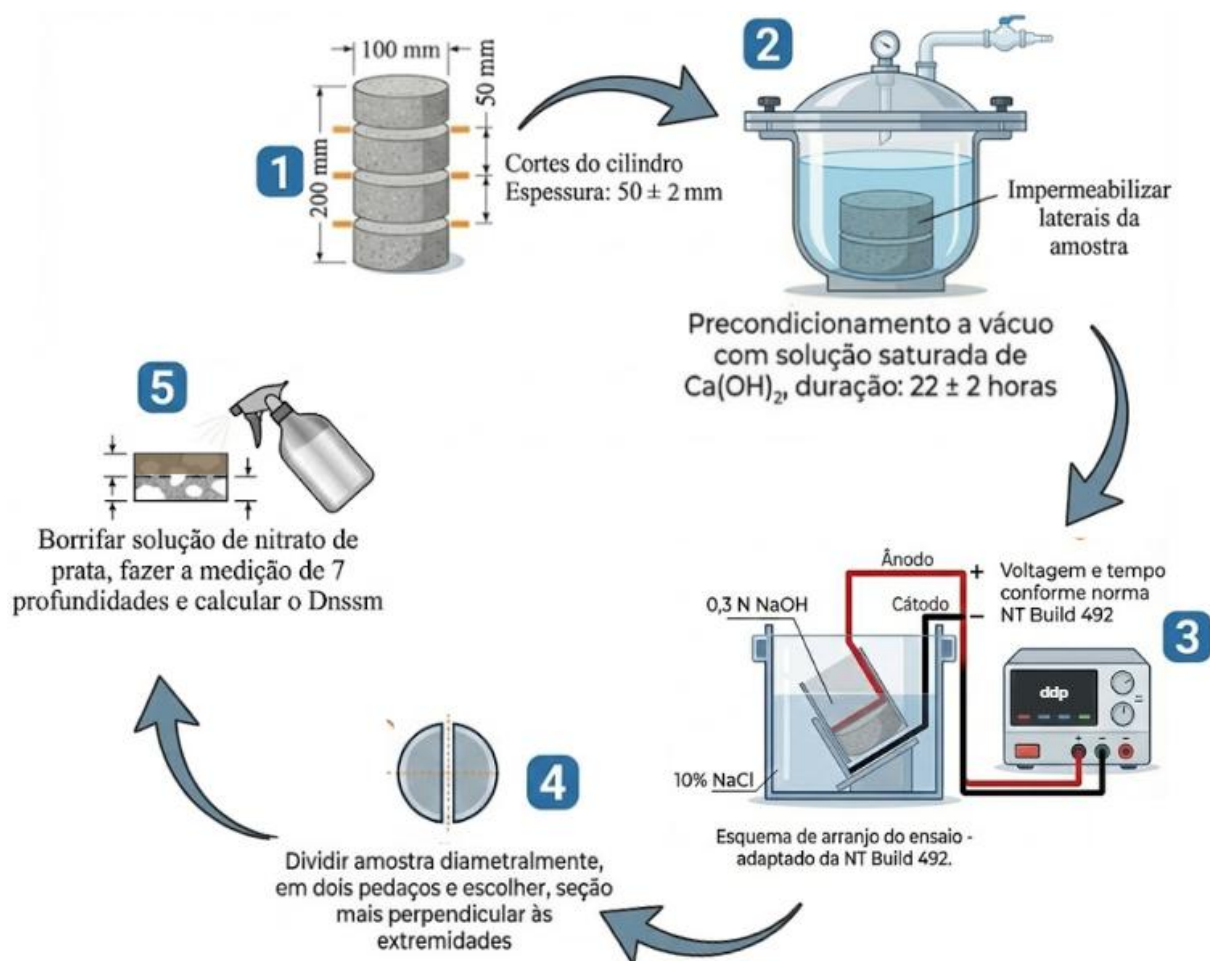
Ao final do período de migração definido para o ensaio, registra-se a temperatura final das soluções e os corpos de prova são rompidos diametralmente. Em seguida, aplica-se solução 0,1M de nitrato de prata (AgNO_3) nas faces internas, gerando coloração esbranquiçada nas regiões com cloretos (formação de AgCl) e amarronzada nas zonas isentas de cloretos (formação de óxidos de prata), a Figura 21 demonstra os passos abordados. Após alguns minutos, a frente de penetração é claramente visível, permitindo medir a profundidade de ingresso conforme a Figura 20 dos íons cloreto e calcular o valor médio que será utilizado na Equação 2 de determinação do Dnssm.

Figura 20 – Medidas de profundidade de penetração de íons cloretos.



Fonte: Adaptado de NT Build 492 (1999)

Figura 21 – Resumo do ensaio proposto pela NT Build 492.



Fonte: Adaptado de Cascudo, Lopes e Oliveira (2022)

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 (273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot \left(x_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T)L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad (2)$$

Onde:

D_{nssm} = Coeficiente de migração em estado não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

U = Valor absoluto da voltagem aplicada (V)

T = média das temperaturas inicial e final da solução anódica ($^{\circ}\text{C}$)

L = comprimento do corpo de prova (mm)

x_d = Valor médio das medidas individuais de profundidade de penetração dos cloretos (mm)

t = duração de ensaio (horas)

O coeficiente D_{nssm} pode também ser avaliado qualitativamente conforme a Tabela 8 abaixo:

Tabela 8 – Resistência à difusividade para o ensaio RCMT/NT Build 492 aos 28d.

$D_{nssm} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	Resistência a entrada de cloretos
> 15	Baixa
10 - 15	Moderada
5 - 10	Alta
2,5 – 5	Muito Alta
< 2,5	Extremamente Alta

Fonte: Nilsson, Ngo e Gjrv (1998) e Gjrv (2014)

2.5.5 Resistividade Elétrica

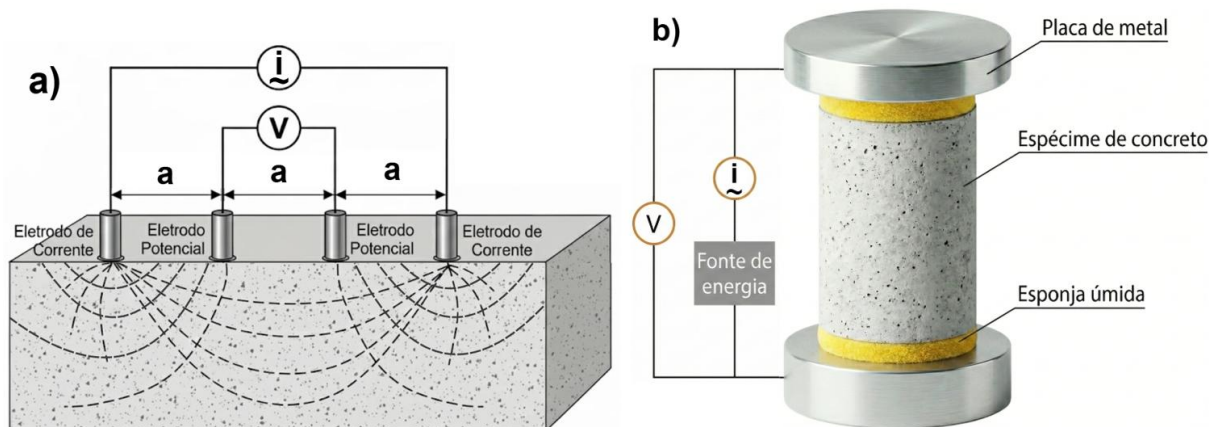
A resistividade elétrica (ρ), medida em $\Omega \cdot \text{m}$ ou $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$, é uma propriedade do concreto relacionada à facilidade de passagem de corrente elétrica, refletindo sua permeabilidade e a difusão de íons pelos poros, o que impacta diretamente a velocidade de corrosão das armaduras (Santos, 2006). Concretos com baixa resistividade facilitam o transporte de cargas entre regiões catódicas e anódicas, acelerando o processo corrosivo quando a armadura está despassivada (Ribeiro; Cunha, 2014), enquanto resistividades elevadas tendem a estar associadas a microestruturas mais densas, menor difusividade iônica e menores taxas de corrosão (Azarsa; Gupta, 2017; Hornbostel; Larsen; Geiker, 2013; Medeiros-Junior; Munhoz; Medeiros, 2019).

Essa resistividade depende, sobretudo, do teor de umidade, temperatura, da composição iônica da água, teor de adições minerais, reações pozolânicas e conseqüentemente da continuidade do sistema de poros (Araújo; Macioski; Medeiros, 2022; Ghosh; Tran, 2015; Gjrv, 2014; Polder, 2001). Em condição úmida, o concreto comum comporta-se como um eletrólito, com resistividades em torno de $100 \Omega \cdot \text{m}$, enquanto, quando seco ao ar, apresenta valores da ordem de $10 \Omega \cdot \text{m}$ (Neville, 2015; Whittington; McCarter; Forde, 1981).

Do ponto de vista experimental, a resistividade pode ser medida por métodos de superfície (sonda de Wenner de 4 pontos) ou volumétricos, em amostras cilíndricas

ou prismáticas, com procedimentos consolidados em recomendações da RILEM TC 154-EMC (RILEM, 2003) e em normas como a AASHTO T 358 (AASHTO, 2021), a Figura 22 representa os dois métodos apontados.

Figura 22 – Métodos de Leitura de Resistividade Elétrica: a) Método superficial; b) Método Volumétrico.



Fonte: Adaptado de Cosoli et al. (2020)

Para o superficial (Figura 22a), é utilizado quatro eletrodos alinhados e igualmente espaçados (a) apoiados na superfície do concreto (geralmente saturado). Segundo Polder (2001), aplica-se uma corrente alternada (i) através dos dois eletrodos externos e mede-se a queda de potencial (V) entre os dois eletrodos internos, a resistividade é então calculada a partir da razão V/i e do fator geométrico $2\pi a$ conforme a Equação 3:

$$\rho = 2 \pi a \frac{V}{i} \quad (3)$$

Já a resistividade volumétrica (Figura 22b), aplica-se uma corrente e mede-se a resistência elétrica (R) através do volume do corpo de prova (cilindro/prisma) também em condição saturada, aplicando com eletrodos (placas metálicas) nas faces opostas do espécime, tomando-se anteriormente a área da face (A) e a altura (L) do corpo de prova (Polder, 2001). A resistividade é obtida pela relação geométrica segundo a Equação 4:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (4)$$

Os resultados de resistividade podem ser interpretados a partir de faixas de avaliação que relacionam esse parâmetro à capacidade do concreto em resistir à penetração de cloretos, conforme pode ser visto na Tabela 9. As classes de

desempenho serão baseadas nos intervalos de resistividade superficial da AASHTO T 358 (AASHTO, 2021), convertidos para resistividade volumétrica segundo o fator geométrico proposto por Morris, Moreno e Sagüés (1996) e BS EN 1239019 (BSI, 2023), de modo a compatibilizar esses valores com as categorias usuais de “permeabilidade a cloretos” da ASTM C1202, compatibilização essa proposta pelo Louisiana Department of Transportation and Development DOTD TR-233 (DOTD, 2011) e Rupnow e Icenogle (2012).

Tabela 9 – Parâmetros de resistividade elétrica do concreto.

Permeabilidade de íons Cloretos	Resistividade Superficial em cilindros Ø100x200 em sondas a=38mm (kΩ.cm)	Resistividade Volumétrica (kΩ.cm)	ASTM C1202 (Coulombs)
Alta	< 12	< 6,2	>4000
Moderada	12-21	6,2 – 11	2000 – 4000
Baixa	21-37	11 – 19	1000 - 2000
Muito Baixa	37-254	19 – 132	100 – 1000
Negligenciável	>254	>132	<100
Notas:	Proposto por: AASHTO T 358	Conversão: superficial (a=38mm) para volumétrica (x0,52), proposta por Morris et al (1996) e BS EN 12390-19	DOTD TR-233, Rupnow e Icenogle (2012) e ASTM C1202

Fonte: Autor

3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

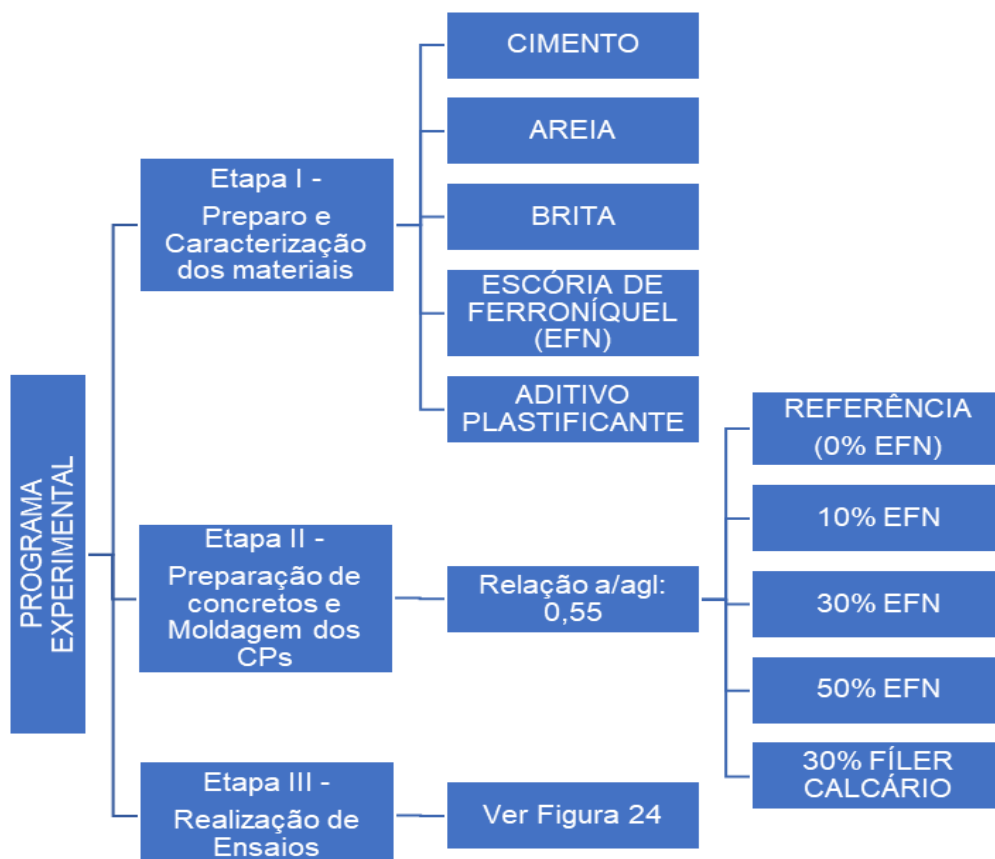
3.1 Introdução

Este capítulo apresenta, de forma integrada, a metodologia utilizada na pesquisa que avalia a escória de ferroníquel como material cimentício suplementar. São descritas as etapas de seleção e caracterização dos materiais, definição e dosagem das composições, planejamento e execução dos ensaios, bem como o tratamento dos dados e a análise estatística dos resultados.

3.2 Programa Experimental

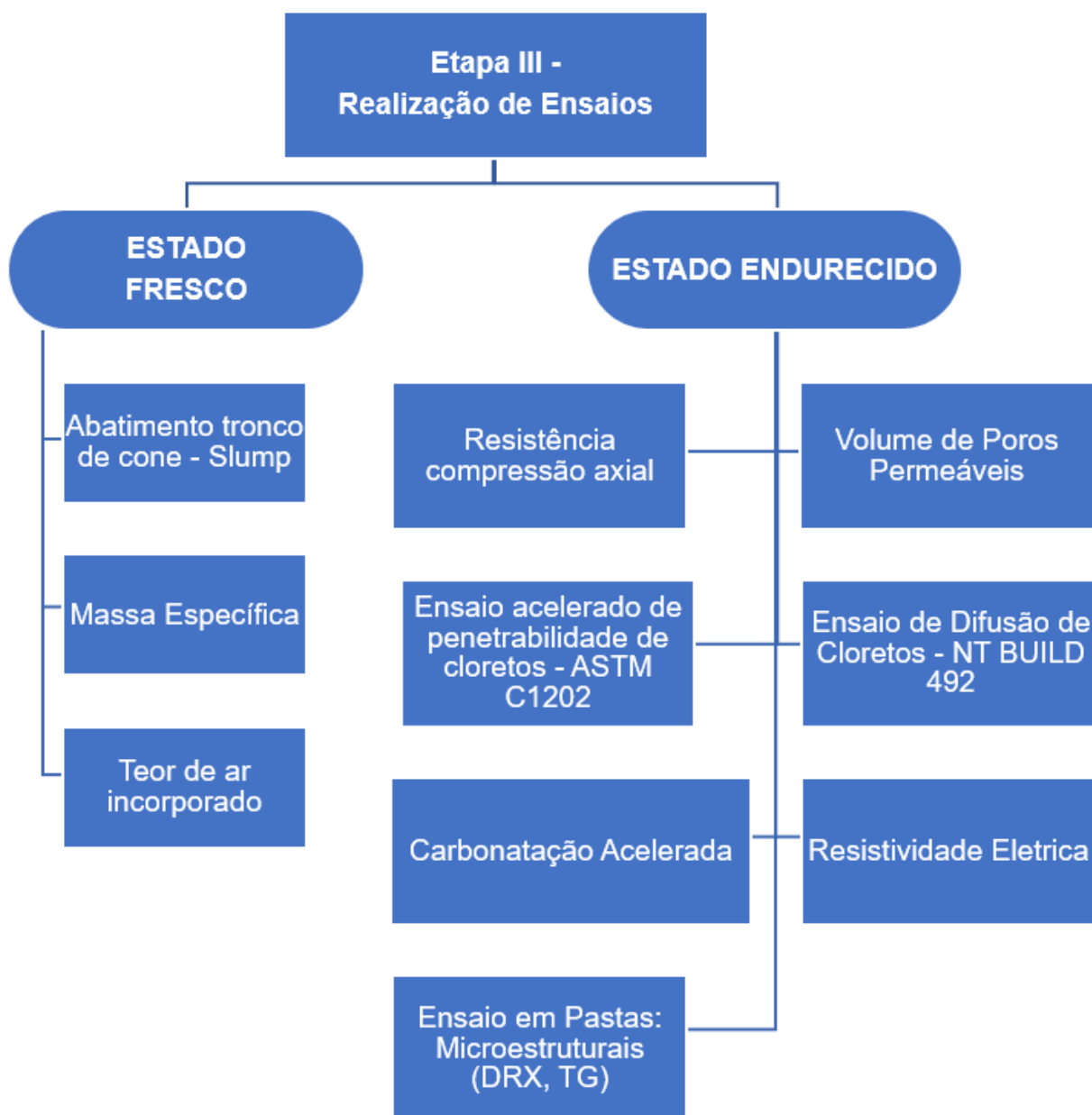
O programa experimental foi dividido em três etapas, a saber: preparo e caracterização dos materiais, dosagem dos concretos e moldagem dos corpos de prova e realização de ensaios no estado fresco e endurecido. A Figura 23 mostra o fluxograma do programa experimental, enquanto a Figura 24 apresenta o detalhamento dos ensaios da Etapa III.

Figura 23 – Fluxograma do Programa Experimental.



Fonte: Autor

Figura 24 – Fluxograma para detalhe da Etapa III.



Fonte: Autor

A primeira etapa consiste na apresentação e caracterização dos materiais, os quais serão submetidos a ensaios de caracterização físicos, químicos, microestruturais e mineralógicos.

Na segunda etapa ocorre a dosagem dos concretos e pastas. Primeiramente foi realizada uma dosagem preliminar para determinar a composição (traço) que foi utilizada e, em seguida, moldagem dos corpos de prova necessários para realização dos ensaios.

Com as composições definidas, a terceira etapa foi propriamente a avaliação do comportamento dos concretos e pastas. No estado fresco, observou-se o que se refere a consistência. Já no estado endurecido, como objetivo principal deste trabalho é o estudo da durabilidade, submeteu-se os corpos de prova a ensaios de resistência à compressão, ensaios acelerados de penetração dos agentes agressores e ensaios microestruturais.

Os ensaios foram realizados nas idades de 28, 56 e 91 dias. Idades mais avançadas de 56 e 91 dias se justificam pelo fato de a EFN ser considerada uma adição mineral com reatividade mais lenta que a do cimento Portland. Portanto, nas idades propostas, a EFN teve condições de reagir significativamente para verificar sua possível contribuição na matriz cimentícia.

Em todas as composições, estabeleceu-se uma relação água/aglomerante (a/agl) fixa de 0,55. Segundo Sánchez-Mendieta, Galán-Díaz e Martínez-Lage (2024), essa escolha promove uma microestrutura mais porosa na matriz cimentícia, facilitando a avaliação dos efeitos dos agentes agressivos nos concretos. Ademais, houve a aplicação de um aditivo plastificante em teor 0,5%.

Para avaliar a durabilidade foram avaliadas cinco composições de concreto, mantendo os agregados constantes e variando apenas os teores dos aglomerantes: Referência (100% cimento CPV-ARI), 10%, 30% e 50% de EFN moída em substituição parcial ao cimento, além de uma composição com 30% de fíler calcário a fim de comparação da ação pozolânica e reativa do material, em que as substituições ocorrerão em massa. Para as pastas, foram seguidos os mesmos teores de substituição dos aglomerantes.

3.3 Planejamento Experimental

Este estudo visa analisar o comportamento de concretos com diferentes teores de EFN, definindo previamente os ensaios, dados a serem coletados, número de corpos de prova e idades de avaliação, de modo a identificar variáveis experimentais que terão efeito sobre os resultados dos testes no desenvolvimento da pesquisa.

3.3.1 Variáveis da Pesquisa

As variáveis da pesquisa se dividem em três tipos: Dependentes, Independentes e Parâmetros Fixados. A primeira, também conhecida como variáveis de resposta, se referem àquelas que se deseja avaliar sob a ótica das alterações provocadas pelas variáveis Independentes, uma vez que estas são definidas intencionalmente. Já as de controle, não são avaliadas no estudo, porém têm influência nas outras variáveis, devendo ser controladas. Abaixo, segue a determinação de cada uma.

a) Variáveis Dependentes:

- Carga Total Passante
- Resistência à compressão axial;
- Coeficiente de migração em estado não estacionário;
- Profundidade de penetração de cloretos;
- Profundidade de penetração de carbonatação;
- Volume de Poros Permeáveis;
- Fases formadas (Difração de Raios X).

b) Variáveis Independentes:

- Teor de Incorporação de EFN (0%, 10%, 30% e 50%);
- Tipo de adição (30% para fíler calcário);
- Idade do ensaio.

c) Parâmetros Fixados:

- Materiais utilizados – características físicas e químicas constantes;
- Relação a/agl (0,55);

- Tensão aplicada nos ensaios de cloretos;
- Teor de CO₂ / Umidade Relativa / Temperatura do ensaio de carbonatação;
- Moagem;
- Metodologia de mistura e cura dos corpos de prova.

3.3.2 Nomenclatura das Misturas

De acordo com o Programa Experimental, foram realizadas 05 misturas para a relação água/aglomerante de 0,55. A fim de organização e controle, foi necessário criar uma nomenclatura lógica para identificação, como apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Nomenclatura das Misturas.

Nomenclatura	a/agl	CPV (%)	EFN (%)	Fíler Calcário (%)
REF	0,55	100%	-	-
EFN10		90%	10%	-
EFN30		70%	30%	-
EFN50		50%	50%	-
FIL30		70%	-	30%

Fonte: Autor

3.3.3 Quantificação de Corpos de Prova e Apresentação dos ensaios realizados

A Tabela 11 apresenta, de forma consolidada para cada mistura, o planejamento experimental do estudo, indicando quais ensaios foram realizados, quantos corpos de prova (CPs) foram moldados e em quais idades ocorreram as avaliações, permitindo visualizar a distribuição das amostras ao longo do programa e assegurar consistência e reprodutibilidade na comparação entre as composições.

Tabela 11 – Quantificação de CPs por ensaio e por composição.

Ensaio	Idades (dias)	Tipo do CP	Dimensão do CP do ensaio	Quant.	Quantidade CPs Ø10x20cm	Quant. Total CPs
Resistência a compressão	28	Cilíndrico	Ø10x20cm	4	4	12 Cilíndricos Ø10x20cm
	56	Cilíndrico	Ø10x20cm	4	4	
	91	Cilíndrico	Ø10x20cm	4	4	
ASTM C1202	28	Cilíndrico	Ø10x5cm	4	2	6 Cilíndricos Ø10x20cm
	56	Cilíndrico	Ø10x5cm	4	2	
	91	Cilíndrico	Ø10x5cm	4	2	
NT Build 492	28	Cilíndrico	Ø10x5cm	4	2	6 Cilíndricos Ø10x20cm
	56	Cilíndrico	Ø10x5cm	4	2	
	91	Cilíndrico	Ø10x5cm	4	2	
Volume de Poros Permeáveis	28	Cilíndrico	Ø10x20cm	2	2	6 Cilíndricos Ø10x20cm
	56	Cilíndrico	Ø10x20cm	2	2	
	91	Cilíndrico	Ø10x20cm	2	2	
Carbonatação Acelerada	0 (zero)*	Prismático	10x10x10cm	3	-	12 Prismáticos 10x10x10cm
	28	Prismático	10x10x10cm	3	-	
	56	Prismático	10x10x10cm	3	-	
	91	Prismático	10x10x10cm	3	-	
Resistividade Elétrica Superficial	28	Cilíndrico	Ø10x20cm	3	-	-
	56	Cilíndrico	Ø10x20cm	3	-	
	91	Cilíndrico	Ø10x20cm	3	-	
Resistividade Elétrica Volumétrica	28	Cilíndrico	Ø10x20cm	3	-	-
	56	Cilíndrico	Ø10x20cm	3	-	
	91	Cilíndrico	Ø10x20cm	3	-	
Total de CPs cilíndricos Ø10x20 cm						30 un
Total CPs Prismáticos 10x10x10 cm						12 un
Volume aproximado de concreto: 59,1 litros por composição						
Volume adotado com respaldo para sobra: 72,0 litros por composição						

* Foram utilizados como controle de andamento do ensaio

Fonte: Autor

É importante destacar algumas observações para melhor compreensão da Tabela 11. Os ensaios da ASTM C1202 e NT Build 492 têm seus corpos de prova feitos a partir do corte de CPs cilíndricos de Ø10x20cm em cilindros menores de altura 5cm. Por fim, pelos ensaios de resistividade elétrica não serem destrutivos, foi possível utilizar o mesmo corpo de prova utilizado no ensaio de Resistência à Compressão antes deste ser realizado.

Em função do elevado número de corpos de prova por composição, foram moldados sete corpos de prova Ø10x20 cm a mais com o concreto excedente, para caso fosse necessário por algum motivo alheio aos testes, tais como de falhas de moldagem, perda de corpo de prova, ou mesmo para serem utilizados em futuras pesquisas de ensaios indefinidamente tardios.

Portanto para cada composição foram moldados trinta e sete corpos de prova cilíndricos (Ø10x20)cm e doze corpos de prova prismáticos (10x10x10)cm, resumidos na Tabela 12.

Tabela 12 – Quantitativo total de CPs.

Composição	Quant. CPs Ø10x20 cm	CPs Ø10x20 cm EXTRAS	Quant. CPs 10x10x10cm
REF	30	7	12
EFN10	30	7	12
EFN30	30	7	12
EFN50	30	7	12
FIL30	30	7	12
TOTAL	150	35	60
	185		

Fonte: Autor

3.3.4 Dosagem e quantidade de material

A dosagem dos concretos foi definida a partir de traços piloto/preliminares, com base na experiência antecedente do grupo de estudo com EFN, ajustando-se iterativamente as proporções dos materiais com base na trabalhabilidade, umidade do concreto fresco (H) e teor de argamassa seca (α) de 52%. O critério de trabalhabilidade adotado foi o abatimento de tronco de cone em 100 ± 20 mm, buscando uma consistência compatível com concretos comercialmente utilizados.

Além disso, as composições foram calibradas com traços pilotos para manter estabilidade no estado fresco e compatibilizadas com o aditivo químico plastificante, evitando exsudação e segregação, garantindo coesão e homogeneidade da mistura.

Por conseguinte, a substituição parcial do cimento pela escória ocorreu em relação à massa. A Tabela 13 mostra as composições adotadas.

Tabela 13 – Proporções de mistura das séries do experimento.

Nomenclatura	Cimento	EFN	Fíler	Areia	Brita	a/agl	Aditivo	Consumo de cimento/m ³
REF	1	0	0	2,67	3,38	0,55	0,005	325,21
EFN10	0,9	0,1	0	2,67	3,38	0,55	0,005	292,69
EFN30	0,7	0,3	0	2,67	3,38	0,55	0,005	227,65
EFN50	0,5	0,5	0	2,67	3,38	0,55	0,005	162,61
FIL30	0,7	0	0,3	2,67	3,38	0,55	0,005	227,65

Fonte: Autor

Assim foi possível o cálculo do consumo de materiais, a partir também do quantitativo de corpos de prova já levantados. A Tabela 14 exhibe o resultado já com o acréscimo de 22% totalizando 72 litros de concreto.

Tabela 14 – Consumo de materiais – 72 litros.

Nomenclatura	Cimento	EFN	Fíler Calcário	Areia	Brita	Água	Aditivo
REF	23,42	0,00	0,00	62,52	79,14	12,88	117,08
EFN10	21,07	2,34	0,00	62,52	79,14	12,88	117,08
EFN30	16,39	7,02	0,00	62,52	79,14	12,88	117,08
EFN50	11,71	11,71	0,00	62,52	79,14	12,88	117,08
FIL30	16,36	0,00	7,02	62,52	79,14	12,88	117,08
TOTAL	88,98	21,07	7,02	312,60	395,72	64,39	585,40
	Kg de cimento	Kg de EFN	Kg de Fíler	Kg de Areia	Kg de Brita	Kg de água	gramas de aditivo

Fonte: Autor

Devido às limitações do laboratório como a quantidade de moldes e de datas coincidentes dos ensaios, o volume total de 72L de concreto por composição foi fracionado em duas bateladas de 36L exibido na Tabela 15, mantendo-se o procedimento e condições de mistura para garantir homogeneidade e controle da consistência.

Tabela 15 - Consumo de materiais com acréscimo para 36L.

NOMENCLATURA	Cimento	EFN	Fíler Calcário	Areia	Brita	Água	Aditivo
REF	11,71	0,00	0,00	31,26	39,57	6,44	58,54
EFN10	10,54	1,17	0,00	31,26	39,57	6,44	58,54
EFN30	8,20	3,51	0,00	31,26	39,57	6,44	58,54
EFN50	5,85	5,85	0,00	31,26	39,57	6,44	58,54
FIL30	8,20	0,00	3,51	31,26	39,57	6,44	58,54
TOTAL	44,49	10,54	3,51	156,30	197,86	32,20	292,70
	Kg de cimento	Kg de EFN	Kg de Fíler	Kg de Areia	Kg de Brita	Kg de água	gramas de aditivo

Fonte: Autor

Assim, a moldagem dos corpos de prova ocorreu em 4 Etapas (contabilizadas em dias corridos), garantindo que os mesmos corpos de provas dos ensaios sejam realizados na mesma betonada de origem. A Tabela 16 demonstra um cronograma figurativo das etapas listadas abaixo:

Etapa I. Dia 01: 36L de concreto para REF e FIL-30 (Concretos A1)

Etapa II. Dia 03: 36L de concreto para: EFN-10, EFN-30, EFN-50 (Concretos B1)

Etapa III. Dia 15: 36L de concreto para REF e FIL-30 (Concretos A2)

Etapa IV. Dia 17: 36L de concreto para: EFN-10, EFN-30, EFN-50 (Concretos B2)

Tabela 16 – Simulação de cronograma de moldagens.

Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
		01 ETAPA I: 36L: REF e FIL30 (Concretos A1)	02	03 ETAPA II: 36L: EFN10, EFN30, EFN50 (Concretos B1)	04	05
06	07	08	09	10	11	12
13	14	15 ETAPA III: 36L: REF e FIL30 (Concretos A2)	16	17 ETAPA VI: 36L: EFN10, EFN30, EFN50 (Concretos B2)	18	19

Fonte: Autor

Para os ensaios de 36L-Concretos A1/B1 estão contemplados: Resistência a Compressão, ASTM C1202, Resistividades elétrica Superficial e Volumétrica. Já as betonadas de 36L-Concretos A2/B2 são para os ensaios de: Carbonatação acelerada, NT Build 492 e Volume de Poros Permeáveis, ilustrados na Tabela 17.

Tabela 17 – Descrição de betonadas e ensaios.

Betonada	A1	B1	A2	B2
Volume	36L	36L	36L	36L
Composição	REF e FIL30	EFN10, EFN30, EFN50	REF e FIL30	EFN10, EFN30, EFN50
Ensaio	- Resist. Comp. - ASTM C1202 - Resist. Elétrica	- Resist. Comp. - ASTM C1202 - Resist. Elétrica	- Carbonatação - NT Build 492 - Vol. Poros Perm	- Carbonatação - NT Build 492 - Vol. Poros Perm
CPs Excedentes	4	4	3	3

Fonte: Autor

O processo de mistura dos concretos se iniciou um dia antes da confecção do concreto, pesando e deixando os materiais já prontos para a utilização. Esse processo também é importante pois permite que os materiais equilibrem a temperatura com o ambiente.

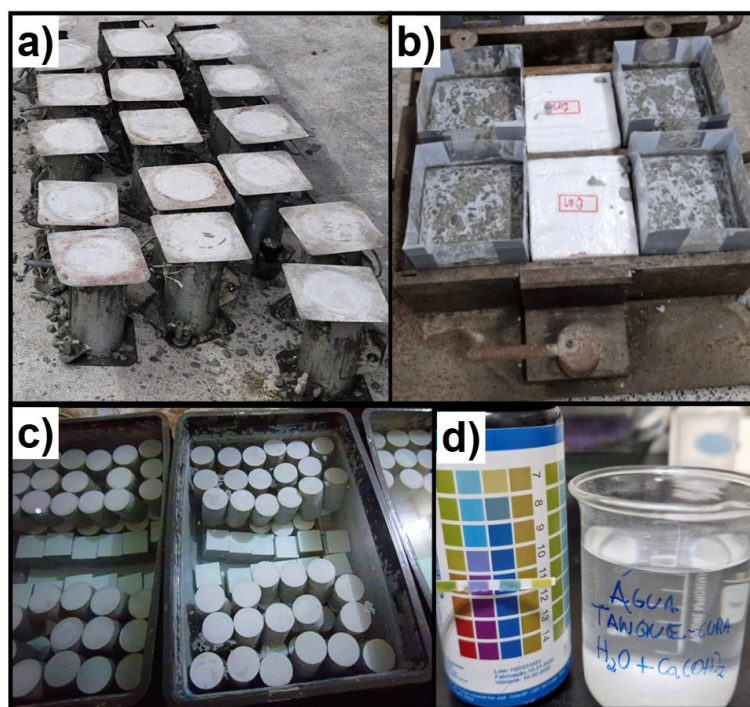
As etapas de mistura para a produção dos concretos foram padronizadas a fim de que fosse possível a comparação entre os resultados obtidos em cada traço, utilizando uma Betoneira 120L PRIME Menegotti, o protocolo adaptado adotado foi:

- I. Adicionar toda a brita e 80% da água na betoneira de queda livre, deixando girar por trinta segundos;
- II. Acrescentar os devidos aglomerantes e misturar por três minutos;
- III. Inserir todo o aditivo por sessenta segundos de rotação;
- IV. Incluir a areia e o restante da água. Deixar a betoneira girando por dois minutos, observando o aspecto visual da mistura, seguido por uma pausa de três minutos;
- V. Encerra o processo com mais cinco minutos de mistura e realização do ensaio de abatimento de tronco de cone e massa específica;

Concluídas as etapas anteriores, procedeu-se com o abatimento de tronco de cone e à moldagem dos corpos de prova cilíndricos e cúbicos, seguindo as diretrizes de camadas e golpes estabelecidas pela NBR 5738 (ABNT, 2015). Decorridas 24 h a

partir do início do procedimento de moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e, em seguida, transferidos para a câmara úmida. Nessa etapa de cura, permaneceram submersos em tanques contendo água saturada com cal, condição adotada para manter o meio de cura em pH alcalino, com disponibilidade de íons cálcio, assegurando a continuidade do processo de hidratação. Os corpos de prova foram mantidos nessas condições até o atingirem das idades previstas para os ensaios no estado endurecido. A Figura 25 demonstra as etapas iniciais da cura submersa.

Figura 25 – Elaboração dos concretos: a)CPs Cilíndricos moldados; b)CPs Cúbicos moldados; c)CPs em tanque de cura submersa; d)Controle de pH da água do tanque (pH aprox. 10).



Fonte: Autor

Também foram preparadas pastas cimentícias com o objetivo de avaliar isoladamente o comportamento microestrutural dos aglomerantes e a evolução de suas fases, minimizando a influência dos agregados de concretos.

Essas pastas seguiram os mesmos teores de aglomerantes dos concretos, mantendo a coerência entre as composições estudadas e permitindo comparação direta entre os sistemas de concreto. Adicionalmente a mistura das pastas, foi inserido Fíler Quartzo (FQ) em teor fixo de 0,5 para agir tanto como padrão interno e evitar a exsudação das pastas, quanto por possuir uma estrutura cristalina estável, de picos intensos e bem definidos em difratograma de DRX, além de quimicamente inerte,

permitindo quantificar as fases pelo método de Rietveld (Rietveld, 2014; Zhao et al., 2017). A Tabela 18 apresenta, a nomenclatura utilizada e a composição unitária das pastas.

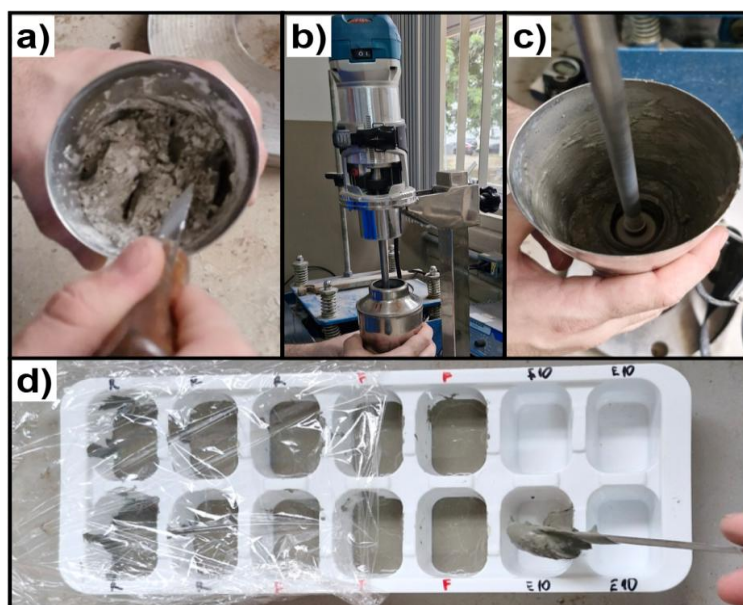
Tabela 18 - Composições adotadas para pastas.

Nomenclatura	Cimento	EFN	Fíler Calcário	Fíler Quartzo	Água
P-REF	1	0	0	0,5	0,55
P-EFN10	0,9	0,1	0	0,5	0,55
P-EFN30	0,7	0,3	0	0,5	0,55
P-EFN50	0,5	0,5	0	0,5	0,55
P-FIL30	0,7	0	0,3	0,5	0,55

Fonte: Autor

A Figura 26 ilustra a produção das pastas, as quais foram elaboradas em lotes de 106 ml, iniciando com a mistura manual a seco dos materiais em pó. Em seguida, adicionou-se água destilada e realizou-se nova homogeneização manual por 1 minuto, seguida de 2 minutos em misturador mecânico de alta rotação (10.000 rpm). A pasta fresca foi moldada com espessura aproximada de 5 mm em moldes plásticos. Após 24 horas, as amostras foram desmoldadas e submetidas à cura submersa em solução saturada de cal, seguindo o mesmo protocolo adotado para os corpos de prova de concreto, até as idades de ensaio estabelecidas.

Figura 26 – Elaboração das pastas: a)Homogeneização manual; b)Mistura em misturador mecânico; c)Detalhe da pasta misturada; d)Moldes das Pastas



Fonte: Autor

3.4 Materiais e Métodos de Caracterização

Neste tópico, serão descritos os materiais que foram utilizados nessa pesquisa, assim como os ensaios de caracterizações realizados.

3.4.1 Materiais Aglomerantes

Na sequência, são apresentados os materiais aglomerantes em pó utilizados na pesquisa (cimento Portland, escória de ferroníquel, fíler calcário e fíler quartzo), com identificação, procedência de beneficiamento e características relevantes ao desempenho das matrizes cimentícias, a Figura 27 ilustra os materiais.

Figura 27 – Amostras dos Materiais aglomerantes utilizados.



Fonte: Autor

3.4.1.1 Cimento

Foi utilizado como aglomerante de referência o Cimento Portland CP-V ARI, pois ele possui um dos menores teores de adições entre os cimentos disponíveis no mercado, devendo apresentar entre 0 a 10% de material carbonático e o restante composto por clínquer e sulfato de cálcio de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018a). Portanto, a escolha do CP-V ARI permitiu analisar o efeito da incorporação da EFN nos concretos sem comprometer os resultados devido a ação de outros tipos de adições, diminuindo as variáveis da pesquisa.

O cimento foi doado pela empresa Mizu Cimentos, logo ao ser recebido, o cimento foi fracionado, estocado na câmara seca e ensacado em sacos plásticos de 10 kg envolto em plástico filme com o indicador de umidade de sílica gel. Isso se deu ao cuidado de evitar a absorção de umidade e endurecimento antecipado indevido, preservando as características até o momento de seu uso, conforme pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 – Armazenamento do Cimento: a) Fracionamento com indicador de umidade; b) Sacos fracionados em Câmara seca.



Fonte: Autor

3.4.1.2 EFN

O insumo central do estudo foi a escória de ferroníquel recebida *in natura* na forma de partículas granulares com aspecto semelhante ao de areia grossa, cuja granulometria e distribuição de tamanhos não permitiam seu uso direto como adição ao ligante. Por essa razão, foi necessária a moagem em moinho de bolas para reduzir e adequar o tamanho das partículas, elevar a área específica e alcançar uma finura compatível, viabilizando sua aplicação como MCS e permitindo avaliar, com base nos ensaios e na interpretação estatística, seu potencial uso técnico em matrizes cimentícias.

A EFN foi fornecida pela mineradora Anglo American, oriunda da planta industrial localizada em Barro Alto-GO e seu depósito pode ser visto na Figura 29. Sua origem se dá na etapa de fusão em forno a arco elétrico (RKEF), associada ao processamento pirometalúrgico do minério de níquel, e posteriormente resfriado por jatos de água. Esse método de resfriamento tem papel relevante na definição de suas características mineralógicas, químicas e físicas, as quais também foram objeto de estudo neste trabalho.

Figura 29 – Depósito de Escória de ferroníquel em Barro Alto-GO.



Fonte: Autor

O lote de EFN, coletado diretamente dos pátios de depósito após o resfriamento, apresenta aspecto granular, visualmente semelhante a uma areia grossa de coloração verde-escura.

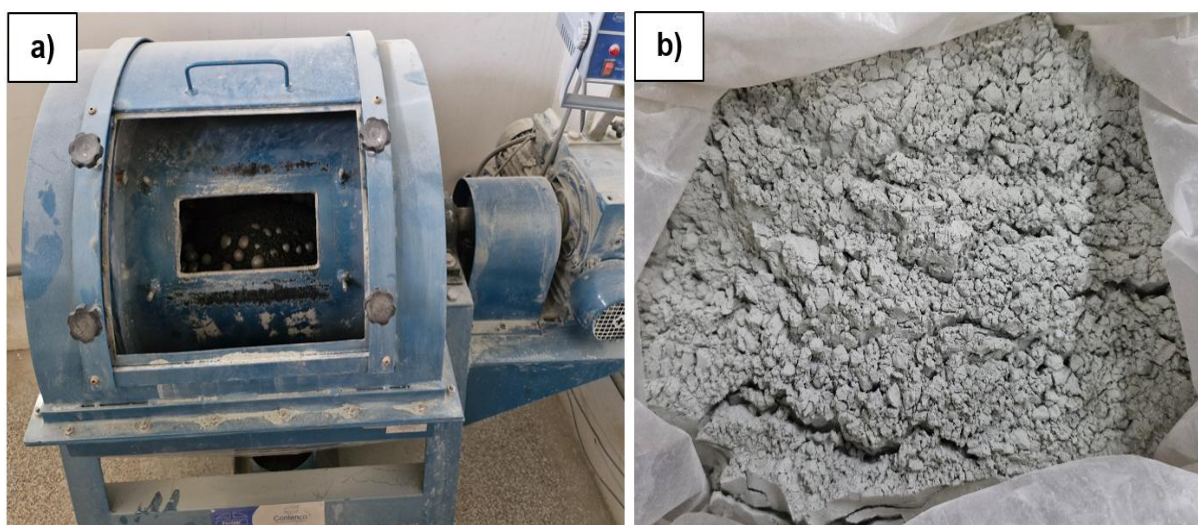
Entretanto, sua distribuição de tamanhos e granulometria não permitiam o uso direto como adição ao ligante, tornando necessário um processo de beneficiamento para adequação às condições de emprego como MCS.

Para as devidas caracterizações e beneficiamento foi coletado uma amostra de 60 kg da EFN granulada. Inicialmente, o material foi submetido à secagem em estufa a 105 °C por 72h, com o objetivo de remover a umidade. Em seguida, após resfriamento ambiente, foi acondicionado em sacos plásticos e armazenado em

câmara seca até o início do beneficiamento, minimizando variações relacionadas ao teor de água durante o manuseio e a moagem.

Pela EFN ser granular in natura, foi necessária a moagem para reduzir o tamanho das partículas e obter uma distribuição granulométrica e finura compatível com o cimento CP V-ARI, elevando a área específica, favorecendo a sua reatividade e viabilizando sua aplicação como MCS (Andersson et al., 2023; Sun et al., 2022) . O beneficiamento foi realizado em moinho de bolas, alimentado com 10 kg de EFN e 65,5 kg de carga abrasiva composta por esferas de aço. Com base em resultados de estudos piloto do grupo de pesquisa em EFN, adotou-se o tempo de 10h de moagem nas condições descritas. Após a redução de tamanho, a escória moída foi peneirada em malha de 75 μm e armazenada em sacos de plástico de 10kg de material. As etapas são apreciadas pela Figura 30.

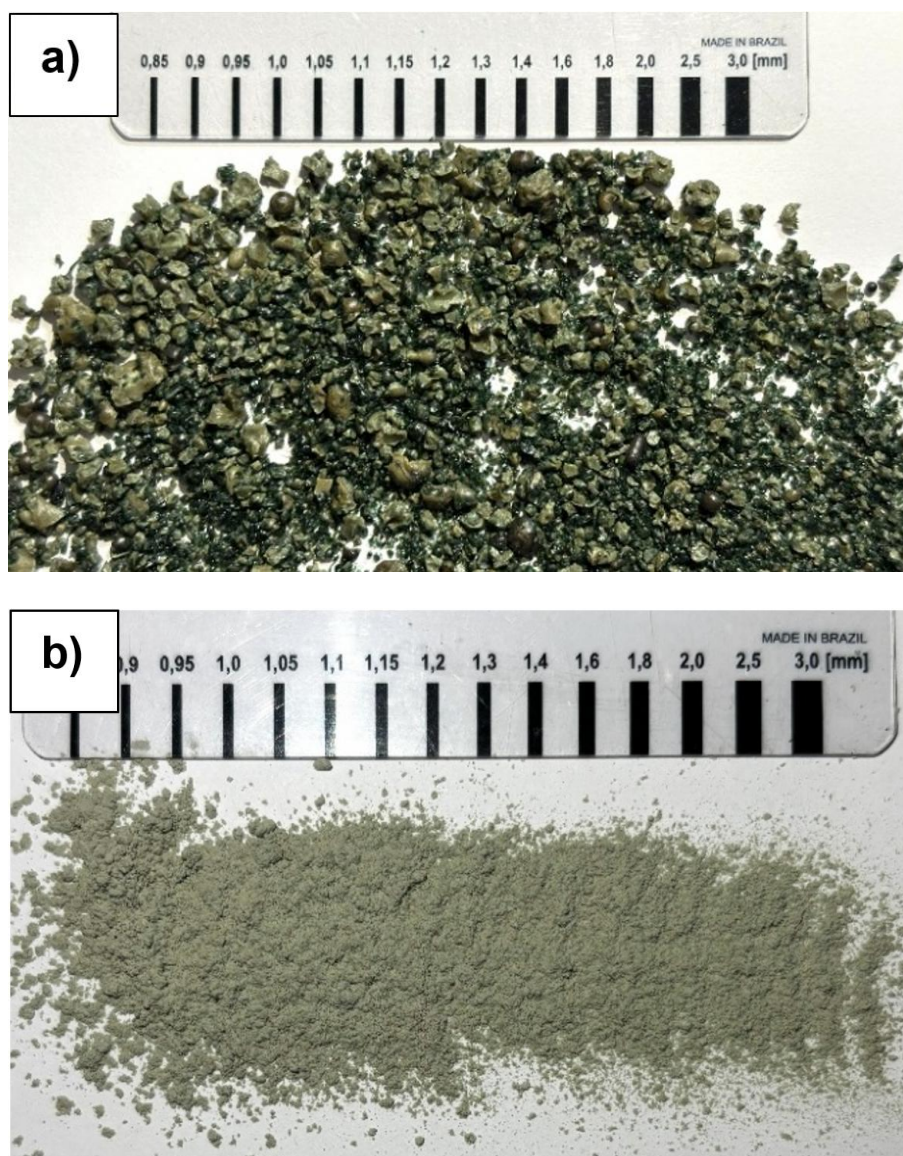
Figura 30 – Processo de beneficiamento: a)Moinho de bolas; b)EFN moída ensacada.



Fonte: Autor

Com a EFN beneficiada, foi possível prosseguir com os ensaios de caracterização física e química, os quais subsidiaram as análises subsequentes do comportamento dos concretos contendo EFN moída como material cimentício suplementar. Na Figura 31 é possível ver em escala a diferença dos materiais antes e depois do beneficiamento.

Figura 31 – Escória de ferroníquel: a) Granulada *in natura*; b) Beneficiada.

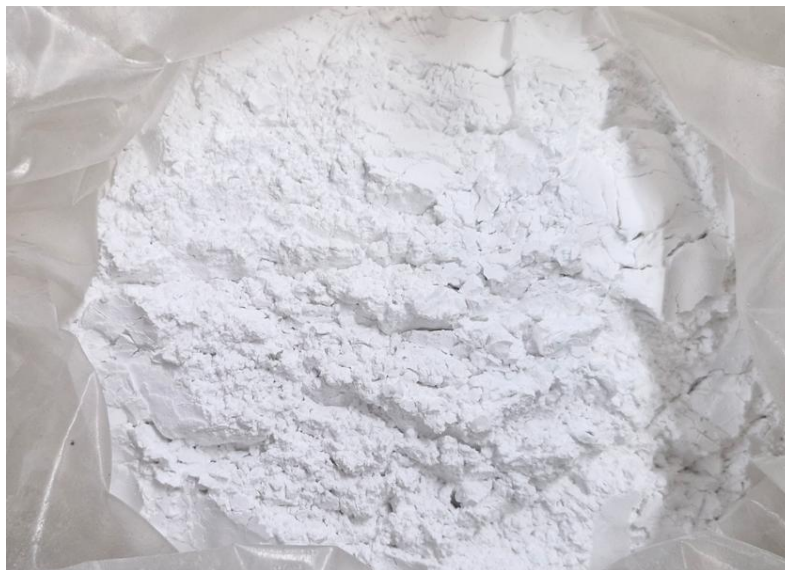


Fonte: Autor

3.4.1.3 Fíler Calcário

O fíler calcário empregado nesta pesquisa foi doado pela empresa MIZU, de forma análoga ao fornecimento do cimento, e disponibilizado já na condição de uso industrial, isto é, previamente moído e com finura compatível com aquela praticada pela indústria cimenteira conforme ilustrado na Figura 32. Em razão disso, o material foi utilizado tal como recebido, não sendo necessária a realização de procedimentos adicionais de beneficiamento, sendo apenas estocado em câmara seca.

Figura 32 – Fíler Calcário em armazenamento.



Fonte: Autor

3.4.1.4 Fíler Quartzo

O fíler de quartzo ou pó de quartzo puro utilizado nesta pesquisa foi adquirido diretamente de um fornecedor industrial, já na forma micronizada e pronto para uso. O material foi fornecido com granulometria controlada, correspondente à fração passante em peneira de malha Tyler-Mesh 1000, equivalente a abertura aproximada de $\#13\mu\text{m}$, dispensando também procedimentos adicionais de moagem e beneficiamento em laboratório.

3.4.1.5 Caracterizações dos aglomerantes

Os próximos parágrafos tratam das caracterizações físicas e microestruturais realizadas em todos os aglomerantes utilizados neste estudo. As análises feitas permitem descrever suas principais propriedades e servem de base para discutir o desempenho das composições ao longo do programa experimental.

3.4.1.5.1 Massa Específica e Granulometria a Laser

A determinação da massa específica dos materiais em pó foi realizada seguindo o procedimento descrito na NBR 16605 (ABNT, 2017), que estabelece o

método do frasco de Le Chatelier para a avaliação da massa específica do cimento Portland e de outros materiais pulverulentos representado na Figura 33. De acordo com essa norma, o ensaio baseia-se no princípio do deslocamento de volume, no qual uma massa conhecida do material é introduzida no frasco contendo querosene, registrando-se a variação volumétrica indicada na graduação do equipamento, estabilizado em banho termorregulador. A partir do volume deslocado e da massa do material ensaiado, calcula-se a massa específica, garantindo padronização do procedimento e comparabilidade dos resultados para os diferentes aglomerantes analisados nesta pesquisa.

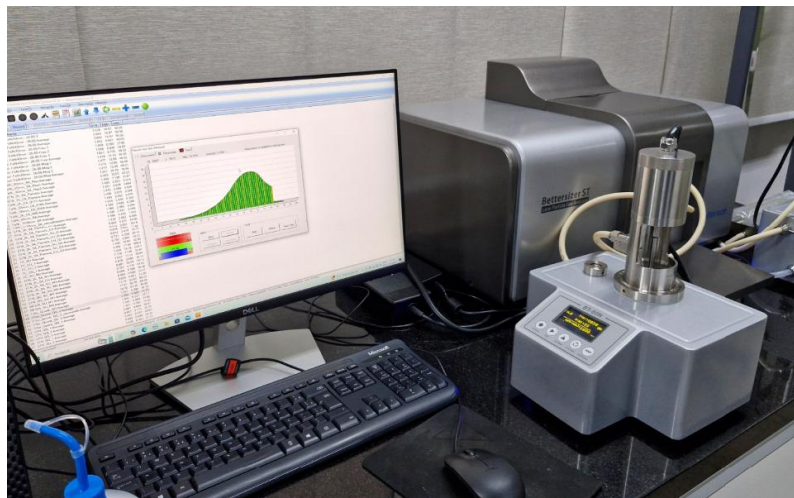
Figura 33 – Determinação da massa específica - leitura do frasco volumétrico de Le Chatelier.



Fonte: Autor

Devido aos pequenos diâmetros pretendidos das partículas, a melhor técnica para obtenção da granulometria nesse cenário é a utilização de um Granulômetro a Laser devido a sua alta precisão, estes ilustrados na Figura 34. As características físicas de área específica e distribuição granulométrica dos finos foram obtidas por meio de um analisador a laser Bettersizer ST, acoplado a uma unidade de dispersão BT-80N, empregando álcool isopropílico como meio dispersante e os resultados são apresentados na Tabela 19 e Figura 35.

Figura 34 – Aparato de Granulômetro a Laser e unidade de dispersão.



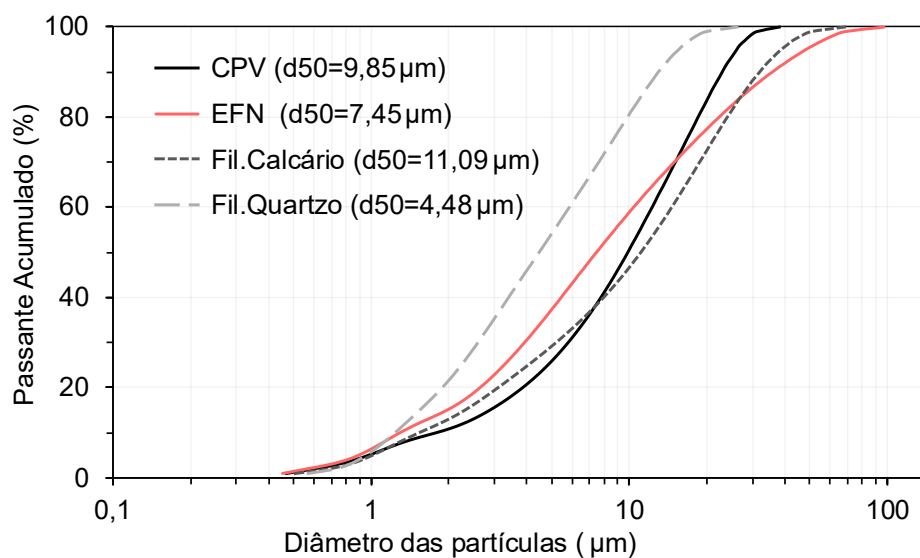
Fonte: Autor

Tabela 19 – Aspectos Físicos dos aglomerantes.

Ensaio	Análises Físicas			
	CPV	EFN	Filer Calcário	Filer Quartzo
Massa específica (g/cm ³)	3,06	3,05	2,71	2,66
Área Superficial (SSA) (cm ² /g)	5263	6367	5292	7789
D ₁₀ (μm)	1,78	1,28	1,53	1,23
D ₅₀ (μm)	9,85	7,45	11,09	4,48
D ₉₀ (μm)	22,85	35,86	32,06	12,99

Fonte: Autor

Figura 35 – Granulometrias, d50 e passante acumulado dos aglomerantes.

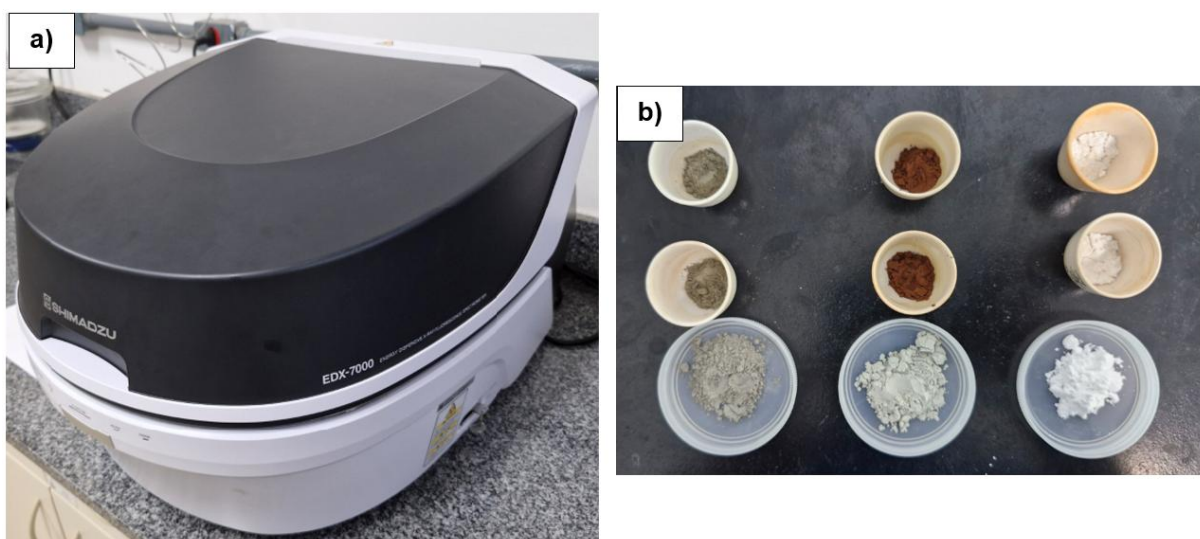


Fonte: Autor

3.4.1.5.2 Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição química em óxidos foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), utilizando um espectrômetro EDX-7000 (Shimadzu) em amostras com modelo de pastilha prensada no laboratório LDX-LabPetro da UFES, conforme ilustra a Figura 36. Complementarmente foram realizados os ensaios de Resíduo insolúvel NBR 17086-4 (ABNT, 2023b) e Perda ao Fogo NBR 17086-6 (ABNT, 2023c) para correção das massas e óxidos.

Figura 36 – Caracterizações químicas: a) Espectrômetro Shimadzu - FRX; b) Ensaio de Perda ao Fogo.



Fonte: Autor

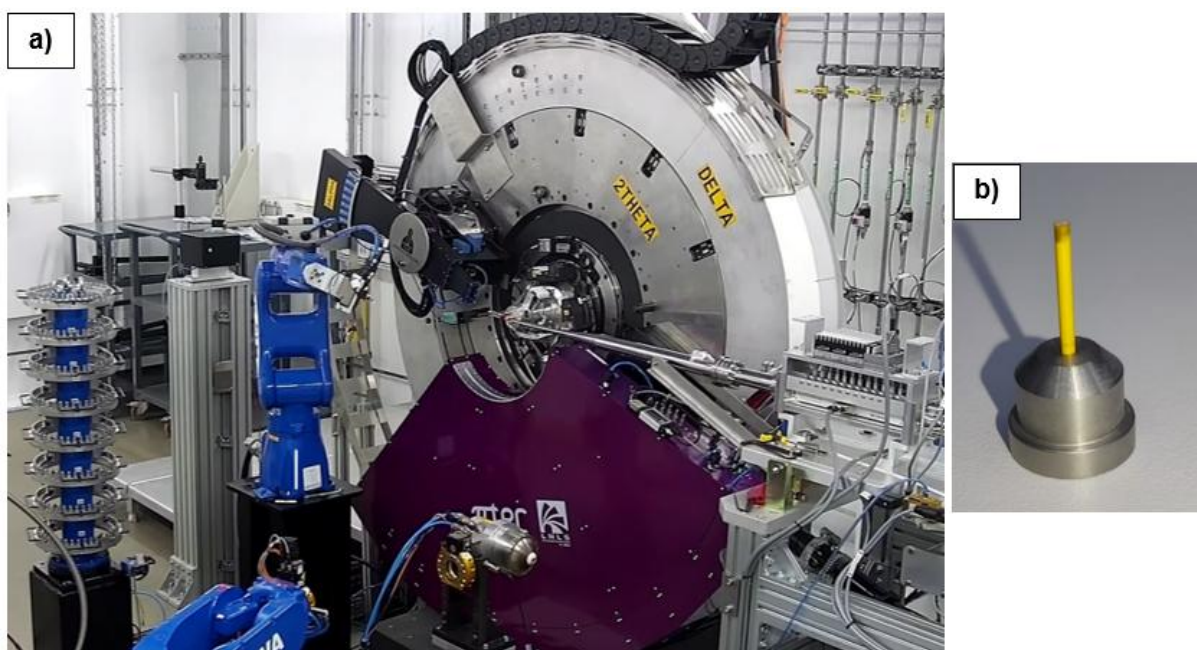
3.4.1.5.3 Caracterização Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX)

A análise por DRX conduz o entendimento microestrutural a respeito dos minerais componentes do material e identificar possíveis fases amorfas, baseando uma avaliação de reatividade química.

Os dados de Difração de Raios-X por Luz Síncrotron (SDRX) foram obtidos em geometria de transmissão na linha de luz PAINEIRA do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (Sirius/LNLS), fonte brasileira de quarta geração, utilizando um detector de área em arco PiMega 450D, podendo ser visualizado parcialmente o equipamento na Figura 37. As medições foram realizadas com passo angular de $0,0035^\circ$, cobrindo a faixa de 2θ variando de $2,6$ a 35° , empregando radiação monocromática de comprimento de onda $\lambda = 0,4858 \text{ \AA}$, gerada por um monocromador Bruker de duplo

cristal. As amostras em pó foram acondicionadas em amostradores capilares de filme Kapton, com diâmetro interno de 1,37 mm e mantidas em rotação contínua a 5 Hz durante a aquisição, visando melhorar a estatística de orientação. Os difratogramas resultantes foram processados e analisados no software TOPAS (v.5, Bruker), utilizado nas etapas de refinamento estrutural.

Figura 37 – Caracterização mineralógica: a) Estação experimental do difratômetro SDRX – Sirius LNLS; b) Amostrador Capilar de Kapton.



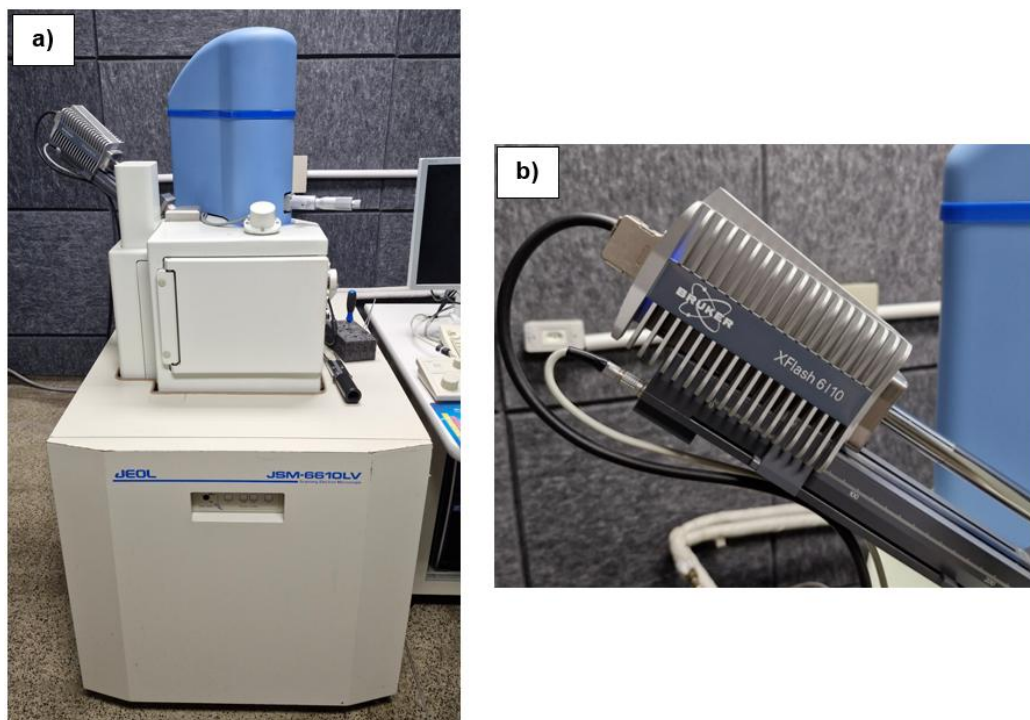
Fontes: a) Extraído de High Throughput system of Paineira beamline – Rápido (2024, 22s) b) Autor

3.4.1.5.4 Caracterização Microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Detector de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de elétrons secundários acoplada com o detector de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) respectivamente, em um microscópio JEOL JSM-6610LV com filamento de tungstênio e um XFlash® Detector 6|10 da Bruker, foi realizada no Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins – LACCAR da UFES do campus Maruípe, exibido na Figura 38. Foi utilizada com o intuito de avaliar a morfologia e confirmação da composição de elementos da EFN. A análise morfológica das partículas pode ser observada por três aspectos: angularidade, forma, e textura da superfície, os quais podem influenciar diretamente

o desempenho da matriz cimentícia, especialmente em termos de consistência no estado fresco e porosidade no estado endurecido.

Figura 38 – Equipamentos de Microscopia Eletrônica: a) Microscópio JEOL b) Detalhe do Detector EDS acoplado ao microscópio.



Fonte: Autor

3.4.2 Agregados

Para o presente estudo, os agregados utilizados estavam disponíveis nas baias do LEMAC.

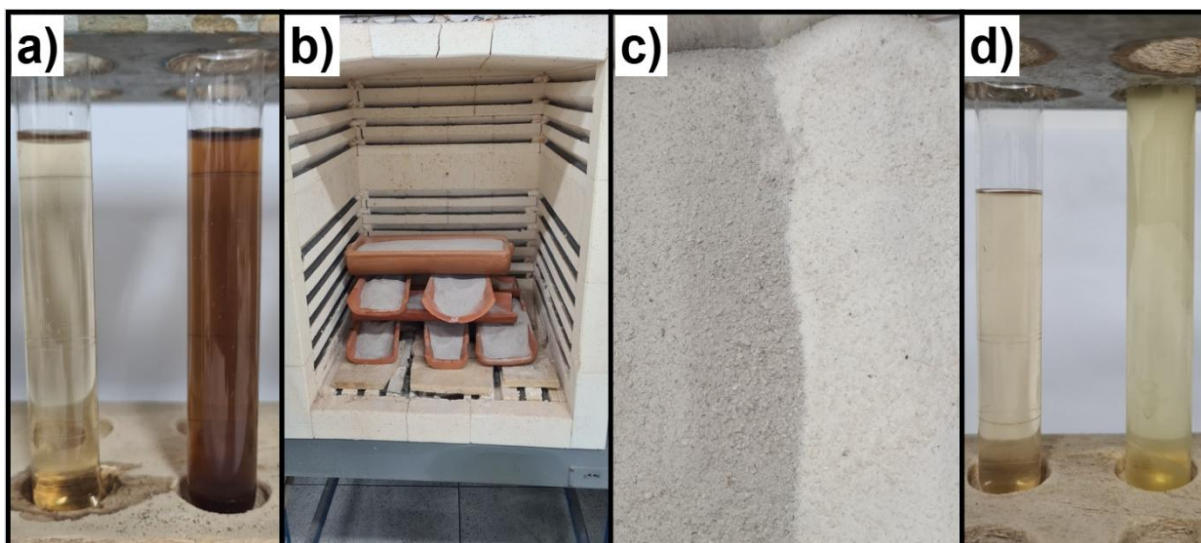
3.4.2.1 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural quartzosa de cava, proveniente de jazida na região norte do Espírito Santo. O material foi peneirado, adotando-se a fração passante em 2,36 mm para uniformizar a granulometria do agregado miúdo, e posteriormente espalhado para secagem ao ar, em temperatura ambiente, por 72h.

Após esse procedimento realizou-se o ensaio colorimétrico para avaliar a presença de matéria orgânica no agregado miúdo segundo a NBR 17053 (ABNT,

2022a) e constatou-se a presença excessiva de matéria orgânica. Portanto fez-se necessário um beneficiamento adicional com a calcinação de toda a areia em estufa por 24h com pico de temperatura em 940°C por 2h, a fim de remover toda a matéria orgânica e criar um lote adequado para produção dos concretos. A Figura 39 demonstra as etapas desse beneficiamento adicional.

Figura 39 – Etapas de beneficiamento da areia a)Ensaio matéria orgânica inicial; b)Calcinação da areia; c)Comparativo areia não calcinada e calcinada; d)Ensaio matéria orgânica final.



Fonte: Autor

3.4.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo, de rochas graníticas, foi inicialmente submetido à peneiração em peneirador mecânico, com o objetivo de remover a fração pulverulenta e eventuais partículas finas aderidas, que podem aumentar o consumo de água, comprometer a trabalhabilidade e afetar a reprodutibilidade das misturas, esta etapa pode ser conferida na Figura 40. Ainda durante o peneiramento, realizou-se a classificação granulométrica do material, selecionando-se exclusivamente a fração compreendida entre as peneiras de 9,5 mm e 4,75 mm de abertura. Essa faixa corresponde à Brita 0 (brita zero), escolhida por apresentar granulometria mais uniforme e adequada para a dosagem dos concretos do programa experimental, contribuindo para melhor empacotamento dos agregados, estabilidade no estado fresco e maior consistência entre as bateladas produzidas.

Figura 40 – Peneiramento da brita e separação entre malhas #9,5 e #4,75mm.



Fonte: Autor

3.4.2.3 Caracterização dos agregados

Após o tratamento de ambos os agregados, esses foram armazenados em sacos plásticos contendo aproximadamente 20kg cada (Figura 41) e procedidos dos ensaios de caracterização conforme a Tabela 20 que apresenta a norma utilizada e os resultados encontrados.

Figura 41 – Agregados armazenados para uso a)Areia; b)Brita 0.



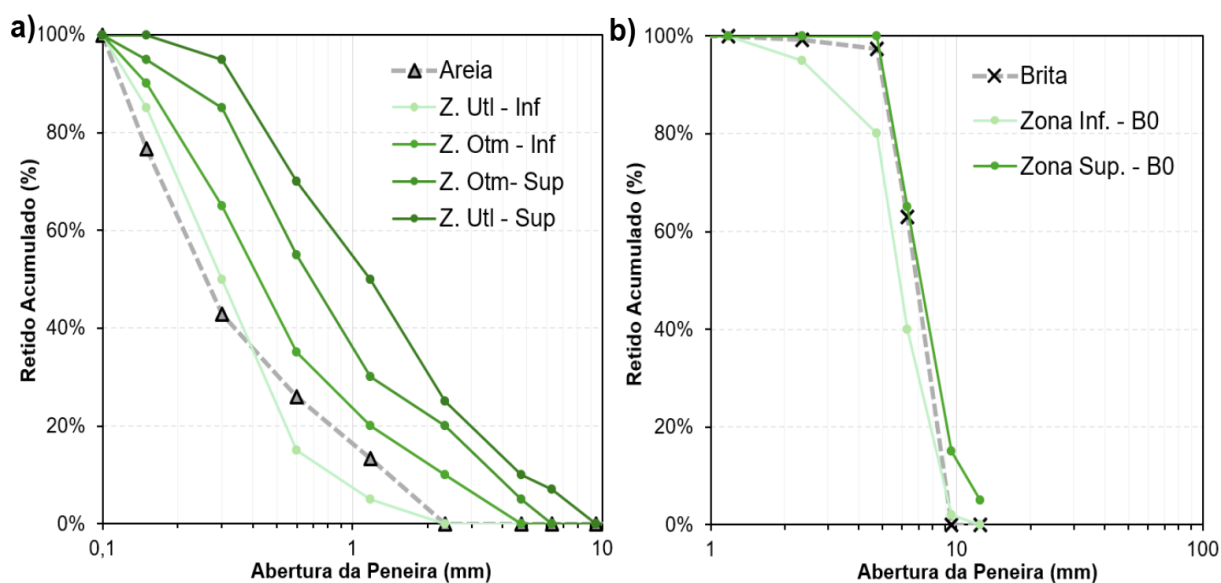
Fonte: Autor

Tabela 20 – Resultados ensaios caracterização agregados.

	Ensaio	Norma	Resultado
Agregado Miúdo	Massa específica	NBR 17212 (ABNT, 2025)	2,66g/cm ³
	Distribuição granulométrica	NBR 17054 (ABNT, 2022b)	Ver Figura 42-a
	Módulo de Finura	NBR 17054 (ABNT, 2022b)	1,59
	Dimensão Máxima Característica	NBR 17054 (ABNT, 2022b)	1,18mm
	Material Pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021a)	10,97%
Agregado Graúdo	Massa específica	NBR 16917 (ABNT, 2021b)	2,83g/cm ³
	Absorção de água	NBR 16917 (ABNT, 2021b)	0,68%
	Distribuição granulométrica	NBR 17054 (ABNT, 2022b)*	Ver Figura 42-b
	Módulo de Finura	NBR 17054 (ABNT, 2022b)	2,60
	Dimensão Máxima Característica	NBR 17054 (ABNT, 2022b)	6,3mm
	Abrasão de Los Angeles	NBR 16974 (ABNT, 2022c)	47,45%

Fonte: Autor

Figura 42 – Curvas Granulométricas - Agregados



Fonte: Autor

3.4.3 Água

Foi fornecida pela rede de abastecimento da CESAN e segundo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), quando a água utilizada para mistura do concreto é de origem do abastecimento público, não é necessário realizar ensaios para avaliar sua aceitação. Ainda assim, como verificação complementar rápida do nível de mineralização (teor de íons dissolvidos), foi medida a condutividade elétrica da água, obtendo-se 0,08 mS/cm (equivalente a 80 μ S/cm) conforme demonstrado na Figura 43. Apesar da Portaria GM/MS nº 888 de 2021 não definir parâmetros de condutividade elétrica para potabilidade de água, na literatura brasileira e internacional encontram-se valores próximos a 100 μ S/cm como teores normais de potabilidade e uso das águas (Dovidauskas et al., 2017; Libânio, 2010; Peder Flaten, 1991).

Como ordem de grandeza, se a condutividade fosse atribuída predominantemente aos cloretos, esse nível corresponderia a cerca de 22 mg/L de Cl^- equivalente, reforçando o caráter pouco mineralizado da água utilizada. Valor esse obtido convertendo a condutividade de 80 μ S/cm em condutividade molar do NaCl e convertendo para mg/L, depois transformando NaCl em Cl^- pela fração mássica do cloro no sal, calculados para temperatura de 25°C.

Figura 43 – Leitura da condutividade elétrica da água com condutivímetro portátil.



Fonte: Autor

3.4.4 Aditivo Plastificante

Com o propósito de melhorar a dispersão das partículas finas e evitar floculação do aglomerante (Breilly et al., 2021; Sposito; Dürr; Thienel, 2018), foi empregado o aditivo plastificante MURAPLAST FK 490 redutor de água tipo 1 – RA1 – de densidade 1,09kg/L em concentração de 0,5% em relação a massa do cimento.

3.5 Métodos de Ensaios

A partir da caracterização dos materiais, das composições (traços) previamente definidas e dos quantitativos a serem empregados em cada dosagem, passam-se a ter todas as informações necessárias para planejar e executar a etapa experimental com os concretos.

3.5.1 Ensaios no Estado Fresco

A partir das matrizes cimentícias preparadas, os ensaios nelas se iniciaram avaliando o comportamento no estado fresco, imediatamente após a mistura, seguido dos ensaios no estado endurecido ao atingirem as devidas idades de cura.

3.5.1.1 Consistência pelo tronco de cone – *Slump Test*

O ensaio foi realizado conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020), com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco pelo método do abatimento do tronco de cone (*slump test*) e pode ser visualizado na Figura 44. A consistência das misturas foi determinada a partir da medição do abatimento, obtido pela diferença entre a altura do molde e a altura final do concreto após a retirada do tronco de cone, registrando-se o valor correspondente para cada composição. Em seguida, os resultados foram comparados entre as misturas, de modo a verificar a influência dos diferentes teores de substituição por escória de ferroníquel (EFN) na variação da altura medida e, consequentemente, na consistência e trabalhabilidade do concreto.

Figura 44 – Leitura do abatimento de tronco de cone para o traço EFN50.



Fonte: Autor

3.5.1.2 *Massa Específica aparente e teor de ar incorporado*

A massa específica dos concretos foi determinada conforme a NBR 9833 (ABNT, 2008), a partir da moldagem em molde metálico cilíndrico de massa e volume conhecidos, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Após o preenchimento, os moldes foram pesados e, com os valores registrados, aplicou-se a Equação 5 para cálculo da densidade. Ainda utilizando a NBR 9833 (ABNT, 2008), o teor de ar incorporado foi posteriormente calculado a partir da massa específica e de parâmetros como rendimento, volume total dos componentes e índice de ar, utilizando as equações normativas correspondentes.

$$\rho_{ap} = m/v \times 1000 \quad (5)$$

ρ_{ap} = Massa específica aparente do concreto em kg/m³

m = massa de concreto em kg

v = volume do recipiente em dm³

3.5.2 Ensaios no Estado Endurecido

Conforme apresentado no Programa Experimental e no Planejamento Experimental, os ensaios no estado endurecido do concreto visam resultados da interferência direta dos teores de incorporação de EFN.

3.5.2.1 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018b). Para cada uma das cinco misturas, foram utilizados quatro corpos de prova por idade de ruptura (28, 56 e 91 dias), totalizando 12 CPs por composição. Antes do ensaio, as extremidades foram retificadas para garantir planicidade e melhor distribuição de tensões. As rupturas foram executadas no Laboratório de Estruturas (LEST) da UFES em uma Máquina Universal de Ensaios Instron 23-600 com capacidade de 600 kN, que conectada ao software no computador, registrava a carga aplicada até a máxima de ruptura para obtenção da resistência à compressão. A Figura 45 exibe o equipamento durante um ensaio.

Figura 45 – Ensaio de resistência à compressão em máquina universal de ensaios.



Fonte: Autor

3.5.2.2 Índice de Vazios – Volume de Poros Permeáveis

A durabilidade dos materiais cimentícios no estado endurecido é fortemente condicionada pela presença, distribuição e conectividade dos vazios na matriz, pois esses poros favorecem o ingresso e o transporte de água e íons agressivos, influenciando diretamente os mecanismos de deterioração. Assim, avaliou-se o índice de vazios ou Volume de Poros Permeáveis (VPP), em amostras de concreto com diferentes incorporações de EFN, buscando identificar o efeito da substituição na estrutura porosa e, conseqüentemente, no desempenho do material.

O estudo foi conduzido conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005), por meio do ensaio de absorção por imersão em água, no qual são determinadas massas do corpo de prova em condições padronizadas de secagem e saturação, bem como a massa submersa, permitindo o cálculo a água absorvida e o volume de vazios acessíveis, a Figura 46 exibe a etapa de imersão em água em ebulição do ensaio. Essas determinações foram utilizadas como indicadores da porosidade permeável para comparar as composições e discutir a influência dos teores de EFN na durabilidade do concreto.

Figura 46 – Tanque de ebulição com corpos de prova submersos durante o ensaio de imersão em água.

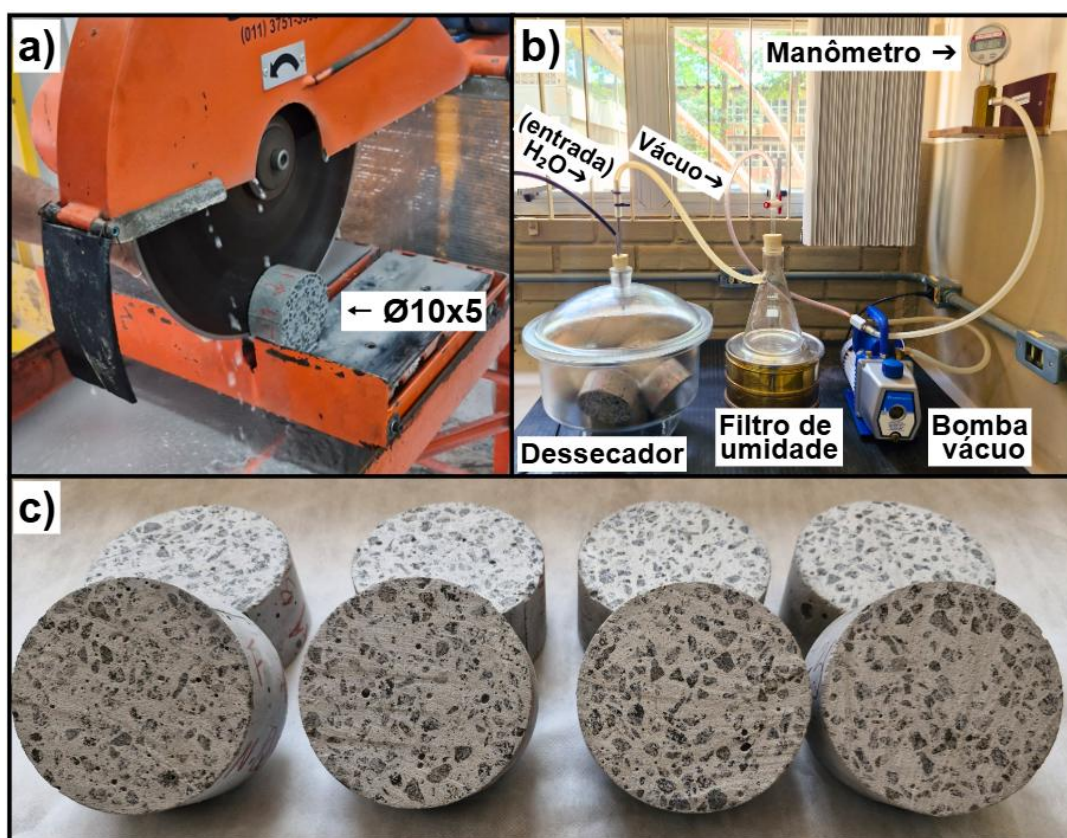


Fonte: Autor

3.5.2.3 Ensaio acelerado de Penetração de Cloretos – RCPT - Método ASTM C1202 adaptado

Para avaliar a capacidade protetora do material contra cloretos, aplicou-se o ensaio acelerado preconizado pela ASTM C1202 (2025) nas idades de 28, 56 e 91 dias de maneira adaptada. As amostras de teste foram obtidas por meio do corte úmido de corpos de prova padrão ($\varnothing 10 \times 20$ cm) com serra policorte diamantada, permitindo a extração das fatias necessárias para a realização do ensaio. Em cada CP $\varnothing 10 \times 20$ cm, foram retiradas do centro duas amostras com dimensões $\varnothing 10 \times 5$ cm, assim, foi necessário utilizar dois CPs $\varnothing 10 \times 20$ cm, totalizando quatro amostras $\varnothing 10 \times 5$ cm por composição para a execução dos ensaios. Após o corte, as amostras passaram pelo procedimento de saturação a vácuo em dessecador de vidro, como apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Preparação e saturação dos corpos de prova: a) corte dos espécimes ($\varnothing 10 \times 5$); b) sistema de vácuo com dessecador para saturação; c) corpos de prova após o preparo.

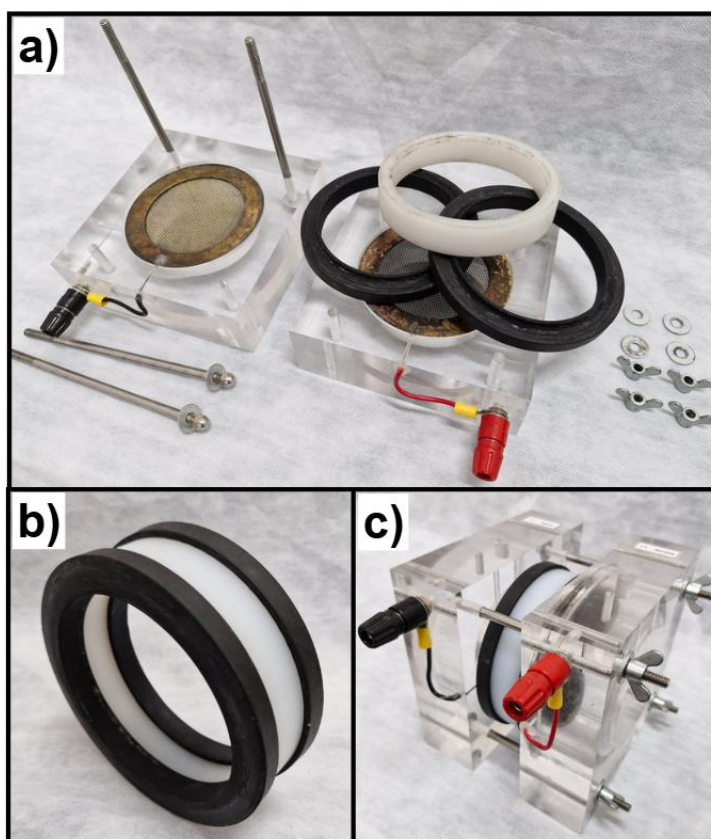


Fonte: Autor

Concluídas as 24h referentes à etapa de saturação, as amostras foram posicionadas e vedadas nas células de migração, de modo a garantir o contato

adequado das faces expostas com os eletrólitos, ainda para evitar vazamentos durante o ensaio, o aparato conta com conjunto de borrachas, parafusos e porcas para travamento do sistema. As amostras de concreto atuam como interface entre duas câmaras, a primeira preenchida com uma solução anódica de hidróxido de sódio (NaOH 0,3N) e a segunda com uma solução catódica de cloreto de sódio (NaCl 3%). Não foi necessário o selamento das laterais das amostras, pois a célula utilizada possuía um anel vedante de polietileno que acopla à amostra para evitar a perda de umidade para o ambiente. As amostras foram instaladas na célula de migração conforme a Figura 48.

Figura 48 - Componentes e montagem da célula de migração: a) corpo da célula aberto e acessórios; b) Conjunto de anéis vedantes (polietileno e borracha); c) célula montada.



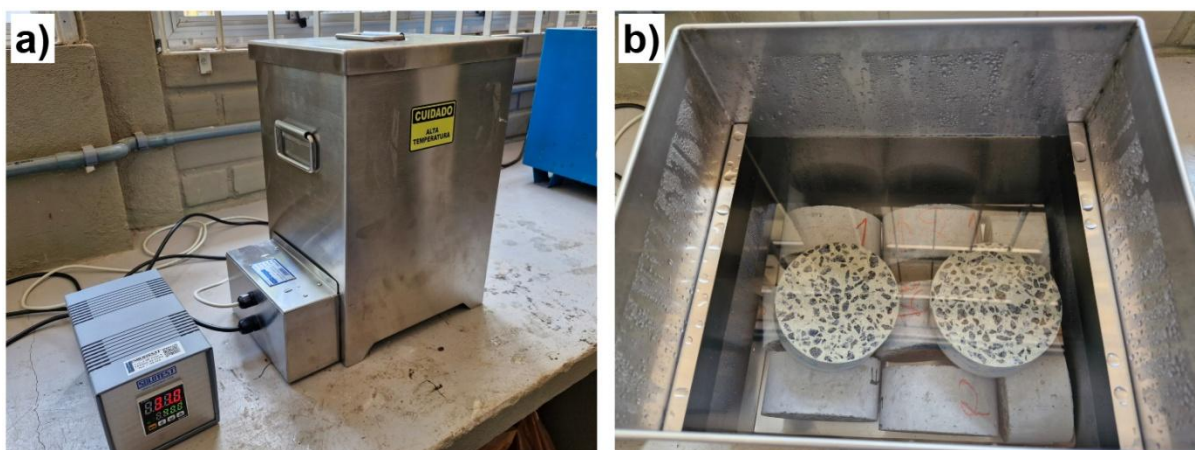
Fonte: Autor

No presente trabalho, optou-se pela aplicação de uma diferença de potencial de 18 V, em corrente contínua, ao longo de 20 horas, preservando-se o total de 360 V·h originalmente previsto na norma, em substituição ao procedimento normativo padrão, que estabelece 60 V durante 6 horas. Essa alteração foi necessária para garantir que as soluções e os corpos de prova permanecessem na faixa de

temperatura entre 20 °C e 25 °C. Caso contrário, ocorreria aquecimento significativo por efeito Joule, comprometendo a resistividade elétrica do concreto e, consequentemente, alterando os valores de corrente (mA) e de carga passante (C), uma vez que a mobilidade iônica incrementa nessa condição de temperatura elevada (Badr et al., 2022; Julio-Betancourt; Hooton, 2004; Robles; Yee; Kee, 2022; Spragg et al., 2013).

Para este estudo térmico, utilizou-se 2 corpos de prova pilotos de Ø10x5 cm com a mesma dosagem da pesquisa por composição. Após 63 dias de cura e partindo de 23,5 °C (temperatura ambiente), as amostras foram aquecidas em banho térmico por períodos de 24h (Figura 49), com incrementos de 10°C na faixa entre 40°C e 80°C, coletando-se os dados de resistividade elétrica volumétrica ao final de cada intervalo.

Figura 49 - Aquecimento dos corpos de prova em banho térmico: a) equipamento com controle de temperatura; b) corpos de prova posicionados no interior do banho.

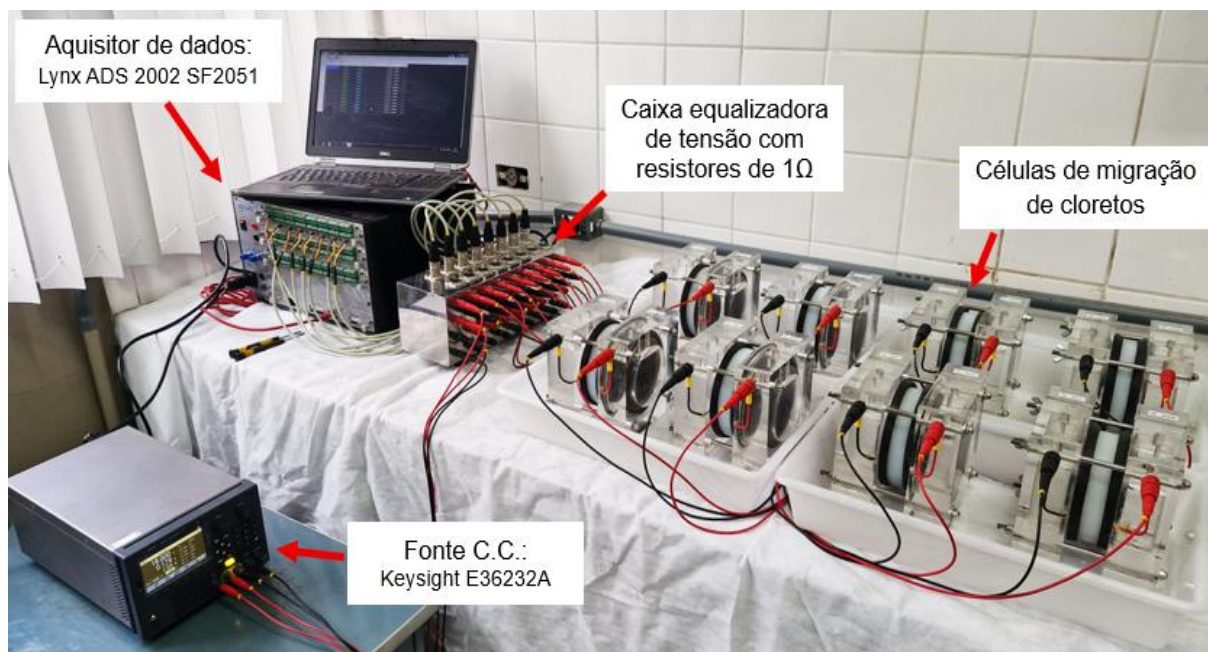


Fonte: Autor

Durante o ensaio de RCPT, a corrente elétrica foi monitorada continuamente por um sistema de aquisição de dados operando a 1 aquisição por segundo (1 Hz), o que permitiu determinar a carga total acumulada ao longo do tempo, expressa em coulombs (C) e adotada como indicador da resistência do concreto à penetração de íons cloreto. Para viabilizar o arranjo experimental, utilizou-se uma caixa equalizadora, responsável tanto por distribuir a mesma tensão (18V) às diferentes células de migração quanto por encaminhar os sinais de corrente ao sistema de aquisição. Em cada canal dessa caixa, foi instalada uma resistência de 1Ω em série com a célula de migração, utilizada para condicionamento do sinal e registro da corrente medida através da lei de Ohm ($U = R \times i$). Já a temperatura, foi tomada com termômetro de imersão em intervalos de 1h para verificar ocorrência de alterações na faixa de 20-25

°C, enquanto o ambiente era mantido a 22°C pelo aparelho de ar-condicionado. A distribuição de tensão e o monitoramento da corrente durante o RCPT foram realizados conforme demonstra a Figura 50.

Figura 50 - Arranjo experimental do ensaio RCPT.



Fonte: Autor

A aquisição de dados era convertida e importada para um arquivo de planilhas, de maneira que leituras a 1hz durante 20h gerou aproximadamente 72mil leituras por amostra, tornando um arquivo sobrecarregado. Para filtragem de dados foi utilizado um código em linguagem Python (Apêndice A) que calculava a média dos valores da corrente a cada 1800 linhas (1800 segundos = 30 minutos) e retornava um arquivo com 40 leituras médias intermediárias e era complementado com a primeira leitura e a última leitura, totalizando 42 leituras utilizando a Equação 6, possibilitando o cálculo da carga passante analogamente a Equação 1 proposta pela norma ASTM C1202 de maneira adaptada para 20h, baseada na regra do trapézio de integração:

$$Q = 900 (I_0 + 2 * (I_{30} + I_{60} + \dots + I_{1140} + I_{1170}) + I_{1200}) \quad (6)$$

Onde:

Q = Carga total passante (Coulombs)

I_0 = Corrente medida imediatamente após aplicação da tensão (Amperes)

I_t = Corrente média a cada 30 minutos em um tempo t em minutos após início da aplicação da tensão (Amperes)

Por fim, devido as variações nas dimensões dos corpos de prova utilizado, a norma americana também orienta uma correção da carga total passante Q através da Equação 7. Assim a carga passante final da composição foi tomada como a média aritmética de Q_s das 4 amostras.

$$Q_s = Q_{xy} \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \times \frac{y}{50} \quad (7)$$

Onde:

Q_s = Carga total passante (Coulombs) em um corpo de prova de 95mm de diâmetro por 50mm de comprimento

Q_{xy} = Carga total passante por um corpo de prova de diâmetro x mm por y mm de comprimento

x = diâmetro do corpo de prova (mm)

y = comprimento do corpo de prova (mm)

A aplicação do código de filtragem mostrou-se oportuno para garantir a qualidade e a confiabilidade do tratamento dos dados. Em um estudo piloto conduzido com 20 amostras presente no Apêndice B, as cargas passantes foram inicialmente calculadas a partir dos sinais brutos de corrente (sem aplicação do código), integrando-se todo o conjunto de 72 mil registros por ensaio, e posteriormente comparada ao valor obtido após a filtragem. A diferença média entre as cargas passantes calculada com os diferentes métodos, foi de apenas 0,1%, sendo esse efeito numericamente desprezível para fins de validação do processamento, evidenciando que o procedimento de filtragem preserva o resultado integral do ensaio, ao mesmo tempo em que torna o arquivo de planilhas mais facilmente manipulável para outras funções tais como a geração de elementos gráficos e outros cálculos.

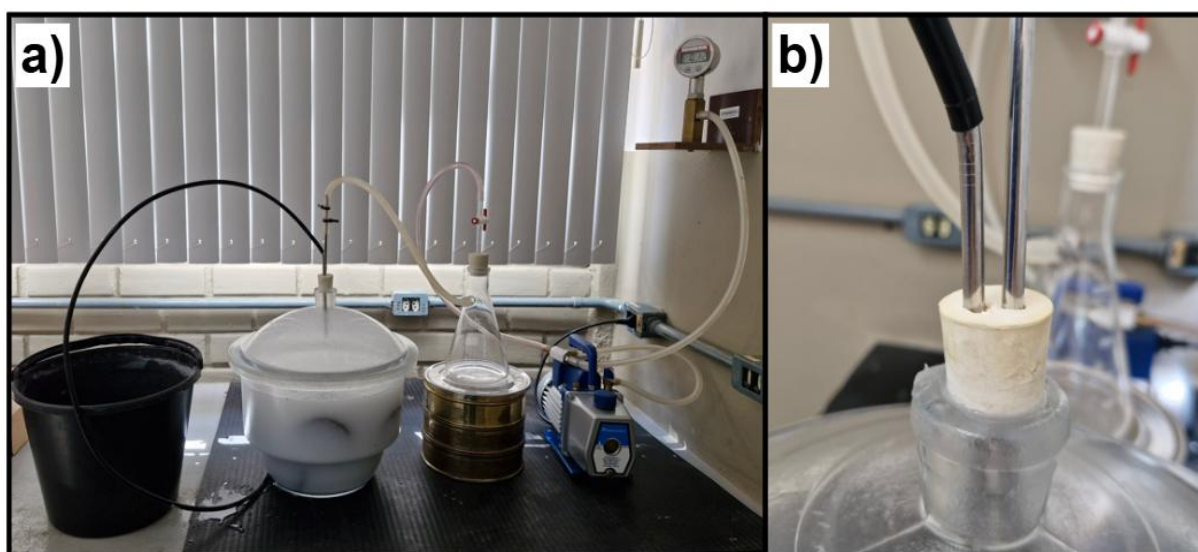
3.5.2.4 Ensaio de Migração de Cloretos em regime não estacionário - RCMT - NT Build 492

O coeficiente de migração não estacionária de cloretos (D_{nssm}) foi determinado pelo método da NT Build 492 (1999) nas idades de 28, 56 e 91 dias, que quantifica a

resistência do material à penetração de cloretos a partir da migração iônica sob campo elétrico, com posterior revelação da frente de cloretos por nitrato de prata.

Similarmente ao procedimento do RCPT, foram utilizadas 4 amostras cilíndricas Ø10x5cm cortadas a partir de dois CPs Ø10x20 cm por composição, também saturadas a vácuo em dessecador por 24h, porém para esse teste a norma solicita a utilização de água saturada com hidróxido de cálcio, apresentado na Figura 51.

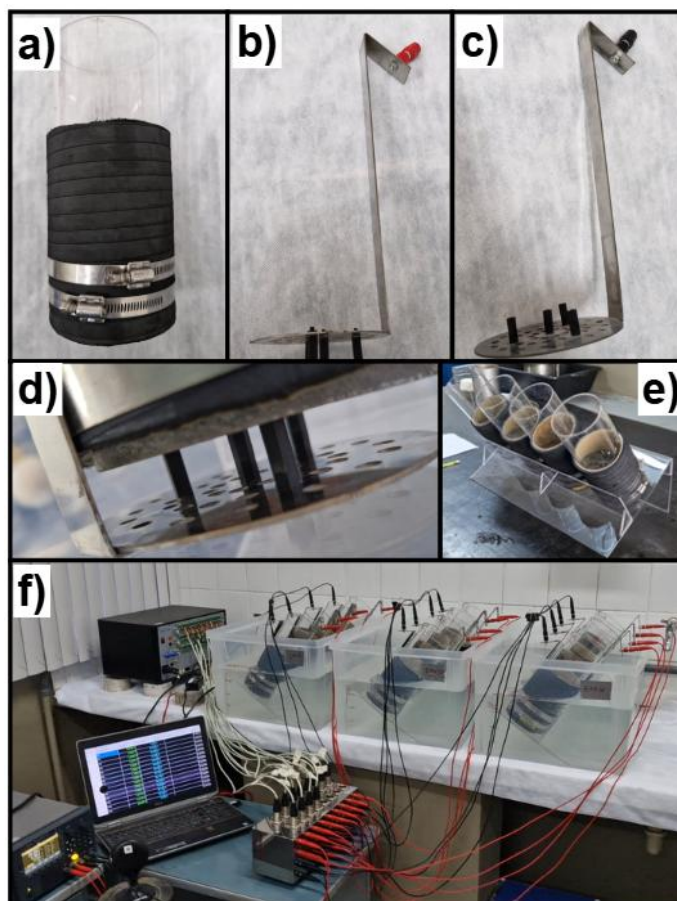
Figura 51 - Saturação a vácuo das amostras para o ensaio RCMT (NT Build 492):
a) Sistema de vácuo com dessecador; b) Detalhe para o processo simultâneo de saturação, entrada de água e saída do vácuo.



Fonte: Autor

A montagem do aparato de ensaio após a saturação é mostrada na Figura 52, utilizando um reservatório plástico preenchido com aproximadamente 35L de solução catódica de NaCl em concentração 10% (Figura 52-f). Os espécimes foram acoplados alinhados na extremidade inferior de uma manga de borracha com prolongadores de cilindro de acrílico e cintados com abraçadeiras metálicas na lateral para evitar vazamentos (Figura 52-a). O conjunto foi apoiado no reservatório catódico com uma rampa acrílica de inclinação a 32° (Figura 52-e) e adicionou-se aproximadamente 350mL de solução anódica NaOH (0,3N) na parte superior, suficientes para imersão completa do ânodo inserido. Os eletrodos superiores e inferiores de aço inox 304 contavam com espaçador plástico de 15mm para distanciá-los adequadamente dos espécimes de ensaio (Figura 52-b,c,d).

Figura 52 - Montagem do aparato do ensaio RCMT: a) conjunto de vedação e acoplamento do espécime; b,c) Eletrodos de aço inox; d) Eletrodo inferior com espaçadores; e) Posicionamento dos corpos de prova no suporte inclinado; f) Arranjo experimental completo com células e sistema de leitura de corrente.

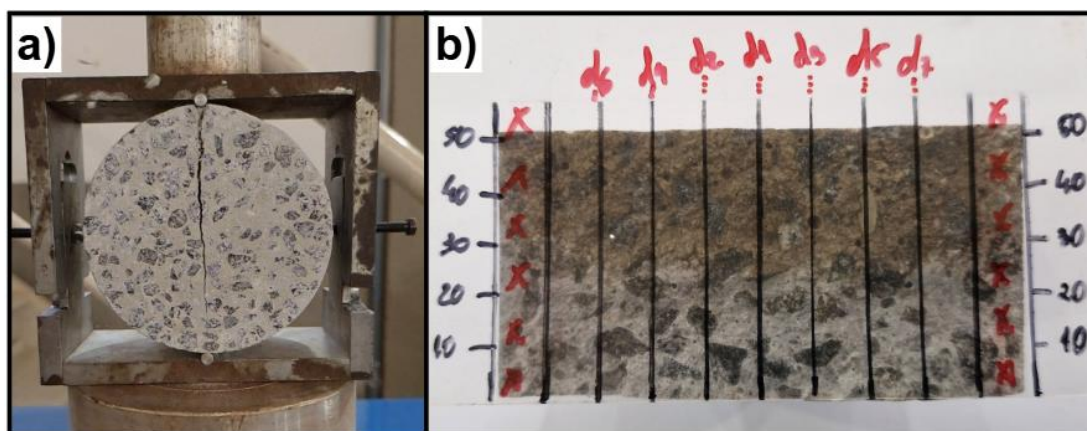


Fonte: Autor

Utilizando a mesma fonte de corrente contínua e a caixa equalizadora empregadas no RCPT, aplicou-se a tensão inicial de 30V para ajuste da tensão de ensaio conforme a Tabela 7, registou-se as temperaturas inicial e final e durante o decorrer do ensaio houve apenas monitoramento da corrente com o aquisitor de dados para verificação se houve alguma intercorrência.

Ao final, o conjunto foi desmontado e o espécime foi então partido diametralmente. Sobre a superfície recém-fraturada aplicou-se solução de nitrato de prata AgNO_3 0,1M e após cerca de 15 min, quando a precipitação branca de AgCl ficou nítida, mediu-se a profundidade de penetração a partir do centro em direção às bordas, em intervalos de 10 mm, obtendo-se sete leituras com auxílio de uma máscara de leitura e paquímetro, permitindo calcular o coeficiente de migração (D_{nssm}) pela Equação 2. A fratura do espécime e a leitura da frente de cloretos são apresentadas na Figura 53.

Figura 53 - Determinação da profundidade de penetração de cloretos após o ensaio RCMT: a) Corpo de prova fraturado diametralmente; b) Leitura da frente de cloretos após aplicação de AgNO_3



Fonte: Autor

3.5.2.5 Carbonatação Acelerada

A resistência à carbonatação foi avaliada por ensaio acelerado em câmara climática de carbonatação controlada, baseado na ISO 1920-12 (ISO, 2015) utilizando o equipamento da marca BASS modelo UUC-RH-EXT-270-CO₂, podendo ser conferida na Figura 54. Para cada concreto, foram moldados quatro corpos de prova cúbicos com 100 mm de aresta. Após o período de cura submersa de 28, 56 e 91 dias, os espécimes foram posicionados em ambiente laboratorial em câmara seca durante 14 dias de modo a estabilizar a umidade interna do CP.

Figura 54 - Câmara climática de carbonatação utilizada com CPs cúbicos no interior.



Fonte: Autor

Antes da exposição na câmara de ensaio um corpo de prova foi rompido para medida inicial de carbonatação, tendo todas as aferições de profundidades de carbonatação inicial negligenciáveis (<2mm).

A etapa de exposição em ambiente carbonatante foi realizada por 70 dias, mantendo-se temperatura de 27 ± 2 °C, umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e atmosfera com $5 \pm 0,5\%$ de CO₂. Essas condições foram mantidas de maneira contínua por meio dos sistemas de controle da câmara.

A faixa de temperatura de 27 ± 2 °C foi usada para acelerar a cinética da carbonatação (Lu et al., 2022) sem impor um regime térmico agressivo que pudesse intensificar a secagem ou criar gradientes térmicos relevantes. Além disso, é uma condição alternativa usual para laboratórios em clima quente, contribuindo para maior estabilidade e repetibilidade do ensaio (ISO, 2015).

A umidade com set point em $65 \pm 5\%$ equilibra a necessidade de água nos poros para dissolução do CO₂ e ocorrência das reações, sem saturar excessivamente o concreto a ponto de dificultar a difusão gasosa (Elsalamawy; Mohamed; Kamal, 2019; Hills et al., 2015). Valor esse também orientado pela norma ISO 1920-12 para locais de clima quente.

O uso de uma atmosfera enriquecida com $5 \pm 0,5\%$ de CO₂ tem como objetivo acelerar o processo em escala laboratorial de forma aceitável, elevando o gradiente de concentração entre o meio externo e a solução de poros e, assim, aumentando o fluxo de CO₂ para o interior do concreto em relação ao ar ambiente (Merah, 2024; Sanjuán; Andrade; Cheyrez, 2003; Von Greve-Dierfeld et al., 2020). Essa escolha permite obter frentes mensuráveis em prazos compatíveis com o programa experimental (70 dias), mantendo ainda uma condição “moderada” quando comparada a ensaios com teores muito elevados (por exemplo acima de 20%), os quais podem intensificar efeitos não desejados de fechamento dos poros e possível mudança do mecanismo dominante de transporte (Cui et al., 2015). Com isso, buscou-se acelerar sem descaracterizar o fenômeno, preservando a utilidade comparativa dos resultados entre misturas com esse teor de CO₂.

Ao término do ciclo, os corpos de prova cúbicos foram rompidos perpendicularmente às duas faces definidas como laterais de exposição, e a profundidade carbonatada (dk) determinada pela avaliação do pH através da aplicação de solução de fenolftaleína a 1% conforme exibido na Figura 55. O valor de

d_k corresponde à distância média entre a superfície exposta e a linha de transição rósea, medida em pelo menos quatro pontos igualmente espaçados a partir do centro em cada seção e arredondada para múltiplos de 0,5 mm, conforme estabelecido pela RILEM-CPC-18 (1988). Para cada concreto analisado, foram utilizados três corpos de prova cúbicos de lado 100mm.

Figura 55 – Corpos de prova carbonatados: a) 28dias; b) 56dias; c) 91dias.



Fonte: Autor

3.5.2.6 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica (ρ) dos corpos de prova cilíndricos de 100x200 mm foi determinada utilizando um medidor de resistividade Resipod (Proceq) de espaçamento entre sondas (a) de 50mm, tanto por meio de leituras superficiais quanto com o acessório de pratos metálicos para medições volumétricas (Bulk Test), exibidos na Figura 56. Essa abordagem permite avaliar a interconectividade dos poros do concreto e, consequentemente, sua resistência à penetração de agentes agressivos (Azarsa; Gupta, 2017).

Figura 56 – Equipamento de ensaio de Resistividade - Proceq Resipod.



Fonte: Autor

A Figura 57 demonstra ambas as modalidades de ensaio (superficial e volumétrica), que foram realizadas aos 7, 14, 24, 28, 56 e 91 dias, por se tratar de métodos não destrutivos, com os corpos de prova retirados diretamente do tanque de cura submersa. Em cada idade, foram obtidas leituras em quatro corpos de prova, definindo-se a resistividade elétrica (ρ) como a média do conjunto. Adotou-se, ainda, o critério de que as médias não poderiam apresentar discrepância superior a 7,5%; caso isso ocorresse, o corpo de prova seria novamente submerso no tanque por 2 h e as medições seriam repetidas, o que não foi necessário em nenhum conjunto.

Figura 57 – Equipamento Resipod em uso.



Fonte: Autor

As leituras superficiais foram realizadas a cada 90°, totalizando quatro pontos ao longo do perímetro lateral de cada corpo de prova. Em seguida, calculou-se a média desses valores e aplicou-se um fator multiplicativo de correção de 1,1, uma vez que as amostras estavam em cura submersa em tanque com solução de cal, conforme orientação do manual do fabricante.

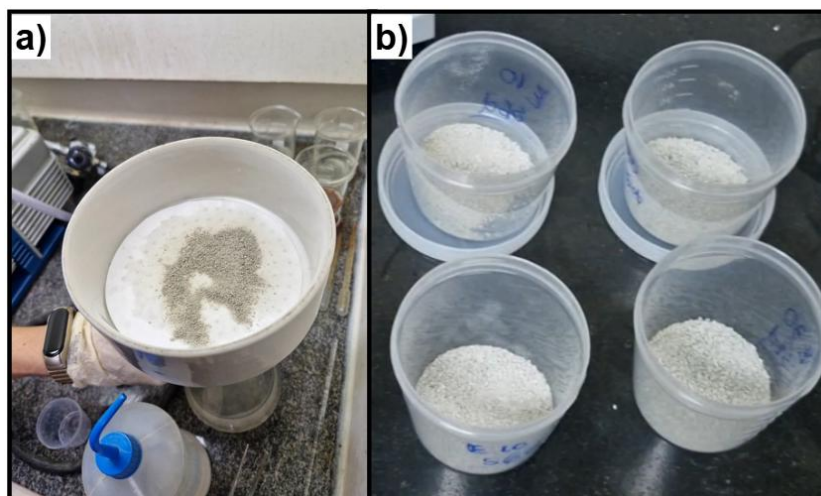
As leituras volumétricas, por sua vez, foram conduzidas conforme as equações fornecidas pelo fabricante para o equipamento com sondas espaçadas em 50 mm. Para cada corpo de prova, mediram-se altura e diâmetro para o cálculo do fator geométrico, registraram-se as leituras de ρ das esponjas condutoras superior e inferior e, por fim, determinou-se a resistividade elétrica do conjunto ensaiado.

3.5.2.7 Análise Microestrutural em pastas

Para realização dos ensaios microestruturais em pastas nas idades de interesse de 28 e 56 dias, foi necessário primeiramente interromper a hidratação. Adotou-se o protocolo de troca de solvente com isopropanol segundo RILEM TC 238-SCM (Snellings et al., 2018), com a finalidade de remover a água livre das pastas e, assim, preservar o estado microestrutural e os de produtos de hidratação nas idades desejadas.

Após o período de cura submersa, os corpos de prova foram fragmentados, triturados em almofariz e peneirados em malha de abertura 1 mm. Em seguida, uma porção representativa do material de 3 g foi submetida à interrupção por imersão em 100mL de isopropanol por 15 min, promovendo a substituição da água por solvente orgânico miscível. Após a imersão, foi realizada a etapa de filtração a vácuo em funil de Büchner, com lavagem adicional com isopropanol e, posteriormente, lavagem final com éter dietílico para facilitar a remoção do solvente e acelerar a secagem. O resíduo foi então seco em estufa ventilada a 40 °C por 8 minutos e armazenado em dessecador com sílica gel até o momento dos devidos ensaios, estas últimas etapas são ilustradas na Figura 58.

Figura 58 – Interrupção de hidratação de pastas: a) Filtração à vácuo; b) Amostras secas e prontas.



Fonte: Autor

3.5.2.7.1 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) foi utilizada para quantificar as perdas de massa relacionadas às etapas de desidratação e decomposição das principais fases hidratadas das pastas de cimento. As amostras, previamente submetidas ao procedimento de interrupção da hidratação por troca de solvente, foram agora homogeneizadas e moídas até condição de pó fino passante em peneira de abertura 75 μm .

As medições foram conduzidas em um equipamento STA 449 F5 Jupiter (Netzsch), utilizando amostras de aproximadamente 50 mg, aquecidas de 28 °C a 1000 °C a uma taxa de 20 °C/min sob atmosfera de N_2 , a fim de suprimir reações de oxidação e permitir uma interpretação mais acurada dos eventos térmicos.

Conforme a abordagem proposta por Schöler et al. (2015), o teor de água quimicamente combinada (Bound Water - BW) foi estimado a partir da perda de massa acumulada entre 25 °C e 500 °C, normalizada pela massa residual registrada a 500 °C conforme a Equação 8. Essa faixa de temperatura abrange predominantemente a desidratação das fases C–S–H e aluminatos hidratados, bem como a decomposição da portlandita, fornecendo uma métrica robusta da extensão da hidratação.

$$BW = \frac{m_{25^\circ\text{C}} - m_{500^\circ\text{C}}}{m_{500^\circ\text{C}}} \quad (8)$$

3.5.2.7.2 Análise Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX) – Método de Rietveld

Para identificar e quantificar as fases cristalinas formadas nas pastas, foram realizadas análises de difração de raios X (XRD) com adição de quartzo como padrão interno. As medições foram conduzidas empregando-se os mesmos parâmetros instrumentais utilizados para os materiais em pó previamente descritos, assegurando consistência nas condições de aquisição e permitindo a quantificação das fases cristalinas presentes. As amostras, previamente submetidas ao procedimento de interrupção da hidratação por troca de solvente, foram agora homogeneizadas e moídas até condição de pó fino passante em peneira de abertura 45 µm.

Durante a hidratação, a massa de sólidos muda porque a água livre é quimicamente combinada aos produtos da hidratação e a porosidade inicial se reduz. Por isso, pastas que passaram pelo processo de parada de hidratação, necessitam que os resultados de Rietveld ($W_{j,Rietveld}$) (Rietveld, 2014) normalizados à massa de sólidos secos, sejam corrigidos para uma base comum, reescalando a análise quantitativa de fases conforme a Equação 9 (Snellings, 2016):

$$W_{j,reescalado} = \frac{W_{j,Rietveld}}{((1 - BW) \cdot (1 + a/agl))} \quad (9)$$

Em que:

j : índice da fase que está sendo quantificado (ex.: silicatos, etringita etc.)

$W_{j,Rietveld}$: fração da massa da fase j obtida pelo refinamento de Rietveld no pó desidratado

$W_{j,reescalado}$: a mesma quantidade da fase j , mas normalizada para a base de 100g de pasta, após as correções de água do denominador.

BW : fração da massa de água quimicamente combinada (Bound Water) na pasta

a/agl : relação água/cimento em massa da mistura

A quantificação do C-S-H formado, estimada a partir do consumo dos silicatos anidros (alita e belita), apresenta boa correlação com o teor efetivo de C-S-H presente

nas amostras (Li; Scrivener, 2025). Essa estimativa pode ser obtida por meio das relações estequiométricas propostas por Scrivener et al. (2004), expressas pelas equações 10 e 11, que descrevem a conversão das fases C3S e C2S hidratadas nos produtos C-S-H e Ca(OH)₂.



Onde:

C_3S : Alita

C_2S : Belita

H : água

$C_{1.7}SH$: C-S-H, Silicato de cálcio hidratado

CH : Hidróxido de Cálcio, Portlandita

3.6 Análise dos Resultados

Como etapa final dos ensaios, foi realizado um tratamento do conjunto de resultados. Os dados obtidos foram organizados e quando aplicável, utilizou-se de procedimentos estatísticos descritivos e inferencial, incluindo regressões lineares, cálculo de médias e desvios-padrão, análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Tukey, adotando-se nível de confiança de 95%. Permitindo assim interpretações e o estabelecimento de inferências de hipóteses explicativas para os comportamentos observados.

Visando o favorecimento de uma interpretação mais objetiva, optou-se por suprimir os dados completos na seção de resultados, apresentando-se apenas um texto de resumo estatístico dos resultados. As análises, tabelas estatísticas e conjuntos completos de dados encontram-se detalhados no Apêndice C.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do programa experimental, com foco nos efeitos da substituição parcial do cimento por escória de ferroníquel sobre o desempenho das matrizes cimentícias. Os dados são observados de modo a evidenciar a evolução temporal e seu o comportamento entre as diferentes composições. Assim, os resultados de durabilidade e microestrutura são analisados de forma integrada, buscando relacionar alterações na estrutura de poros e nos produtos de hidratação com o transporte de íons, a resistividade elétrica e a progressão dos principais mecanismos de degradação.

4.1 Caracterização Química por Fluorescência de Raios-X (FRX)

A análise química por FRX evidencia composições bem distintas entre os aglomerantes e materiais inertes empregados, o que é fundamental para interpretar o papel de cada fração no desempenho das misturas. A Tabela 21 exhibe os resultados obtidos, com percentual em massa.

Tabela 21 - Composição química em óxidos dos aglomerantes.

Óxidos Encontrados	Análise Química (FRX) (massa %)			
	CPV	EFN	Filer Calcário	Filer Quartzito
CaO	64,9	2,1	84,0	-
SiO ₂	18,4	47,5	3,5	99,0
MgO	2,5	26,6	11,5	-
SO ₃	5,8	0,8	0,2	0,9
Al ₂ O ₃	4,1	4,1	0,6	-
Fe ₂ O ₃	3,2	17,1	0,1	-
K ₂ O	0,5	0,1	0,1	-
TiO ₂	0,2	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	1,2	-	-
MnO	0,1	0,4	-	-
Outros	0,3	0,1	0,1	0,1
Perda ao Fogo (%)	5,1	gf	38,4	-
Resíduo Insolúvel (%)	1,0	-	-	-

gf: ganho ao fogo

Fonte: Autor

O CPV apresenta predominância de CaO (64,9%) e teores típicos de SiO₂ (18,4%), Al₂O₃ (4,1%) e Fe₂O₃ (3,2%), caracterizando um ligante rico em clínquer e com potencial de alta reatividade, sendo teores compatíveis com o tipo de cimento empregado na pesquisa. Em contraste, a EFN apresenta perfil silicatado–magnesiano, com SiO₂ (47,5%), MgO (26,6%) e Fe₂O₃ (17,1%), além da fração de CaO ser muito baixa (2,1%), indicando menor caráter hidráulico quando comparada a escórias cálcicas (como escórias de alto forno) (Joseph; Cizer, 2022; Yoon et al., 2025) e indicando potencial de atuar por reatividade lenta ao longo do tempo durante a hidratação quando usada como MCS. Já o “ganho ao fogo (gf)” sugere possibilidade de oxidação durante o aquecimento, comportamento típico de materiais desse tipo (Bernal et al., 2016; Prasetyo et al., 2019).

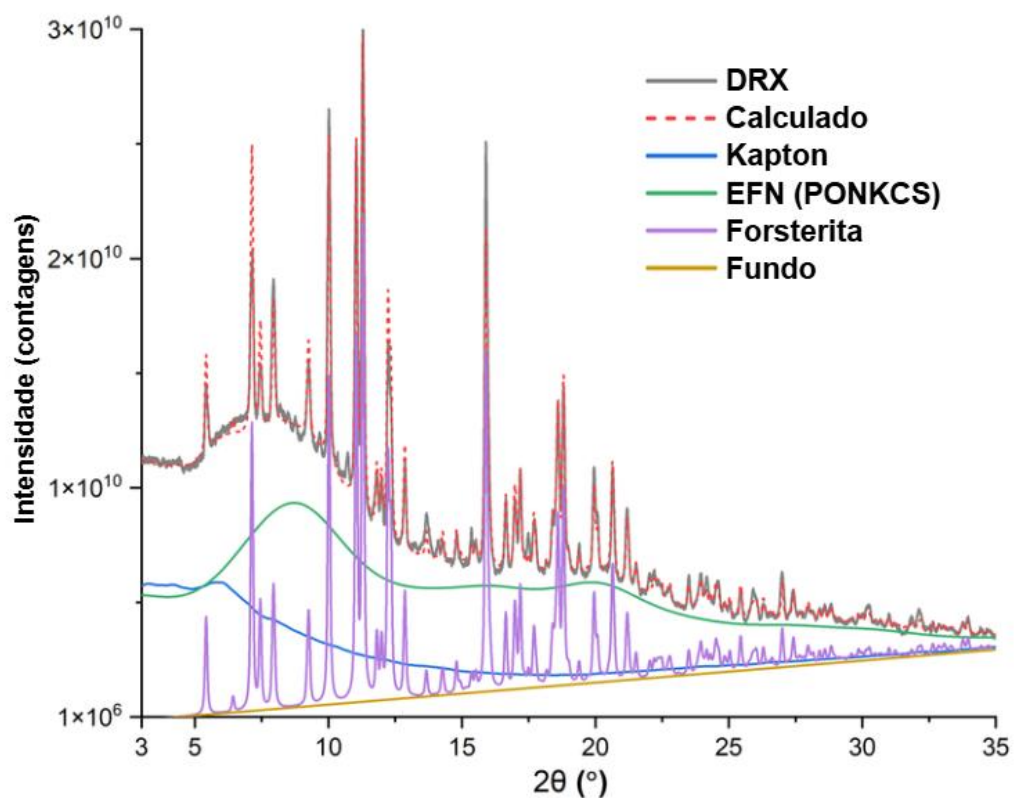
Já para o fíler calcário, apresenta caráter essencialmente inerte e serve como referência para separar efeitos químicos e físicos no sistema, apresentando CaO elevado (84,0%) e perda ao fogo de 38,4%, compatível com a decomposição de carbonatos (liberação de CO₂). Já o fíler quartzo possui SiO₂ (99,0%), evidenciando elevada pureza silicosa e baixa reatividade nas condições usuais de hidratação.

Em conjunto, os resultados sustentam que o CPV é base reativa dos ligantes, a EFN tende a modificar a matriz por diluição/empacotamento e possíveis contribuições tardias, e os fílers permitem interpretar com maior segurança as alterações microestruturais e de durabilidade observadas nas misturas.

4.2 Caracterização Mineralógica por Difração de Raios-X (DRX)

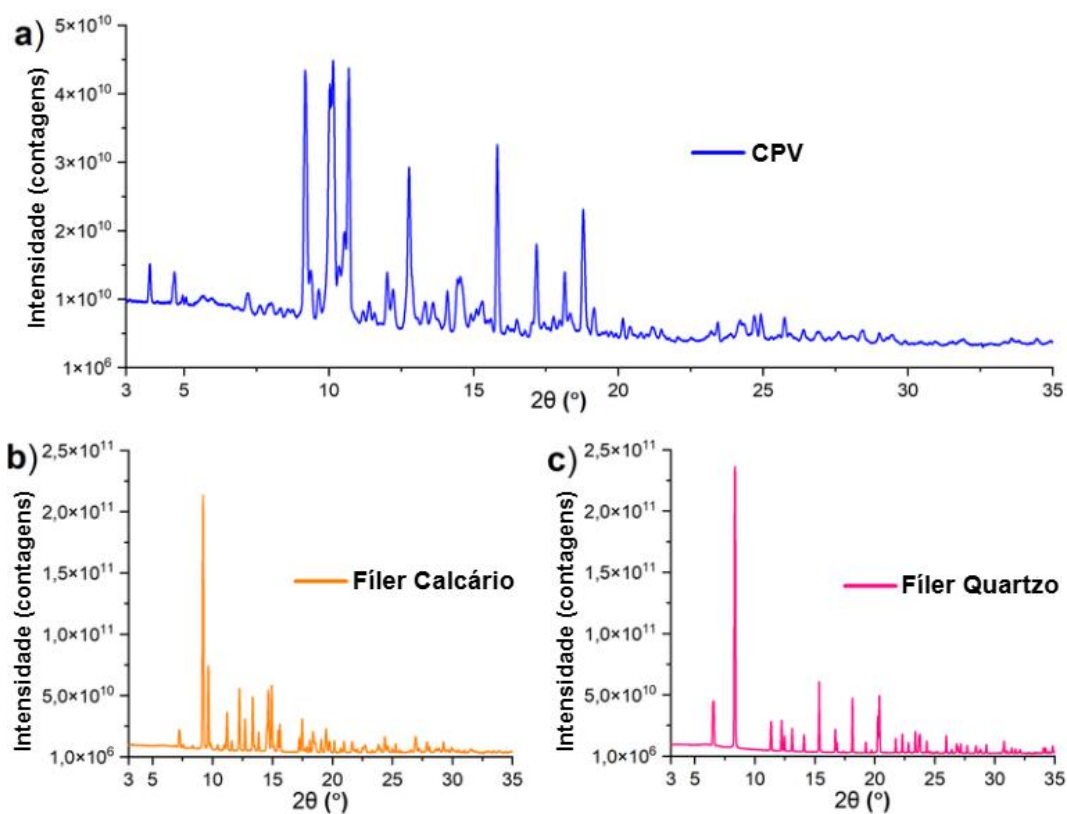
O padrão de difração da escória de ferroníquel é destacado na Figura 59, enquanto a Figura 60 e a Tabela 22 reúnem os resultados obtidos para todos os materiais finos avaliados, incluindo cimento Portland, Fíler calcário e Fíler quartzo.

Figura 59 – Difratoograma da Escória de Ferroníquel.



Fonte: Autor

Figura 60 – Difratoogramas: a)CPV; b)Fíler Calcário; c)Fíler Quartzo.



Fonte: Autor

Tabela 22 – Fases encontradas e respectivos códigos cristalográficos.

Fase encontrada	Código ICSD	Código PDF	Análise de Fases (SDRX) (massa %)			
			CPV	EFN	Filer Calcário	Filer Quartzo
C3S M3	94742	01-070-8632	53,8			
C2S β	79550	01-083-0460	19,3			
C3A cúbico	1841	01-070-0839	2,1			
C4AF	9197	01-071-0667	11,9			
Bassanita	69060	01-080-1235	4,6			
Calcita	73446	01-081-2027	4,3		63,3	
Etringita	155395	01-075-7554	1,7			
Dolomita	10404	01-071-1662	1,6		36,7	
Quartzo	174	01-085-0335	0,6			100
Forsterita	9688	01-071-1083		64,9		
Amorfo				35,1*		

*A quantificação da fase amorfa foi realizada pelo método padrão interno

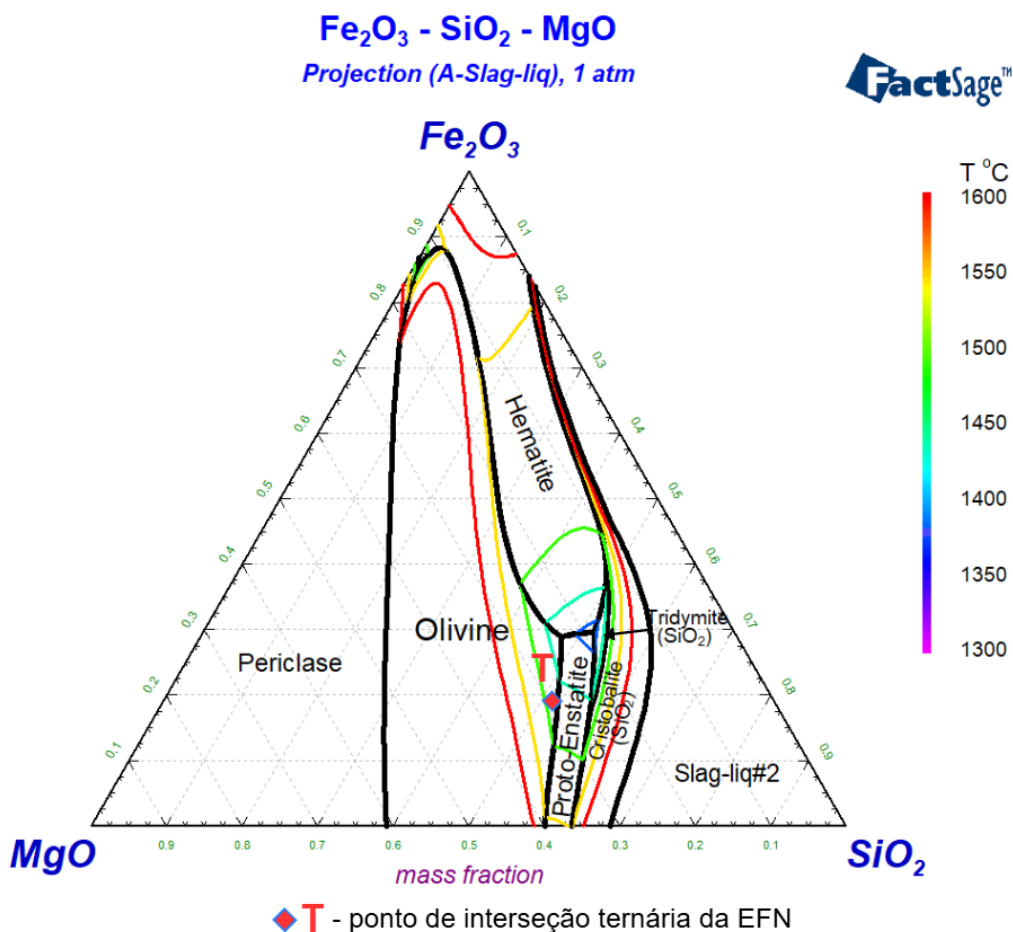
Fonte: Autor

Pela análise de DRX da EFN, observou-se que a Forsterita (Mg_2SiO_4 = 64,9%) é a fase cristalina majoritária associada ao magnésio. Trata-se de um silicato de elevada estabilidade termodinâmica em meios altamente alcalinos, cuja baixa solubilidade reduz substancialmente sua participação em processos de dissolução inicial, formação de gel C-S-H ou qualquer contribuição significativa para a reatividade pozolânica da matriz (Wang et al., 2025). Adicionalmente, foi identificado uma fração amorfa significativa (35,1%), evidenciado pelo halo difuso entre 5° e 12° (Figura 59). Ainda, foi utilizado o método PONKCS (Partial Or No Known Crystal Structure) para modelar uma pseudo-estrutura representativa da fase amorfa da EFN no difratograma da escória, mais informações sobre a metodologia utilizada para a construção do método PONKCS podem ser acessadas em De Matos et al. (2022)

O resultado de FRX, que indicou 17,1% de Fe_2O_3 , permite inferir, com base no diagrama de fases ternário (Fe_2O_3 - SiO_2 - MgO) (Figura 61), que parte dos picos da difração pode corresponder à fase fayalita (Fe_2SiO_4) ou solução sólida $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ da família das Olivinas. A ausência de picos de Mg livre está em acordo com a descrição da EFN granuladas e rapidamente resfriadas (Choi; Choi, 2015; Liu et al., 2025; Peys et al., 2025; Tang et al., 2022). Esse conjunto mineralógico, fase vítrea significativa, silicatos de Mg/Fe e inexistência de MgO livre, é coerente com o

comportamento pozolânico tardio reportado para escórias de ferroníquel moídas, sugerindo potencial para consumo de portlandita em sistemas cimentícios (Jiang et al., 2024).

Figura 61 – Diagrama ternário de fases: Fe_2O_3 - SiO_2 - MgO .



Fonte: Autor

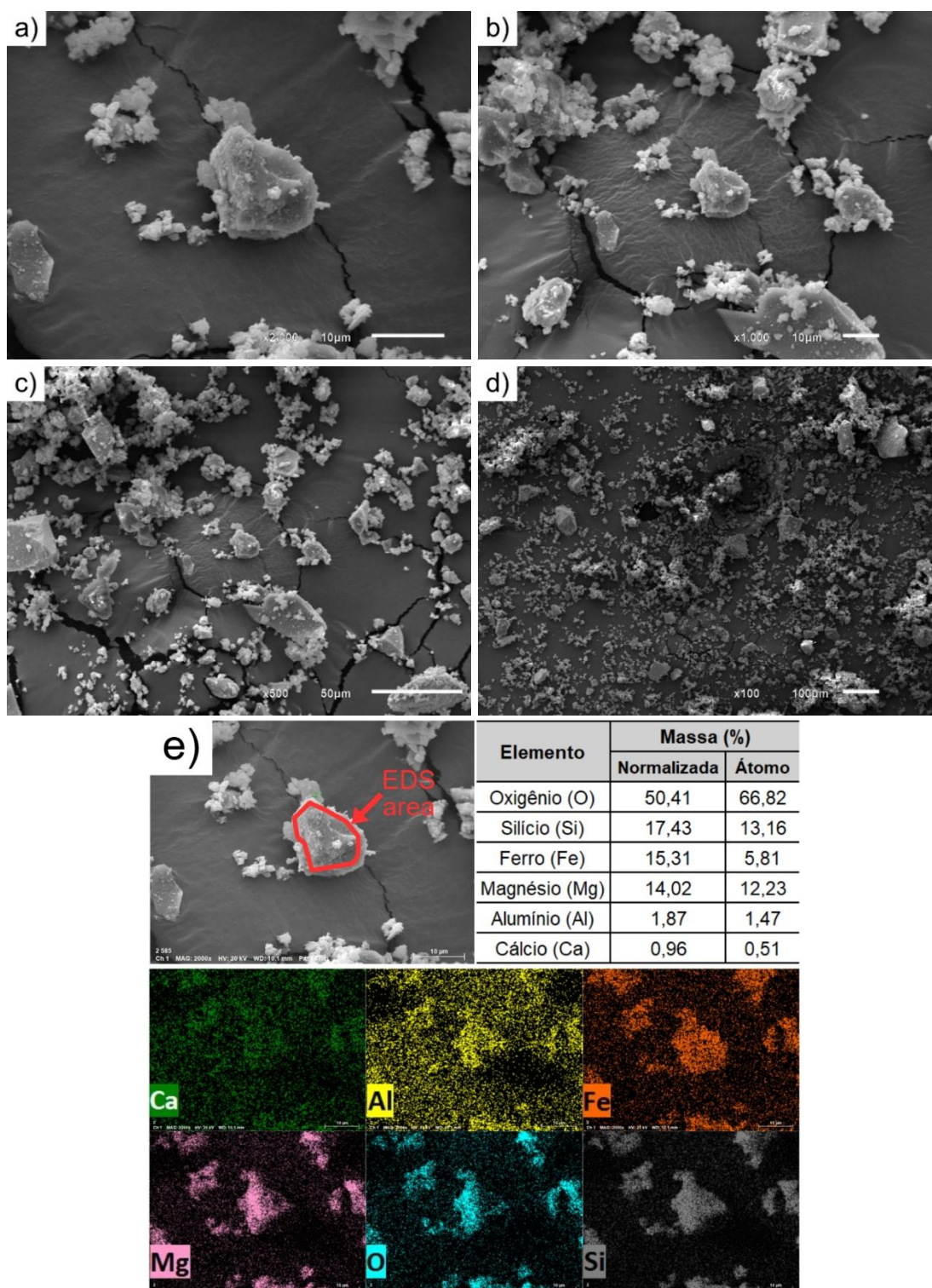
O difratograma do Cimento Portland (Figura 60-a) mostrou a predominância de Alita ($\text{C}_3\text{S} = 53,8\%$) e Belite ($\text{C}_2\text{S} = 19,3\%$), enquanto C_4AF (11,9%) e C_3A (2,1%) apareceram como fases secundárias, mineralogia típica de clínquer de alta resistência inicial devido a predominância da alita frente a belita.

Entre os materiais de referência, o Filer Calcário (Figura 60-b) apresentou composição carbonática mista, constituída por calcita (63,3%) e dolomita (36,7%), enquanto o Filer Quartzito (Figura 60-c) foi caracterizado como sendo exclusivamente quartzo, confirmando também por essa metodologia, seu caráter predominantemente inertes.

4.3 Caracterização por MEV e EDS

A Figura 62 apresenta as micrografias (MEV) e o mapeamentos de elementos em EDS, este ensaio foi realizado apenas na escória de ferroníquel.

Figura 62 – Imagens da EFN em MEV, ganhos a)x2000; b)x1000; c)x500; d)x100; e)Diagrama de escaneamento superficial em área com EDS e tabela de elementos.



Fonte: Autor

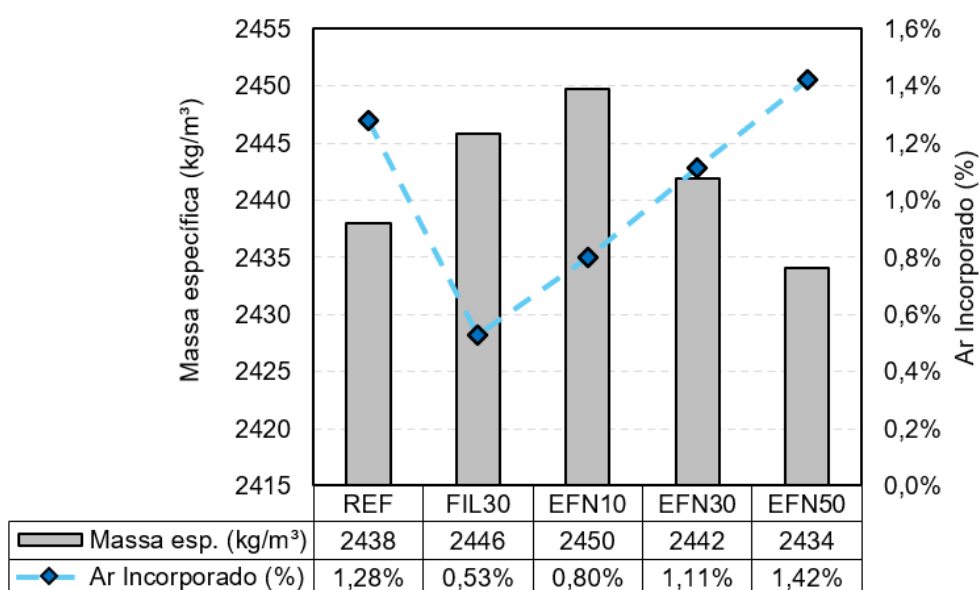
É possível observar que as partículas de EFN possuem morfologia predominantemente angulares/poligonais, com geometria irregular, arestas alongadas/afiadas e superfície relativamente lisa (aspecto “vítreo”). também é possível observar aglomeração de finos aderindo em partículas maiores, conforme observações em outras pesquisas de Jiang et al. (2024), Guan et al. (2021a) e Abdul et al. (2024).

O mapeamento EDS demonstra distribuição química rica em Si–Mg–Fe, indicando que o Si tende a ocorrer juntamente com o Mg e Fe. Essa observação, similarmente encontrada por Prasetyo et al. (2021), corrobora as fases silicatadas vítreas e olivinas achadas por DRX, que, em contato com a pasta cimentícia, tendem a ser progressivamente recobertas por produtos de hidratação ou gerar produtos hidratados tardios em contato com a portlandita.

4.4 Massa específica e Ar Incorporado

Os valores de massa específica aparente (2434–2450 kg/m³) e de ar incorporado (0,53–1,42%), apresentados na Figura 63, indicam comportamento semelhante entre os concretos. Os teores de ar são baixos (menor que 2%) e compatíveis com concretos convencionais, refletindo condições adequadas de mistura e adensamento, em conformidade com o protocolo experimental adotado.

Figura 63 – Massa específica aparente e teor de ar incorporado dos concretos avaliados.



Fonte: Autor

Observa-se também a tendência esperada de relação inversa entre as variáveis, em composições com menor teor de ar, apresentaram maior massa específica, enquanto o aumento de ar reduziu a densidade medida. Isso é nítido ao comparar traços com mesmo teor de substituição como FIL30 (0,53% e 2446 kg/m³) com EFN30 (1,11% e 2442 kg/m³), ou mesmo entre as 3 diferentes incorporações de EFN.

Assim, o comportamento global é coerente com o efeito volumétrico do ar, que ocupa os espaços das frações de material sólido por vazios no concreto fresco, reduzindo a massa específica aparente.

4.5 Abatimento de tronco de cone

Os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), apresentados na Tabela 23, evidenciam que a substituição parcial do cimento pela EFN promoveu um incremento progressivo na fluidez dos concretos. Enquanto as misturas de referência (REF) e com fíler calcário (FIL30) apresentaram abatimento de 80 mm, as misturas contendo EFN atingiram valores de 100 mm (EFN10), 120 mm (EFN30) e 150 mm (EFN50), correspondendo a um aumento máximo de 87,5% para o maior teor de substituição. Tendência semelhante é reportada na literatura para sistemas contendo escórias com características físicas e morfológicas análogas (Guan et al., 2021b; Katsiotis et al., 2015; Nuruzzaman et al., 2023b; Zhou; Shi, 2022).

Tabela 23 –Valores de abatimento de Tronco de Cone para concretos avaliados.

Composição	Abatimento (mm)
REF	80
FIL30	80
EFN10	100
EFN30	120
EFN50	150

Fonte: Autor

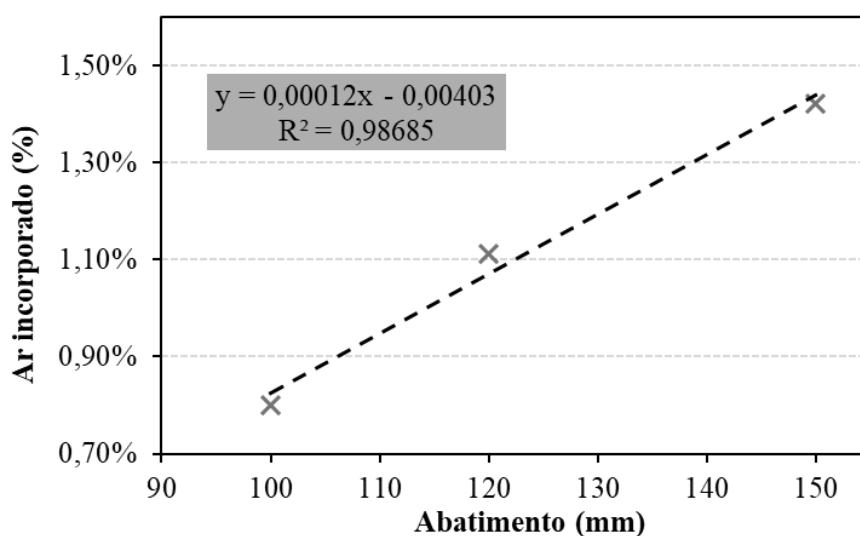
Esse comportamento pode ser atribuído, principalmente, à morfologia das partículas de EFN observada por microscopia eletrônica de varredura, caracterizada por superfícies lisas, com baixa rugosidade e reduzida irregularidade superficial.

Essas características limitam a adsorção inicial de água na superfície dos grãos, aumentando a disponibilidade de água livre no sistema e, conseqüentemente, reduzindo o atrito interno entre as fases sólidas. Conseqüente, esse efeito se reflete na melhora da resposta reológica do concreto.

Conforme indicado anteriormente, observou-se um aumento do teor de ar incorporado com a elevação do teor de EFN. Esse incremento de ar pode estar associado, de forma secundária, ao aumento dos valores de abatimento, uma vez que a presença de microbolhas tende a reduzir a viscosidade aparente da mistura e facilitar seu escoamento. Assim, os resultados sugerem que o ganho de fluidez decorre do efeito físico-morfológico da EFN, com possível contribuição complementar do ar incorporado.

Ademais, observa-se uma forte tendência linear ($R^2=0,98685$) entre o abatimento e o teor de ar incorporado para as misturas contendo EFN, conforme mostrado na Figura 64 apenas para as três misturas de EFN, indicando que o aumento da fluidez pode estar associado a maiores teores de ar. No entanto, esse ajuste deve ser interpretado com cautela, em função do número limitado de pontos experimentais e pelo baixo teor de ar aprisionado pelas misturas.

Figura 64 – Relação entre o abatimento (mm) e o teor de ar incorporado (%). Os pontos representam os valores experimentais e a linha tracejada indica o ajuste linear.

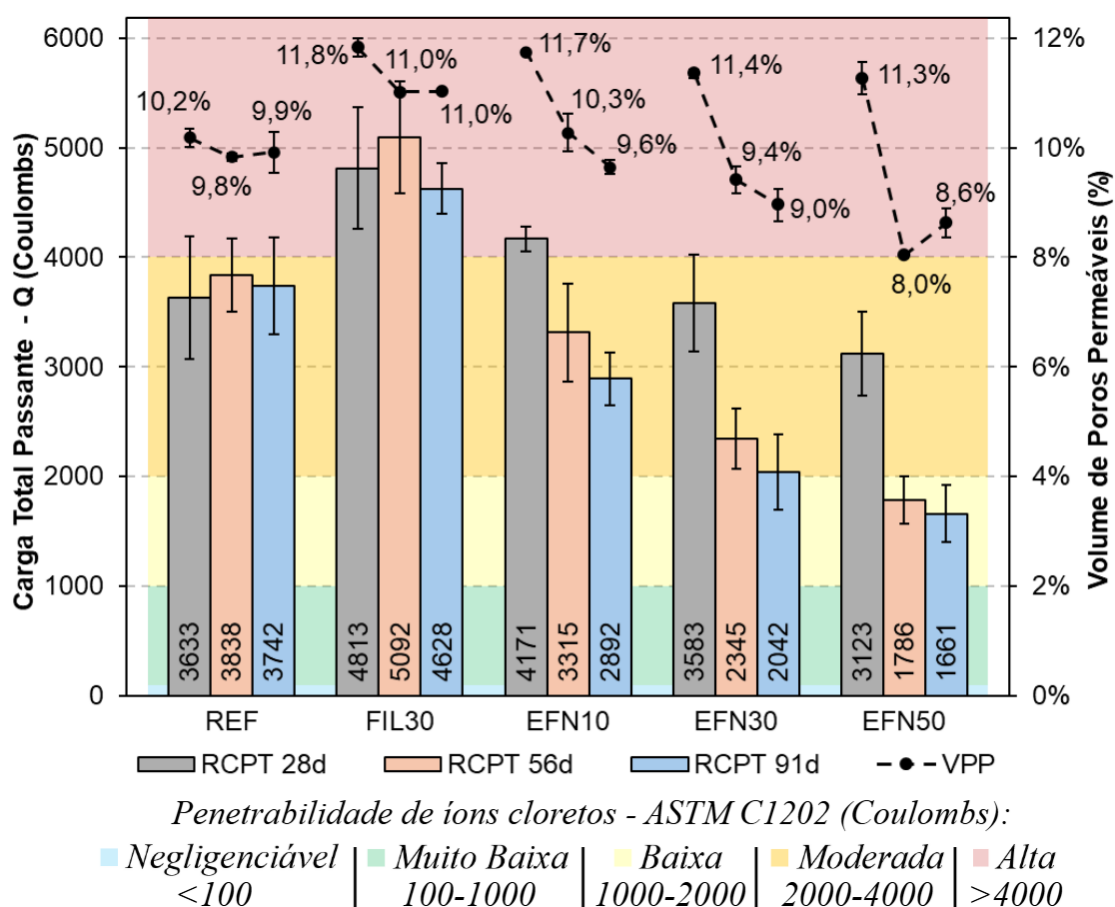


Fonte: Autor

4.6 Migração de Íons Cloreto - Método ASTM C1202 Adaptado – RAPID CHLORIDE PENETRATION TEST (RCPT)

A Figura 65 apresenta os resultados do ensaio de Resistência à Penetração Rápida de Íons Cloreto (RCPT) e o Volume de Poros Permeáveis (VPP), conduzidos conforme as normas ASTM C1202 (ASTM, 2025) adaptada e NBR 9778 (ABNT, 2005), respectivamente.

Figura 65 – Carga total Passante em 28, 56 e 91 dias, e VPP para as composições.



(Barras representam os resultados de RCPT, enquanto as linhas pontilhadas indicam os valores de VPP para cada composição)

Fonte: Autor

O concreto de referência (REF), composto unicamente por CPV, apresentou carga elétrica moderada, conforme a classificação proposta pela própria ASTM C1202, a qual considera valores entre 2000 e 4000C como indicativos de penetrabilidade de cloretos moderada. A variação entre as idades de 28 a 91 dias foi estatisticamente inexistente, sugerindo limitada evolução microestrutural após 28 dias.

A substituição parcial do CPV por 30% de filler calcário (FIL30), material de natureza inercial, resultou em aumento da carga elétrica total em todas as idades, atingindo 5092C aos 56 dias. Isso caracteriza o concreto como de alta penetrabilidade aos íons cloreto, reforçando que essa substituição promove declínio à durabilidade em teores altos de substituição (>25%) e, conseqüentemente, não atuar no refinamento de tamanho de poros da matriz (Dhandapani et al., 2021; Panesar; Zhang, 2020).

Em contraste, a incorporação de EFN promoveu melhorias graduais no ensaio de RCPT, especialmente com o avanço do tempo de cura, mostrando que misturas com adições apresentam queda contínua nos valores da carga passante com a idade de cura (Amin et al., 2025; Ibrahim; Issa, 2016; Sahoo; Parhi; Chandra Panda, 2021). A mistura com 10% de EFN (EFN10) já apresenta redução significativa na carga elétrica aos 56 e 91 dias, sugerindo uma atividade pozolânica progressiva da escória (Ahmad et al., 2022; Li et al., 2022).

Assim como observado por Chen et al. (2020), as misturas com teores mais elevados (EFN30 e EFN50) obtiveram os melhores desempenhos. EFN30 atingiu 2042 C aos 91 dias, no limite inferior da faixa de penetrabilidade moderada, enquanto EFN50 apresentou valores abaixo de 2000 C a partir dos 56 dias, classificando-se como de baixa permeabilidade, segundo a norma ASTM C1202. Tal resultado de baixa permeabilidade, é consolidado pelo menor VPP encontrado dentre as composições e idades (8%). Isso reforça o potencial técnico da escória de ferroníquel como adição pozolânica, principalmente em teores maiores ou igual a 30%, onde os benefícios sobre ataque de cloretos são mais expressivos.

A redução contínua da carga passante com o tempo observada nos concretos contendo EFN, também reforça o papel da escória como material pozolânico, capaz de refinar os poros da matriz cimentícia por meio de reações secundárias que consomem hidróxido de cálcio e geram C-S-H adicionais, tornando o concreto mais denso e menos permeável (Huang; Wang; Shi, 2017; Kim; Lee; Ann, 2019; Lemonis et al., 2015).

Os testes de ANOVA seguidos do pós-teste de Tukey indicam que a diferenciação estatística entre as misturas, em termos dos valores de carga elétrica passante no ensaio RCPT, se intensifica com o avanço da idade de cura. Aos 28 e 56 dias, observa-se maior sobreposição entre os grupos estatísticos, enquanto aos 91

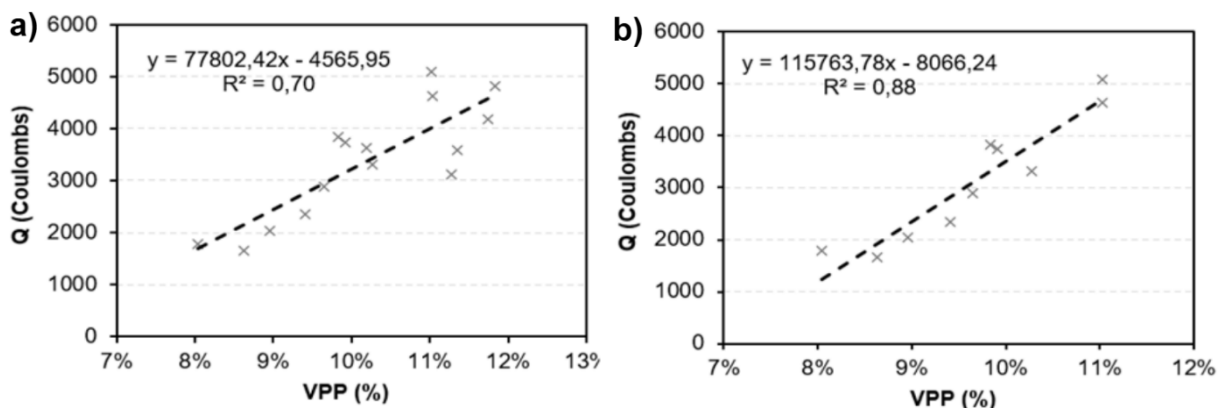
dias estabelece-se uma hierarquia mais bem definida. Nessa idade, as misturas contendo EFN apresentam desempenho superior, com EFN30 e EFN50 agrupadas no Grupo A, seguidas pela EFN10 no Grupo B. Em contraste, a mistura de referência posiciona-se no Grupo C, enquanto a mistura com fíler calcário (FIL30) ocupa o grupo de menor desempenho (Grupo D), associado aos maiores valores de carga passante. Os dados completos da análise estatística dos dados de RCPT estão apresentados no Apêndice C-1.

Essa evolução dos agrupamentos estatísticos é coerente com a redução progressiva do volume de poros permeáveis (VPP) observada para as misturas com EFN, conforme apresentado na Figura 66, indicando um refinamento da estrutura porosa ao longo do tempo. A análise conjunta dos resultados evidencia uma correlação linear positiva entre o VPP e a carga elétrica obtida no RCPT, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,70$ quando consideradas todas as idades avaliadas (Figura 66-a). Esse resultado indica que misturas com maior volume de poros permeáveis tendem a apresentar maior condução iônica e, conseqüentemente, maiores valores de carga passante.

Ao se restringir a análise às idades de 56 e 91 dias (Figura 66-b), período no qual os efeitos das reações pozolânicas associadas à EFN se tornam mais pronunciados, observa-se um aumento significativo da qualidade do ajuste linear, de $R^2=0,70$ para 0,88. Esse comportamento sugere que, em idades mais avançadas, a relação entre a redução do VPP e a diminuição da carga elétrica passante torna-se mais direta, refletindo a consolidação de uma microestrutura mais densa e menos conectada.

Dessa forma, os resultados reforçam o mecanismo previamente discutido, no qual a incorporação da escória de ferroníquel promove a redução da porosidade acessível à água e da conectividade capilar, limitando o transporte iônico no concreto. Essa tendência está em conformidade com a literatura, que aponta a diminuição do volume de poros permeáveis como um dos principais fatores responsáveis pela redução da carga elétrica total medida no RCPT (Adegoke; Ikumapayi, 2024; Hosan; Shaikh, 2021; Kewalramani; Khartabil, 2021; Nguyen et al., 2024; Safiuddin; Hearn, 2005; Vishavkarma; Kumar; Harish, 2024).

Figura 66 - Correlação linear entre Carga passante (RCPT) e VPP. a) Correlação incluindo todas as idades (28, 56, e 91 dias); b) Correlação considerando apenas 56 e 91d, quando a hidratação e as reações secundárias da EFN estão mais desenvolvidas.

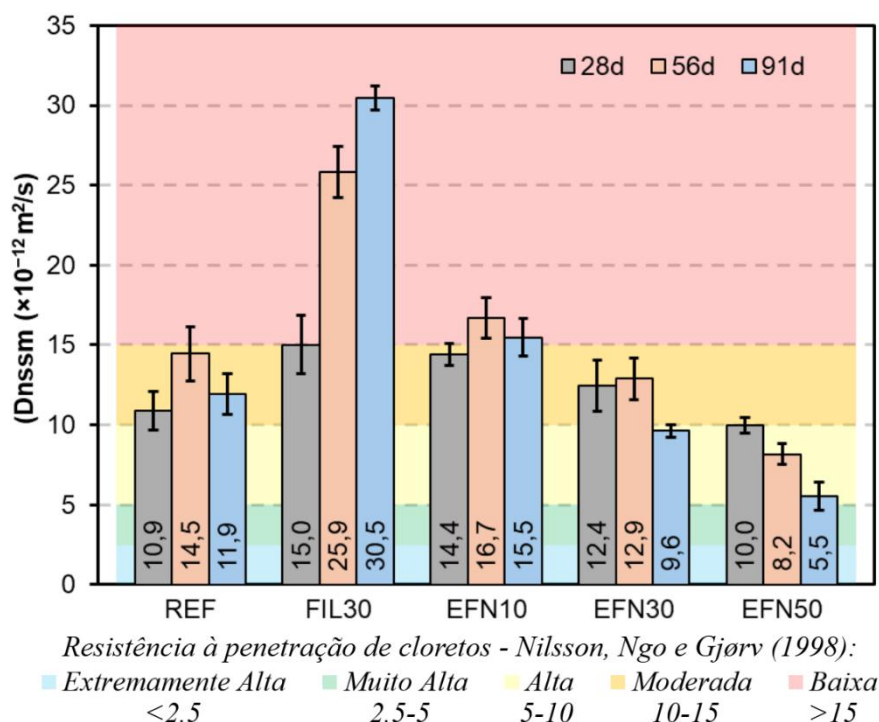


Fonte: Autor

4.7 NT Build 492 – RAPID CHLORIDE MIGRATION TEST (RCMT)

Os resultados obtidos para o coeficiente de migração de estado não-estacionário de íons cloreto (D_{nssm}) dos concretos avaliado, conforme NT Build 492 (1999), são apresentados na Figura 67. Os valores são expressos em $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, para as idades de 28, 56 e 91 dias, permitindo avaliar o desempenho frente à penetração de cloretos em diferentes estágios de cura.

Figura 67 – D_{nssm} dos concretos aos 28, 56 e 91 dias conforme NT Build 492.



Fonte: Autor

O concreto de referência (REF) apresentou coeficientes D_{nssm} de 10,9; 14,5; e 11,9 ($\times 10^{-12}$ m²/s) aos 28, 56 e 91 dias, respectivamente, de moderada resistência à penetração de cloretos segundo a classificação de Nilsson, Ngo e Gjrv (1998). A incorporação de 30% de fíler calcrio (FIL30) aumentou de forma consistente o coeficiente de migração em todas as idades, posicionando essa mistura na faixa de baixa resistência à penetração de cloretos.

Em contraste, os concretos contendo EFN apresentaram reduções progressivas nos valores do coeficiente de migração de íons cloreto, associadas tanto ao aumento do teor de substituição do cimento por escória, quanto ao avanço da idade de cura (Bagheri; Zanganeh; Moalemi, 2012; Sanjun et al., 2022; Van Noort; Hunger; Spiesz, 2016; You et al., 2019). O concreto EFN10 manteve-se no limiar da transio entre as faixas de resistência moderada e baixa (14,4 a 16,7 $\times 10^{-12}$ m²/s), indicando que, nesse nível de substituio, os efeitos físicos e químicos introduzidos pela EFN ainda não são suficientes para promover reduo expressivas na migração de íons cloreto nas idades avaliadas.

O concreto EFN30 apresentou reduo gradual e consistente do coeficiente de migração, passando de 12,4 para 9,6 $\times 10^{-12}$ m²/s entre 28 e 91 dias, caracterizando a transio de uma condio de resistência ao ingresso de íons cloreto de moderada para alta. A mistura EFN50 exibiu o melhor desempenho, com reduo de 10,0 para 5,5 $\times 10^{-12}$ m²/s (–45%), atingindo alta e aproximando-se da classe muito alta de resistência aos 91 dias.

Esses resultados sugerem que teores de EFN iguais ou superiores a 30% favorecem, em idades mais avanadas, a evoluo de uma microestrutura menos permevel ao transporte de cloretos. Esse comportamento pode estar associado  combinao de efeitos físicos de preenchimento e  progressiva formao de produtos secundrios de hidratao e desenvolvimento adicional de C–S–H. No entanto, a atribuio desse desempenho a mecanismos pozolnicos específicos deve ser interpretada com cautela e considerada  luz do conjunto de evidências experimentais disponíveis. Em contraste, a mistura com fíler calcrio (FIL30) não apresentou tendência semelhante, reforando seu carter predominantemente inerte no que se refere  mitigao da migração de íons cloreto.

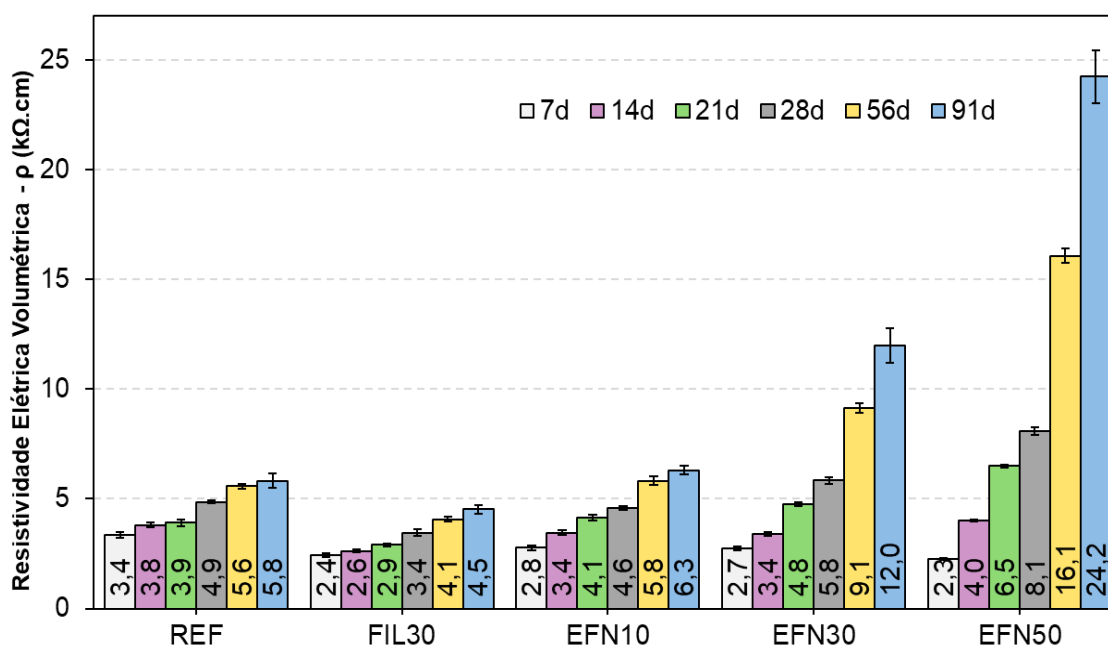
De maneira similar ao resultado da anlise estatística de RCPT, os testes ANOVA e de Tukey para os resultados do ensaio NT Build 492 tmbm revelam uma

mesma diferenciação crescente entre as misturas ao longo do tempo. Aos 91 dias, a separação é completa: as adições de escória de feroníquel (EFN50 e EFN30) alcançam os melhores resultados estatísticos (Grupos A e B), superando significativamente a referência. Por outro lado, o FIL30 isola-se com o maior coeficiente de migração de cloretos (Grupo E). A convergência para menores valores de D_{nssm} indica redução da condutividade através da solução de poros, compatíveis com os efeitos microestruturais já mencionados anteriormente. Os resultados completos da análise estatística são apresentados no Apêndice C – 2.

4.8 Resistividade Elétrica

Na Figura 68 é apresentada a evolução da resistividade elétrica volumétrica dos traços analisados. Observa-se que o concreto de referência (REF) apresentou crescimento gradual ao longo do tempo, atingindo 5,8 kΩ·cm aos 91 dias. Também, de modo semelhante ao observado por Wang et al. (2021), a adição de filer calcário (FIL30) não promoveu ganhos significativos na resistividade elétrica, com valores variando de 2,4 kΩ·cm (7 dias) a 4,5 kΩ·cm (91 dias), indicando comportamento inferior ao do traço de referência em todas as idades avaliadas.

Figura 68 – Evolução da Resistividade elétrica volumétrica nas idades de ensaio.



Fonte: Autor

De modo geral, os concretos com EFN apresentaram resistividades elétricas superiores aos traços de referência e de adição inerte, com incrementos mais pronunciados nas idades avançadas e nos maiores teores de substituição. Esse comportamento é coerente com Lübeck et al. (2012) e Sabtiwu et al. (2025), que relacionaram a substituição parcial do cimento por escórias ao aumento da resistividade, intensificado pelo aumento no teor de incorporação e pela maturidade da matriz cimentícia.

Nas idades de 56 e 91 dias, todos os concretos com EFN apresentaram resistividade superior à referência. Aos 91 dias, o traço EFN10 atingiu $6,3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$, valor 8,6% maior que o traço sem adições, porém esta composição é estatisticamente igual a REF desde 21 dias.

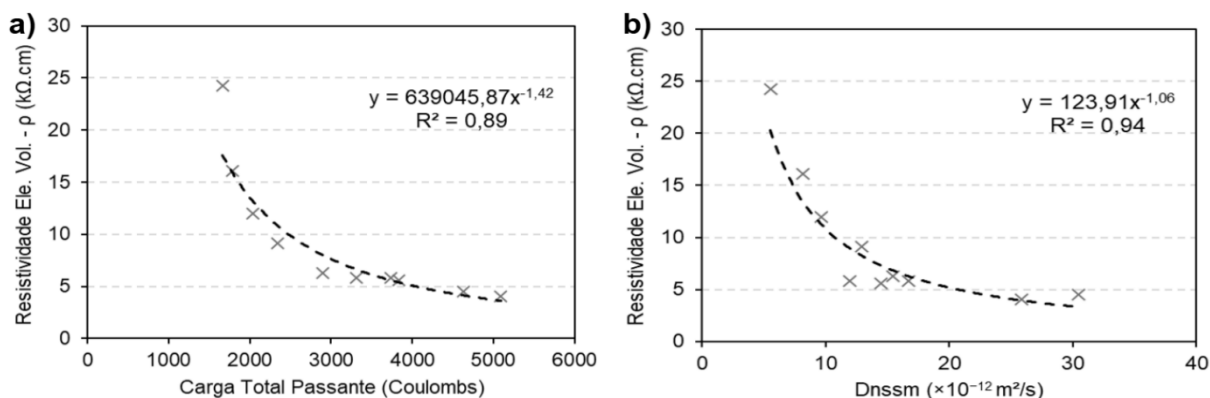
A análise de variância e o teste de Tukey para resistividade elétrica revelam uma inversão de desempenho temporal fundamentada na cinética de hidratação das adições. Inicialmente, as misturas EFN30 e EFN50 apresentavam valores inferiores (Grupos B e A), mas sua reatividade tardia promove um ganho expressivo a partir dos 21 dias, atingindo $12,0$ e $24,2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ aos 91 dias (Grupos C e D) respectivamente, correspondendo a aumentos de 106,9% e 317,2%, em relação ao REF (Grupo A – 91d). Em contraste, o fíler calcário (FIL30) permanece estagnado no menor patamar de desempenho (Grupo A) durante todo o ensaio, com apenas $4,52 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$. Esses resultados validam estatisticamente que a escória de ferroníquel promove um refinamento da rede porosa e redução da conectividade capilar superior à referência e ao fíler inerte. Os resultados completos da análise estatística encontram-se apresentados no Apêndice C-3.

Além disso, ao analisar a evolução temporal dentro de cada traço, os concretos EFN30 e EFN50 apresentaram os maiores aumentos com o tempo, a resistividade passou de $2,7$ para $12,0 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ em EFN30 (+344,4%) e de $2,3$ para $24,2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ em EFN50 (+952,2%), de modo que REF aumentou apenas 70,6%, indicando que o ganho de resistividade com a idade foi mais pronunciado nos concretos com maiores teores de EFN.

Este fenômeno está diretamente associado à redução da penetrabilidade iônica dos poros e, portanto, da carga passante total (RCPT) e do coeficiente de migração/difusão de cloretos (RCMT), em linha com modelos e evidências da literatura (Chidiac; Shafikhani, 2020; Hornbostel; Larsen; Geiker, 2013;

Ramezaniapour et al., 2011; Sasanipour; Aslani; Taherinezhad, 2021; Tibbetts et al., 2020). A Figura 69 demonstra esses fenômenos, principalmente quando observados a partir de 56d, idade no qual a EFN tem grandes incrementos na resistividade e queda na VPP conforme visto anteriormente.

Figura 69 – Correlações usando resistividade elétrica às idades de 56 e 91 dias:
a) RCPT vs. Resistividade; b) RCMT vs. Resistividade.

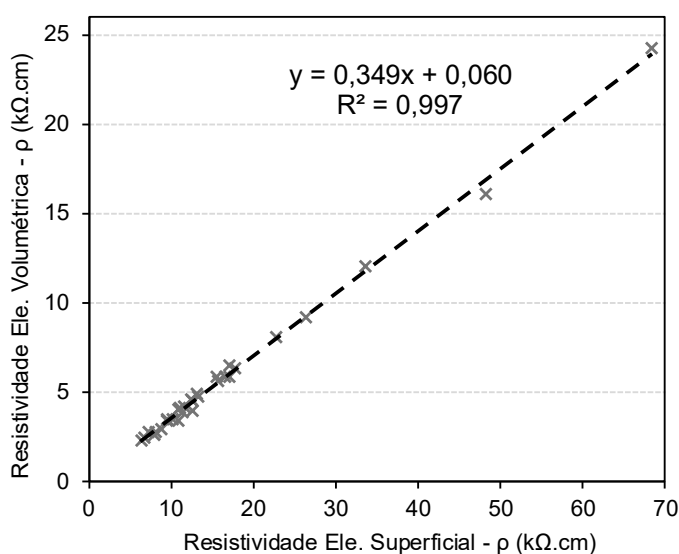


(As linhas tracejadas representam os ajustes de regressão linear)

Fonte: Autor

A Figura 70 apresenta a relação linear entre a resistividade elétrica superficial e a resistividade elétrica volumétrica, obtidas conforme metodologia proposta, em concordância com a literatura (Bielen et al., 2025; Morris; Moreno; Sagüés, 1996). A correspondência linear entre as duas grandezas confirma a consistência cruzada entre métodos independentes, validando o conjunto de dados obtido.

Figura 70 – Correlação entre a resistividade superficial e a resistividade volumétrica.

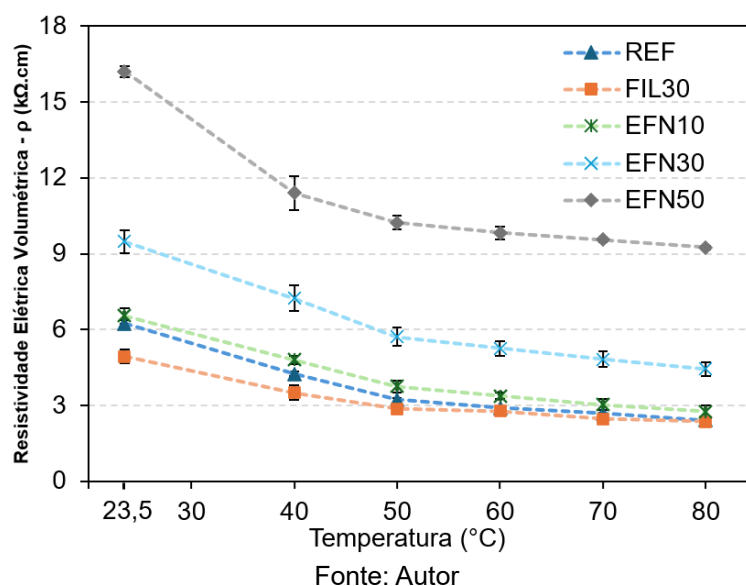


(A linha tracejada representa o ajuste de regressão linear)

Fonte: Autor

Com relação as alterações dos parâmetros de tensão e tempo referentes a norma ASTM C1202 e o ensaio RCPT, a Figura 71 apresenta o comportamento da resistividade elétrica das diferentes misturas estudadas em função da variação térmica, abrangendo a faixa de 23,5 °C (temperatura ambiente inicial) até 80 °C. O ensaio, realizado aos 63 dias de idade em corpos de prova pilotos (Ø10x5 cm), revela a sensibilidade das propriedades de transporte iônico do material cimentício frente ao estímulo térmico e à composição da matriz.

Figura 71 – Variação de Resistividade elétrica em relação à temperatura.



Observa-se um comportamento consistente em todas as misturas: o aumento da temperatura reduz a resistividade elétrica medida, com quedas mais acentuadas até 50°C e uma redução progressivamente menor acima desse patamar. Também resumido por Robles, Yee e Kee (2022), é evidente que a resistividade é fortemente dependente da temperatura e que medições comparativas precisam ser feitas com controle térmico, sob pena de distorcer a interpretação do desempenho.

Este fenômeno é fundamentado pela teoria da condução eletrolítica em meios porosos, no qual a elevação da temperatura reduz a viscosidade da solução dos poros e incrementa a energia cinética dos íons dissolvidos. Como resultado, há um aumento na mobilidade iônica, o que se traduz diretamente na redução da resistência à passagem de corrente elétrica (Azarsa; Gupta, 2017).

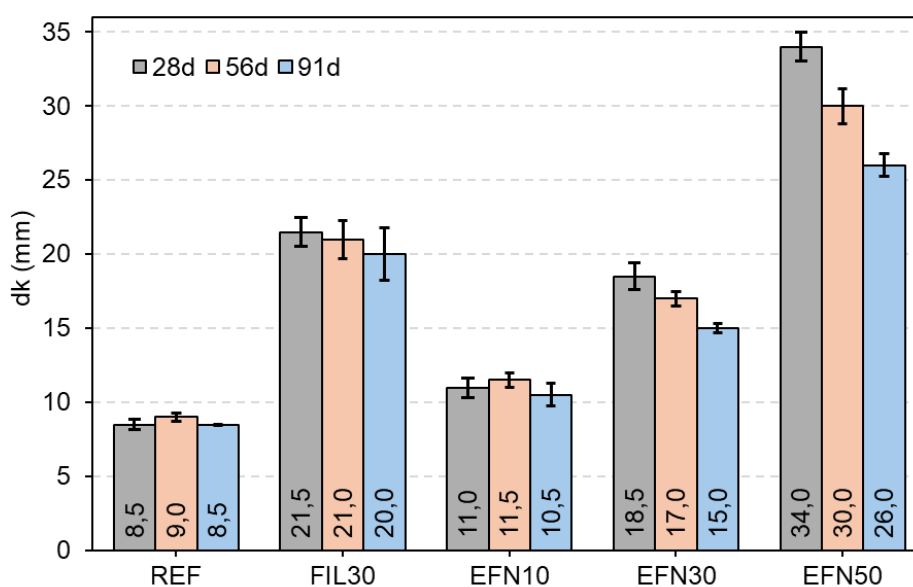
Além do efeito térmico comum, a Figura 71 destaca o efeito da composição, tendo a EFN50 as maiores resistividades em toda a faixa de temperatura testada. O que é relevante do ponto de vista de durabilidade, mesmo em condições mais severas

de temperatura, as misturas com maior teor de EFN preservam uma resistividade elétrica superior, possibilitando sua aplicação em regiões de climas mais quentes.

4.9 Carbonatação Acelerada

Os resultados da profundidade média de carbonatação (d_k), após 70 dias de exposição em câmara com atmosfera controlada de CO_2 , são apresentados na Figura 72. O concreto de referência (REF) apresentou os menores valores de profundidade de carbonatação (8,5mm aos 91 dias), em todas as idades, indicando boa resistência à carbonatação dentre os concretos analisados, mesmo com elevada relação a/agl . Esse resultado pode ser atribuído à maior disponibilidade de portlandita. Em contraste, o concreto com filer calcário (FIL30) apresentou profundidades médias de carbonatação superiores a 20 mm em todas as idades avaliadas. Esse comportamento é coerente com o efeito diluente do clínquer promovido pela substituição por um material de caráter predominantemente inerte, resultando em menor disponibilidade de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia e, consequentemente, em redução da capacidade de neutralização do CO_2 .

Figura 72 – Profundidade média de carbonatação (d_k) dos concretos após 70 dias em câmara de CO_2 , aos 28, 56 e 91 dias.



Fonte: Autor

Os concretos contendo escória de ferroníquel apresentaram resposta à carbonatação acelerada dependente do teor de substituição de cimento. O concreto

EFN10 exibiu profundidades médias de carbonatação 27% superior ao observado no concreto de referência, enquanto o aumento do teor de EFN resultou em elevação progressiva de d_k , particularmente em EFN30 e EFN50. Esse comportamento é consistente com a redução do teor de clínquer e da disponibilidade de portlandita para tamponamento alcalino, aliada à reatividade predominantemente tardia da EFN.

Na comparação entre os concretos com 30% de substituição de cimento, o concreto EFN30 apresentou profundidades de carbonatação 25% inferiores às observadas em FIL30, aos 91 dias de idade. Esse resultado está em consonância com a literatura, que aponta a contribuição reativa da EFN, ainda que tardia, como fator mitigador do efeito diluente observado em sistemas contendo filer essencialmente inerte, atuando no refinado dos poros da matriz cimentícia.

Conforme (Choi et al., 2021), em concretos com incorporações de EFN, a resistência à entrada de CO_2 depende diretamente do teor de substituição do cimento pela escória. Enquanto o EFN10 apresentou comportamento praticamente estável entre as idades de cura (decréscimo de 4,5% a partir de 11,0 mm), EFN30 apresentou redução de 19% no d_k (de 18,5 para 15,0 mm), mantendo-se, contudo, 76% acima da referência aos 91 dias. O EFN50 obteve os maiores índices absolutos, variando de 34 mm para 26 mm entre 28 e 91 dias.

Esses resultados demonstram que a vulnerabilidade à carbonatação é acentuada em concretos com altos níveis de substituição de clínquer em comparação a um traço de referência. A literatura converge nesse sentido mesmo investigando MCS distintos, Gomes et al. (2024) e Sanjuán et al. (2018) reportam esse comportamento para concretos com escória granulada de alto forno, enquanto Hussain, Bhunia e Singh (2017) observam tendência semelhante com cinza volante, reforçando que o fenômeno não é exclusivo de uma única adição, pois o refinamento de poros promovido pelo MCS não supre a carência de reservas alcalinas decorrente de menores teores de clínquer. Assim, embora a densificação tardia da matriz (micropreenchimento) diminua a difusividade (Von Greve-Dierfeld et al., 2020), não impede o avanço da frente de carbonatação nas primeiras idades e em teores elevados.

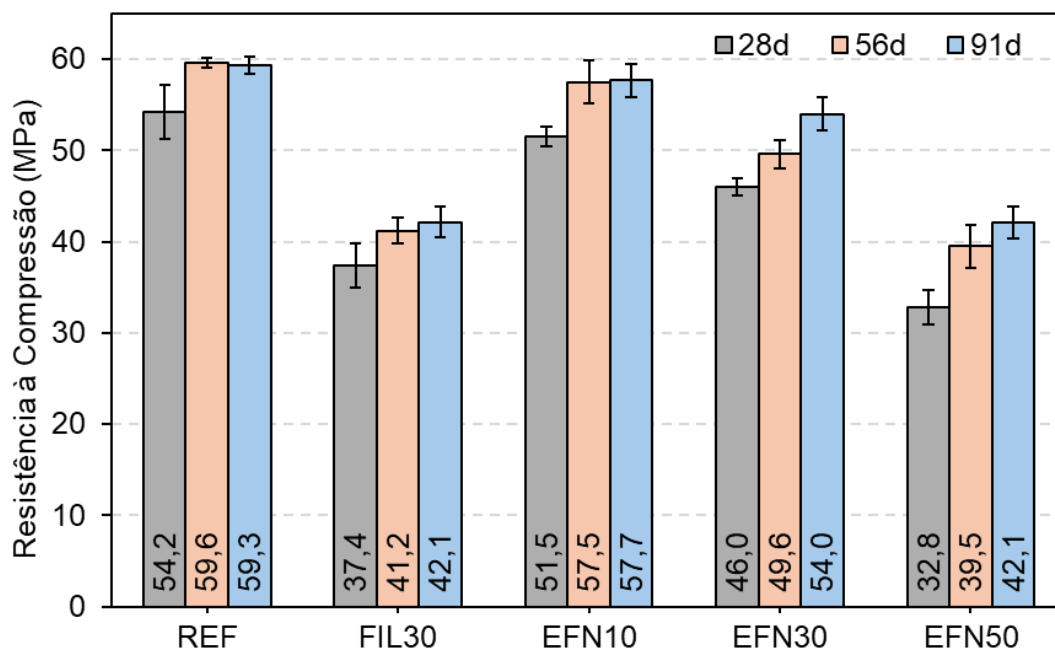
De modo geral, pelos agrupamentos de Tukey, aos 28 e 56 dias, todas as misturas se distinguiram entre si ($\text{REF} < \text{EFN10} < \text{EFN30} < \text{FIL30} < \text{EFN50}$), enquanto aos 91 dias ocorreu uma convergência parcial, com EFN-10 passando a integrar o

mesmo grupo estatístico do REF (grupo A), ao passo que EFN30, FIL30 e EFN50 permaneceram em grupos sucessivamente de d_k superiores, permitindo maior entrada de CO_2 , não compensando a parcela de substituição do clínquer. Os resultados completos da análise estatística encontram-se apresentados no Apêndice C-4.

4.10 Resistência à Compressão

Na Figura 73 são mostrados os resultados da resistência a compressão dos concretos nas idades de 28, 56 e 91 dias. A análise dos dados revela três tendências principais. Primeiro, de maneira geral, a substituição de 10% de cimento por escória de ferroníquel (EFN10) mantém o a resistência a compressão em patamares próximos ao concreto de referência, sendo ambos estatisticamente iguais em todas as idades avaliadas. Conforme observado em outros MCS, em teores baixos, adições como EFN possuem reatividade pozolânica suficiente para compensar a menor fração de cimento, confirmando-se como alternativa sem perda de resistência à compressão a longo prazo (Fode; Chande Jande; Kivevele, 2023; Miah et al., 2023).

Figura 73 – Resistência a compressão média dos concretos avaliados.



Fonte: Autor

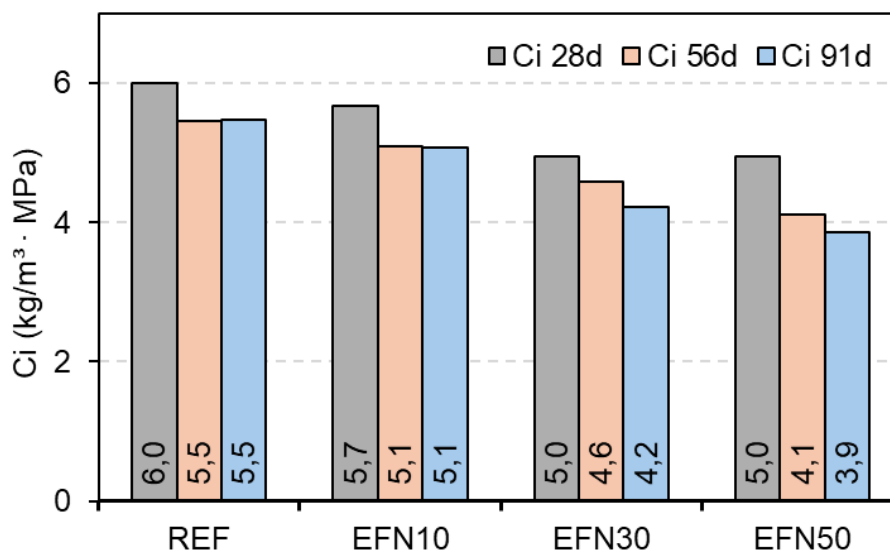
Segundo, o traço FIL30 apresentou as menores resistências à compressão em todas as idades avaliadas, correspondendo a sempre cerca de 70% dos valores obtidos para o traço de referência. Tal desempenho confirma o caráter essencialmente inerte do fíler calcário em elevadas taxas de substituição.

Por fim, o aumento de substituição de EFN intensifica à queda de resistência inicial, mas o ganho relativo com a idade é maior (Chi et al., 2023; Parron-Rubio et al., 2019). Com 30% de substituição (EFN30) a resistência a compressão reduz em aproximadamente 15% aos 28 dias, mas essa diferença diminui para 9% aos 91 dias (com 54MPa de resultado) em comparação com REF, evidenciando a reatividade tardia da escória. Já a substituição de 50% (EFN50) causou perda expressiva na primeira idade analisada (32,8MPa, 42%), porém o incremento de 10MPa aos 91 dias confirma o caráter progressivo das reações da EFN, também observado por Ahmed et al. (2024) em altos teores de incorporações de escória. Ainda assim, o EFN50 permanece na idade final, com a mesma resistência mecânica de FIL30, destacando uma contribuição química da EFN apesar dos diferentes níveis de substituições entre FIL30 e EFN50.

Essas conclusões são coerentes com os agrupamentos do Tukey por idade, que preservam uma hierarquia geral. REF e EFN10 permanecem em uma mesma família superior, EFN30 isoladamente ocupa faixa a intermediária e a maior substituição (EFN50) juntamente com FIL30 apresentam os menores níveis de resistência apesar de uma pequena diferença aos 28 dias, aos 56 e 91 dias EFN50 e FIL30 unem-se estatisticamente no mesmo agrupamento de menor resistência à compressão. A análise estatística completa pode ser conferida no Apêndice C-5.

Para quantificar o desempenho do ligante, foi adotado o parâmetro de índice de cimento (C_i) expresso em $\text{kg/m}^3 \cdot \text{MPa}$ e apresentado na Figura 74, observando apenas as incorporações REF e as de EFN. Esse indicador, baseados nos estudos de Damineli et al. (2010) e Pelisser, Vieira e Bernardin (2018), representa a quantidade apenas de cimento necessário por metro cúbico de concreto para se obter um incremento de 1 MPa na resistência à compressão.

Figura 74 – Índice de cimento (Ci) de REF e traços com EFN.



Fonte: Autor

Os valores de Ci indicam que a incorporação de EFN reduz o consumo específico de cimento por unidade de resistência, aumentando a eficiência do ligante em relação ao REF. Além disso, a queda de Ci torna-se mais pronunciada com o aumento do teor de substituição e com a idade, especialmente em EFN30 e EFN50, que continuam reduzindo de 56 para 91 dias, enquanto o REF tende à estabilização. Esse comportamento reforça a contribuição tardia da EFN e densificação microestrutural, podendo assim manter propriedades mecânicas similares ao concreto convencional (Qi et al., 2020), demonstrando também o potencial do material para elevar a ecoeficiência do concreto e reduzir a demanda de clínquer.

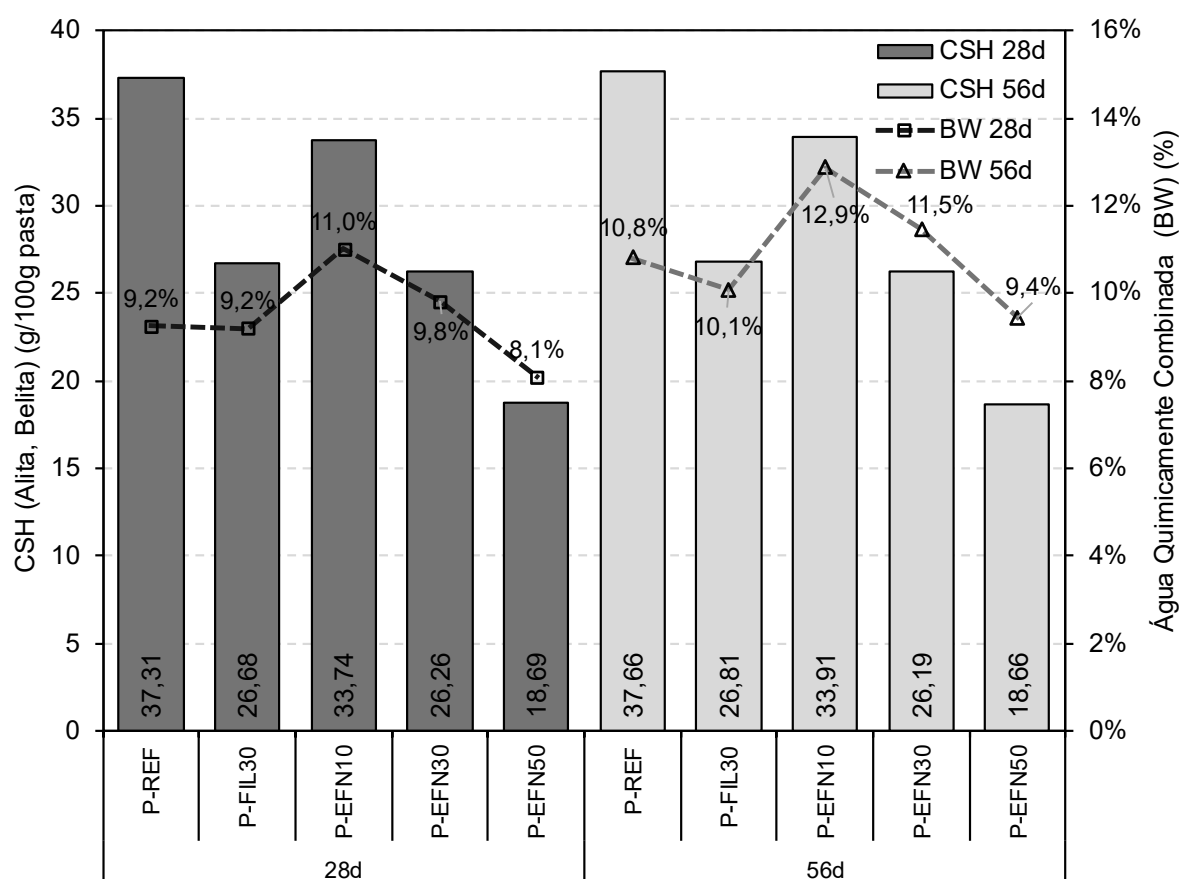
4.11 Análise Microestrutural em Pastas

As fases anidras (Alita e Belita) remanescentes nas pastas, quando quantificadas por DRX com refinamento de Rietveld, possibilitou estimar estequiometricamente, o teor de C-S-H formado pela hidratação primária das pastas, os valores são apresentados na Figura 75 e em conjunto com a água quimicamente combinada (BW) obtida por termogravimetria (TG). Aos 56 dias, os teores estimados de C-S-H mantiveram-se muito próximos aos observados aos 28 dias, o que indica que a hidratação primária já se encontrava, em maior parte, consolidada aos 28 dias. Além disso, a redução do C-S-H nas misturas com substituição, quando comparadas

entre si na mesma idade, pode ser atribuída predominantemente ao efeito de diluição imposto pelas adições.

Em contraste, a água quimicamente combinada (BW) aumenta de 28 para 56 dias em todas as composições, com incrementos mais pronunciados nas misturas com EFN, superando P-REF e P-FIL30. Este comportamento revela a formação de produtos hidratados secundários e tardios, que não são contemplados pelo C-S-H calculado apenas a partir da alita e belita, atribuível ao consumo de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pela fase amorfa da EFN, gerando C-S-H suplementar (Akbar; Kodur; Liew, 2021; Gallucci; Zhang; Scrivener, 2013; Ma et al., 2025; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2024).

Figura 75 - Teor de C-S-H e água quimicamente combinada nas pastas aos 28 e 56 dias.

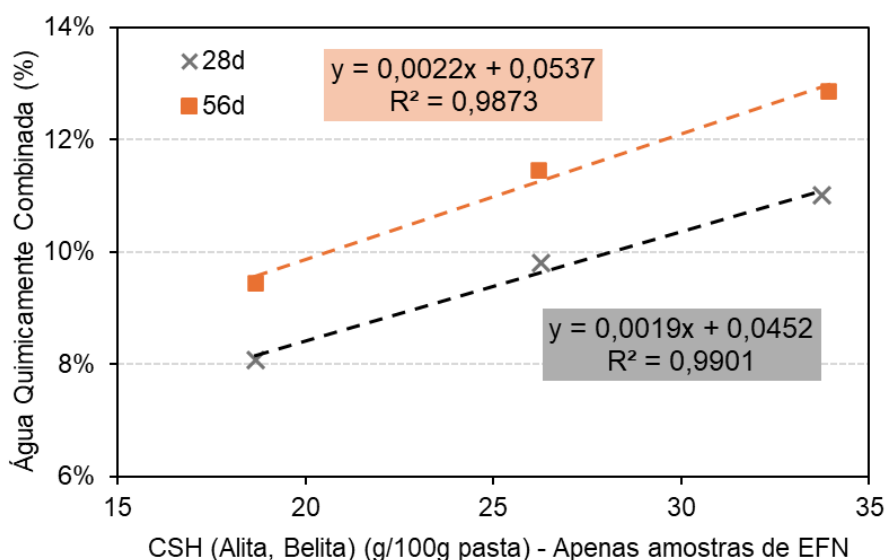


Fonte: Autor

A Figura 76 explora essa relação apenas para amostras com EFN, mostrando correlações lineares muito fortes entre C-S-H primário e BW aos 28d e 56d. O deslocamento vertical da reta de 56d acima da de 28d indica que, para o mesmo C-S-H primário, há mais água ligada aos 56d, evidenciando continuidade das reações

da EFN provavelmente envolvendo o consumo de portlandita e a formação de fases hidratadas adicionais (Guan et al., 2021a), que podem não ser capturadas pelo C-S-H primário estimado a partir de alita e belita residuais. Tais implicações convergem com os resultados de resistência mecânica, VPP, transportes iônicos e carbonatação.

Figura 76 – Correlação entre C-S-H e BW apenas de amostras EFN.



Fonte: Autor

Ainda, observando FRX de caracterização do material, a razão molar Ca/Si da EFN é aproximadamente 0,05, esse valor é muito inferior à faixa típica do C-S-H de pastas de cimento ($\text{Ca/Si} = 1,2$ a $2,1$) (Casar et al., 2023; Cuesta et al., 2021; Scrivener, 2016), o que indica que a EFN não aporta cálcio suficiente para formação de C-S-H. Assim, a evolução microestrutural em matrizes cimentícias decorre da fase amorfa silicosa da própria EFN, que consome a portlandita (CH) liberada na hidratação do cimento e gera produtos hidratados tardios (Laniese et al., 2024; Lemonis et al., 2015).

5 CONCLUSÕES

A análise integrada entre caracterização da Escória de Ferroníquel e a avaliação do desempenho dos concretos, confirma o potencial desse resíduo como um Material Cimentício Suplementar promissor, apresentando os seguintes achados principais:

1. Reatividade Pozolânica e Microestrutura: A EFN, caracterizada por uma baixa razão molar Ca/Si e uma fase amorfa silicosa significativa, atua como um agente pozolânico tardio. Esta reatividade secundária consome portlandita e gera produtos hidratados suplementares, levando a um refinamento microestrutural, especialmente com o avanço do tempo de cura.

2. A incorporação da EFN resultou em melhorias graduais e contínuas na resistência à penetração e à migração de íons cloreto, com desempenho mais pronunciado nas idades avançadas, o que reforça o caráter tardio de sua atuação na matriz cimentícia. Tais resultados foram acompanhados pela redução do volume de poros permeáveis, pelo aumento da resistividade elétrica e pela diminuição dos parâmetros associados ao transporte iônico, como a carga total passante e o coeficiente de migração não estacionário. Esse conjunto de evidências indica que a EFN favoreceu o refinamento microestrutural e a descontinuidade da rede porosa, aumentando a capacidade do concreto de resistir ao ingresso de cloretos.

3. Resistência Mecânica e Eficiência: O uso da EFN em baixo teor (EFN10) não compromete a resistência à compressão a longo prazo, atingindo valores próximos ao concreto de referência (REF) aos 91 dias. Embora teores mais altos (EFN30 e EFN50) causem quedas iniciais, o ganho relativo de resistência com a idade é maior. A EFN reduz significativamente o Índice de Cimento (C_i), reforçando seu potencial como MCS.

4. Limitação à Carbonatação: A substituição de cimento pela EFN, especialmente em maiores teores, elevou a sensibilidade à carbonatação acelerada, resultando em maiores profundidades de carbonatação (d_k) em comparação ao concreto de referência. Este efeito é atribuído principalmente à diluição do clínquer e à consequente redução da reserva alcalina, porém a densificação tardia mitiga parcialmente o efeito. Quando comparado ao concreto contendo fíler calcário, o concreto contendo EFN, ambos contendo o mesmo teor de substituição (30%),

apresentou menor profundidade de carbonatação em todas as idades e maior redução de d_k com a cura (de 18,5 para 15,0 mm), enquanto FIL30 atuou predominantemente por efeito físico e manteve valores de d_k mais altos e pouco sensíveis ao tempo.

Diante do exposto, a EFN mostrou forte potencial como MCS, elevando a durabilidade por reações pozolânicas tardias. Dosagens baixas ($\leq 10\%$) mantêm a resistência à compressão próxima a concretos sem adições em idades avançadas, mas os maiores ganhos de durabilidade aparecem com incorporações $\geq 30\%$, embora exija atenção especial em relação à susceptibilidade à carbonatação.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Dentre as perspectivas de continuidade desta pesquisa, destaca-se a necessidade de:

- Avaliar idades mais avançadas (180, 365 dias ou superiores), para verificar se os ganhos tardios de reatividade da EFN continuam se refletindo em resistividade, transporte de cloretos e resistência mecânica.
- Investigar estratégias de mitigação da carbonatação em concretos com maiores teores de EFN, como ajuste da relação a/agl ou uso combinado com outras adições. Ou mesmo estudar adição direta de $Ca(OH)_2$ no compósito visando buscando combinar os ganhos frente a cloretos com melhor controle da carbonatação.
- Explorar o potencial desses compósitos em abordagens relacionadas à captura de carbono, tanto para fins de cura carbonatante quanto para avaliação do sequestro de CO_2 ao longo do ciclo de vida do material.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. **AASHTO T 358 - Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.** , 2021.

ADEGOKE, Hussein Adedoyin; IKUMAPAYI, Catherine Mayowa. Effects of induction furnace slag on the durability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 419, p. 135263, 15 mar. 2024.

AHMAD, Jawad *et al.* A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production. **Sustainability**, v. 14, n. 14, p. 8783, 18 jul. 2022.

AHMAD, Shamsad. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. **Cement and Concrete Composites**, Concrete Durability, v. 25, n. 4, p. 459–471, 1 maio 2003.

AİTCİN, P. C. Portland cement. *In: Science and Technology of Concrete Admixtures.* [S.l.]: Elsevier, 2016. p. 27–51.

AKBAR, Arslan; KODUR, V. K. R.; LIEW, K. M. Microstructural changes and mechanical performance of cement composites reinforced with recycled carbon fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, p. 104069, 1 ago. 2021.

ALENGARAM, Ubagaram Johnson. Effect of Non-Traditional Supplementary Cementitious Materials in Concrete. *In: Integrative Approaches in Urban Sustainability - Architectural Design, Technological Innovations and Social Dynamics in Global Contexts.* [S.l.]: IntechOpen, 2023.

ALEXANDER, Mark Gavin. Service life design and modelling of concrete structures – background, developments, and implementation. **Revista ALCONPAT**, v. 8, n. 3, p. 224–245, 31 ago. 2018.

ALI, Mohsin *et al.* A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: lab and *in situ* investigation. **RSC Advances**, v. 14, n. 50, p. 37252–37271, 2024.

AMIN, Md Tanvir Ehsan *et al.* Chloride permeability and chloride-induced corrosion of concrete containing lithium slag as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 471, p. 140629, abr. 2025.

AMRAN, Mugahed *et al.* Slag uses in making an ecofriendly and sustainable concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 121942, 22 fev. 2021.

ANDERSSON, Anton *et al.* Ground granulated iron silicate slag as supplementary cementitious material: Effect of prolonged grinding and granulation temperature. **Cleaner Materials**, v. 10, p. 100209, dez. 2023.

ANGLO AMERICAN. **Plano Preliminar de Fechamento da Mina.** Barro Alto - GO: Anglo American, dez. 2020.

ARAÚJO, Emanuel Cunha; MACIOSKI, Gustavo; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias. Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs. **Construction and Building Materials**, v. 324, p. 126659, 21 mar. 2022.

ARTIOLI, Gilberto; BULLARD, Jeffrey W. Cement hydration: the role of adsorption and crystal growth. **Crystal Research and Technology**, v. 48, n. 10, p. 903–918, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ, 2018b.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, RJ, 2023a.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

_____. **NBR 9833**: Concreto Fresco: Determinação Da Massa Específica, Do Rendimento E Do Teor De Ar Pelo Método Gravimétrico. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

_____. **15900-1**: Água para amassamento do concreto parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2018a.

_____. **NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, RJ, 2020.

_____. **NBR 16917**: Agregado graúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, 2021b.

_____. **NBR 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, RJ, 2021a.

_____. **NBR 16974**: Agregados - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, RJ, 2022c.

_____. **NBR 17053**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, RJ, 2022a.

_____. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2022b.

_____. **NBR 17086-4**: Cimento Portland — Análise química. Rio de Janeiro, RJ, 2023b.

_____. **NBR 17086-6: Cimento Portland — Análise química.** Rio de Janeiro, RJ, 2023c.

_____. **NBR 17212: Solos - Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm.** Rio de Janeiro, RJ, 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.** PA .ASTM International, 2025.

AZARSA, Pejman; GUPTA, Rishi. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 1–30, 2017.

AZEVEDO, Afonso R. G. de *et al.* Possibilities for the application of agro-industrial wastes in cementitious materials: A brief review of the Brazilian perspective. **Cleaner Materials**, v. 3, p. 100040, 1 mar. 2022.

BADR, Joanna *et al.* Temperature Effect on Electrical Resistivity Measurement Using an Embedded Sensor to Estimate Concrete Water Content. **Applied Sciences**, v. 12, n. 19, p. 9420, jan. 2022.

BAGHERI, Ali Reza; ZANGANEH, Hamed; MOALEMI, Mohamad Mehdi. Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 5, p. 663–670, maio 2012.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção 1.** Rio de Janeiro: LTC, 2008. v. 1

BELAÏD, Fateh. How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 15, p. 200084, 1 nov. 2022.

BERNAL, Susan A. *et al.* Characterization of supplementary cementitious materials by thermal analysis. **Materials and Structures**, v. 50, n. 1, p. 26, 10 ago. 2016.

BIELEN, Hanne *et al.* Behaviour of commercial cementitious repair mortars under various environmental conditions: A resistivity-based approach. **Construction and Building Materials**, v. 472, p. 140929, 18 abr. 2025.

BOUASRIA, Manal *et al.* Insight into the partial replacement of cement by ferronickel slags from New Caledonia. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 26, n. 8, p. 3662–3680, 11 jun. 2022.

BREILLY, Damien *et al.* Origin and industrial applications of lignosulfonates with a focus on their use as superplasticizers in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124065, set. 2021.

CASAR, Ziga *et al.* Atomic-Level and Surface Structure of Calcium Silicate Hydrate Nanofolds. **The Journal of Physical Chemistry. C, Nanomaterials and Interfaces**, v. 127, n. 37, p. 18652–18661, 8 set. 2023.

CASCUDO, Oswaldo. **O Controle Da Corrosão De Armaduras Em Concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. [S.l.]: PINI / UFG, 1997.

CHI, Lin *et al.* Recycling of ferronickel slag tailing in cementitious materials: Activation and performance. **Science of The Total Environment**, v. 861, p. 160706, fev. 2023.

CHIDIAC, S. E.; SHAFIKHANI, M. Electrical resistivity model for quantifying concrete chloride diffusion coefficient. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, p. 103707, 1 out. 2020.

CHOI, Se-Jin *et al.* Effect of Fly Ash on Compressive Strength, Drying Shrinkage, and Carbonation Depth of Mortar with Ferronickel-Slag Powder. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1037, jan. 2021.

CHOI, Young Cheol; CHOI, Seongcheol. Alkali-silica reactivity of cementitious materials using ferro-nickel slag fine aggregates produced in different cooling conditions. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 279–287, 30 nov. 2015.

CONCIATORI, David; SADOUKI, Hamid; BRÜHWILER, Eugen. Capillary suction and diffusion model for chloride ingress into concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1401–1408, 1 dez. 2008.

CRUNDWELL, Frank K. *et al.* **Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2011.

CUESTA, Ana *et al.* Local structure and Ca/Si ratio in C-S-H gels from hydration of blends of tricalcium silicate and silica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 143, p. 106405, 1 maio 2021.

CUI, Hongzhi *et al.* Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 522–527, 15 set. 2015.

DALVI, Ashok D. *et al.* **The Past and the Future of Nickel Laterites**. [S.l.: S.n.].

DE MATOS, P. R. *et al.* Strategies for XRD quantitative phase analysis of ordinary and blended Portland cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 131, p. 104571, 1 ago. 2022.

DEHWAH, Osamah H. A.; HAMIDANE, H'mida; XI, Yunping. Characterization of effective moisture diffusivity based on pore structure of concrete. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 18450, 8 ago. 2024.

DOVIDAUSKAS, Sergio *et al.* Mapeamento da qualidade da água de abastecimento público no nordeste do estado de São Paulo (Brasil). **Vigilância Sanitária em Debate**, v. 5, n. 2, p. 53, 31 maio 2017.

DU, Tao *et al.* Chemical composition of calcium-silicate-hydrate gels: Competition between kinetics and thermodynamics. **Physical Review Materials**, v. 3, n. 6, p. 065603, 17 jun. 2019.

DWECK, J. *et al.* Evaluating cement hydration by non-conventional DTA; An Application to Waste Solidification. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 71, n. 3, p. 821–827, mar. 2003.

ELSALAMAWY, Mona; MOHAMED, Ashraf R.; KAMAL, Eslam M. The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, n. 4, p. 1257–1264, 1 dez. 2019.

FREIRE, L. *et al.* Study of passive films formed on mild steel in alkaline media by the application of anodic potentials. **Materials Chemistry and Physics**, v. 114, n. 2, p. 962–972, 15 abr. 2009.

FUHAID, Abdulrahman Fahad Al; NIAZ, Akbar. Carbonation and Corrosion Problems in Reinforced Concrete Structures. **Buildings**, v. 12, n. 5, p. 586, maio 2022.

GALLUCCI, E.; ZHANG, X.; SCRIVENER, K. L. Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H). **Cement and Concrete Research**, v. 53, p. 185–195, 1 nov. 2013.

GAO, Tianming *et al.* Analysis of material flow and consumption in cement production process. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 553–565, 20 jan. 2016.

GHODS, P. *et al.* Nano-scale study of passive films and chloride-induced depassivation of carbon steel rebar in simulated concrete pore solutions using FIB/TEM. **Cement and Concrete Research**, v. 47, p. 55–68, 1 maio 2013.

GHOSH, Pratanu; TRAN, Quang. Correlation Between Bulk and Surface Resistivity of Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 9, n. 1, p. 119–132, 1 mar. 2015.

GIERGICZNY, Zbigniew. Fly ash and slag. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105826, 1 out. 2019.

GJØRV, Odd E. **Durability design of concrete structures in severe environments**. Second edition ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **GCCA Policy Document on Blended Cements and Supplementary Cementitious Materials**. United Kingdom: GCCA, 2024.

GUAN, Q. *et al.* Recycling blast furnace ferronickel slag as a replacement for paste in mortar: Formation of carboaluminate, reduction of white portland cement, and increase in strength. **Materials**, v. 14, n. 10, 2021a.

GUAN, Qingfeng *et al.* Utilizing blast furnace ferronickel slag as paste replacement to reduce white Portland cement content and improve performance of mortar. **Advances in Bridge Engineering**, v. 2, n. 1, p. 18, 6 maio 2021b.

GUIMARÃES, Carolina das Graças Graciano. **Caracterização Tecnológica de Minério de Níquel Laterítico**. Belo Horizonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG), out. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/items/3191448c-f54a-4fe2-aa1e-7880b72798cc>>

GUPTA, Sanchit; CHAUDHARY, Sandeep. State of the art review on supplementary cementitious materials in India – II: Characteristics of SCMs, effect on concrete and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 357, p. 131945, 10 jul. 2022.

HASAN, Tawsif Mohammad; ALLENA, Srinivas; GILBERT, Levi. Rapid chloride penetration test: An evaluation of corrosion resistance in ultra-high performance concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 82, p. 108317, abr. 2024.

HELENE, Paulo R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986.

High Throughput system of Paineira beamline – Rápido. Vídeo. 1min28s. Publicado pelo canal LNLS. 12 de jun. 2024. Disponível em https://www.youtube.com/watch?v=QsBIEcOM_1M. Acesso em 10 out. 2025.

HILLS, Thomas P. *et al.* Statistical analysis of the carbonation rate of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 72, p. 98–107, 1 jun. 2015.

HORNBOSTEL, Karla; LARSEN, Claus K.; GEIKER, Mette R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 60–72, maio 2013.

HOSAN, Anwar; SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed. Compressive strength development and durability properties of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano-CaCO₃. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 10, p. 1310–1322, 1 jan. 2021.

HUANG, Chu Long *et al.* Substance flow analysis for nickel in mainland China in 2009. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, n. 1, p. 450–458, 2014.

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

HUET, Bruno *et al.* Electrochemical behavior of mild steel in concrete: Influence of pH and carbonate content of concrete pore solution. **Electrochimica Acta**, v. 51, n. 1, p. 172–180, 5 out. 2005.

HUSSAIN, Shaik; BHUNIA, Dipendu; SINGH, S. B. Comparative study of accelerated carbonation of plain cement and fly-ash concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 26–31, 1 mar. 2017.

IBRAHIM, Mustapha; ISSA, Mohsen. Evaluation of chloride and water penetration in concrete with cement containing limestone and IPA. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 278–288, dez. 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1920-12: Testing of concrete — Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete**. Switzerland, 2015.

JAMBOR, J. Pore structure and strength development of cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 6, p. 948–954, nov. 1990.

JIANG, Yanjun *et al.* Synergistic Activation of Electric Furnace Ferronickel Slag by Mechanical Grinding and Chemical Activators to Prepare Cementitious Composites. **Materials**, v. 17, n. 6, p. 1247, jan. 2024.

JOHN, Elisabeth; LOTHENBACH, Barbara. Cement hydration mechanisms through time – a review. **Journal of Materials Science**, v. 58, n. 24, p. 9805–9833, 1 jun. 2023.

JOSEPH, Shiju; CIZER, Özlem. Hydration of Hybrid Cements at Low Temperatures: A Study on Portland Cement-Blast Furnace Slag—Na₂SO₄. **Materials**, v. 15, n. 5, p. 1914, jan. 2022.

JUENGER, Maria C. G.; SNELLINGS, Ruben; BERNAL, Susan A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 257–273, 1 ago. 2019.

JULIO-BETANCOURT, G. A.; HOOTON, R. D. Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p. 1007–1015, jun. 2004.

KATSIOTIS, N. S. *et al.* Utilization of Ferronickel Slag as Additive in Portland Cement: A Hydration Leaching Study. **Waste and Biomass Valorization**, v. 6, n. 2, p. 177–189, 1 abr. 2015.

KEWALRAMANI, Manish; KHARTABIL, Ahmad. Porosity Evaluation of Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials for Durability Assessment through Volume of Permeable Voids and Water Immersion Conditions. **Buildings**, v. 11, n. 9, p. 378, set. 2021.

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

KNIGHT, Kelli A.; CUNNINGHAM, Patrick R.; MILLER, Sabbie A. Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 139, p. 105049, 1 maio 2023.

LANIESSE, Priscillia *et al.* Characterization of Carbonated and Raw Ferronickel Slags as Cementing Materials. **Construction Materials**, v. 4, n. 3, p. 524–542, set. 2024.

LAVAGNA, Luca; NISTICÒ, Roberto. An Insight into the Chemistry of Cement—A Review. **Applied Sciences**, v. 13, n. 1, p. 203, jan. 2023.

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

LI, Guanghui *et al.* Beneficiation of nickeliferous laterite by reduction roasting in the presence of sodium sulfate. **Minerals Engineering**, v. 32, p. 19–26, maio 2012.

LI, Guanlei *et al.* Fly Ash Application as Supplementary Cementitious Material: A Review. **Materials**, v. 15, n. 7, p. 2664, 5 abr. 2022.

LI, Xuerun; SCRIVENER, Karen L. Quantification of nano-crystalline C-S-H in hydrated tricalcium silicate, Portland cement and fly ash cement using PONKCS method. **Cement and Concrete Research**, v. 191, p. 107837, 1 maio 2025.

LIBÂNO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas-SP: Átomo, 2010.

LIU, Tong *et al.* Mineral phase reconstruction mechanism of forsterite refractory prepared from ferronickel slag. **Construction and Building Materials**, v. 464, p. 140191, 21 fev. 2025.

LOPES LIMA, Paulo R. *et al.* Potentialities of cement-based recycled materials reinforced with sisal fibers as a filler component of precast concrete slabs. *In*: **Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**. [S.l.]: Elsevier, 2017. p. 399–428.

LOTENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, dez. 2011.

LOTENBACH, Barbara; WINNEFELD, Frank. Thermodynamic modelling of cement hydration: Portland cements – blended cements – calcium sulfoaluminate cements. *In*: PÖLLMANN, Herbert (Org.). **Cementitious Materials**. [S.l.]: De Gruyter, 2017. p. 103–144.

LOUISIANA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT (DOTD). **DOTD TR 233: Test Method for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. Louisiana (La.), 2011.

LU, Bao *et al.* Effect of temperature on CO₂ curing, compressive strength and microstructure of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 157, p. 106827, 1 jul. 2022.

MA, Yuefeng *et al.* Heating-induced transformations in calcium silicate hydrate (C-S-H): In-situ investigations of composition, structure, and morphology. **Cement and Concrete Research**, v. 190, p. 107819, 1 abr. 2025.

MARCHON, D.; FLATT, R. J. Mechanisms of cement hydration. *In*: **Science and Technology of Concrete Admixtures**. [S.l.]: Elsevier, 2016. p. 129–145.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 3, p. 1476–1484, 1 mar. 2009.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. *In*: TUTIKIAN, Bernardo *et al.* (Orgs.). **CONCRETO: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo, SP: Ibracon, 2022. v. I.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo Alves De; MUNHOZ, Guilherme Da Silva; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias De. Correlations between water absorption, electrical

resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan. **Revista ALCONPAT**, v. 9, n. 2, p. 152–166, 30 abr. 2019.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **CONCRETO: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MERAH, Ahmed. Methods of concrete accelerated carbonation test: a review. **Discover Civil Engineering**, v. 1, n. 1, p. 53, 19 ago. 2024.

MOHAMMED, Siline; SAFIULLAH, Omary. Optimization of the SO₃ content of an Algerian Portland cement: Study on the effect of various amounts of gypsum on cement properties. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 362–370, mar. 2018.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Impact of accelerated carbonation on OPC cement paste blended with fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 226–236, 1 jan. 2015.

MORRIS, W.; MORENO, E. I.; SAGÜÉS, A. A. Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 12, p. 1779–1787, 1 dez. 1996.

MOUSAVINEZHAD, Seyedsaleh; NOZARI, Shahin; NEWTON, Craig M. Classifying Concrete Permeability Using Rapid Chloride Permeability and Surface Resistivity Tests: Benefits, Limitations, and Predictive Models—A State-of-the-Art Review. **Buildings**, v. 15, n. 23, p. 4216, jan. 2025.

MUDD, Gavin M. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. **Ore Geology Reviews**, v. 38, n. 1–2, p. 9–26, 1 out. 2010.

NASSIRI, Somayeh *et al.* Opportunities for Supplementary Cementitious Materials from Natural Sources and Industrial Byproducts: Literature Insights and Supply Assessment. **Buildings**, v. 15, n. 17, p. 3099, jan. 2025.

NAZARI, Ali; AZIMZADEGAN, Tohid. Prediction the effects of ZnO₂ nanoparticles on splitting tensile strength and water absorption of high strength concrete. **Materials Research**, v. 15, p. 440–454, 2012.

NDAHIRWA, Désiré *et al.* The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits: A review. **Cleaner Materials**, v. 5, p. 100123, 1 set. 2022.

NETO, Walter Jacobelis *et al.* A systematic review of ferronickel slag in cement-based materials as binder and aggregate. **Revista Sítio Novo**, v. 9, p. e1638–e1638, 29 abr. 2025.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: BOOKMAN EDITORA LTDA, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: BOOKMAN EDITORA LTDA, 2013.

NGUYEN, Long Khanh *et al.* Mechanical properties and service life analysis of high strength concrete using different silica fume contents in marine environment in Vietnam. **Journal of Engineering Research**, v. 12, n. 2, p. 44–53, 1 jun. 2024.

NILIMAA, Jonny. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. **Developments in the Built Environment**, v. 15, p. 100177, 1 out. 2023.

NILSSON, L.; NGO, M. H.; GJØRV, O. E. High-Performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg. *In*: 1998.

NILSSON, Lars-Olof. Durability concept; pore structure and transport processes. *In*: NEWMAN, John Brian; CHOO, B. S. (Orgs.). **Advanced concrete technology**. Oxford, England Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2003.

NT BUILD 492. **NT Build 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride Migration Coefficient from non-steady-state migration experiments**. NORDTEST method, 1999.

NURJAMAN, Fajar *et al.* Study of selective reduction in lateritic nickel ore: Saprolite versus limonite. *In*: Elsevier Ltd, 2021.

NURUZZAMAN, M.; KURI, J. C.; SARKER, P. K. Strength, permeability and microstructure of self-compacting concrete with the dual use of ferronickel slag as fine aggregate and supplementary binder. **Construction and Building Materials**, v. 318, 2022.

NURUZZAMAN, Md *et al.* Rheological behaviour, hydration, and microstructure of self-compacting concrete incorporating ground ferronickel slag as partial cement replacement. **Journal of Building Engineering**, v. 68, 1 jun. 2023b.

NURUZZAMAN, Md. *et al.* Microstructure and residual properties of raw and ground ferronickel slag incorporated self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 362, p. 129707, 2 jan. 2023a.

NWANKWO, Chinyere O. *et al.* High volume Portland cement replacement: A review. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 120445, 10 nov. 2020.

ODOKO, Boyce A. Cement, Agent of Economic Growth. **J. of Environmental Science and Resources Management**, v. 11, n. 1, p. 12–20, 2019.

PANESAR, Daman K.; ZHANG, Runxiao. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118866, ago. 2020.

PANG, Lang *et al.* Review on the Application of Supplementary Cementitious Materials in Self-Compacting Concrete. **Crystals**, v. 12, n. 2, p. 180, fev. 2022.

PARRON-RUBIO, María Eugenia *et al.* Slag Substitution as a Cementing Material in Concrete: Mechanical, Physical and Environmental Properties. **Materials**, v. 12, n. 18, p. 2845, 4 set. 2019.

PEDER FLATEN, Trond. A nation-wide survey of the chemical composition of drinking water in Norway. **Science of The Total Environment**, v. 102, p. 35–73, 1 fev. 1991.

PEYS, Arne *et al.* High-temperature slag engineering in pursuit of effective mineral carbonation of pyroxene-rich ferronickel slag. **Journal of CO2 Utilization**, v. 95, p. 103077, 1 maio 2025.

POLDER, Rob B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 2–3, p. 125–131, mar. 2001.

POURSAEE, Amir. Corrosion of steel in concrete structures. *In*: **Corrosion of Steel in Concrete Structures**. [S.l.]: Elsevier, 2016. p. 19–33.

PRASETYO, A. B. *et al.* Magnesium extraction of ferronickel slag processed by alkali fusion and hydrochloric acid leaching. **Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy**, v. 57, n. 2, p. 225–233, 2021.

PRASETYO, A. B. *et al.* Thermal characteristics of ferronickel slag on roasting process with addition of sodium carbonate (Na_2CO_3). **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 541, n. 1, p. 012037, 1 jun. 2019.

PUSHPAN, Soorya *et al.* Strength and Microstructure Assessment of Partially Replaced Ordinary Portland Cement and Calcium Sulfoaluminate Cement with Pozzolans and Spent Coffee Grounds. **Materials**, v. 16, n. 14, p. 5006, jan. 2023.

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

RAMEZANIANPOUR, Ali Akbar *et al.* Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2472–2479, 1 maio 2011.

RIBEIRO, Daniel Vêras; CUNHA, Manuel Paulo Teixeira. Técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado. *In*: RIBEIRO, Daniel Vêras (Org.). **Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1ed. ed. [S.l.]: Elsevier, 2014.

RIETVELD, Hugo M. The Rietveld method. **Physica Scripta**, v. 89, n. 9, p. 098002, 1 set. 2014.

RILEM-CPC. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, v. 21, n. 6, p. 453–455, nov. 1988.

RIVETTI, Marianna Luna Sousa *et al.* Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete. *In*: ALIOFKHAZRAEI, Mahmood (Org.). **Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications**. [S.l.]: InTech, 2018.

ROBLES, Kevin Paolo V.; YEE, Jurng-Jae; KEE, Seong-Hoon. Electrical Resistivity Measurements for Nondestructive Evaluation of Chloride-Induced Deterioration of Reinforced Concrete—A Review. **Materials**, v. 15, n. 8, p. 2725, jan. 2022.

RODRIGUEZ-NAVARRO, Carlos *et al.* Carbonation mechanisms and kinetics of lime-based binders: An overview. **Cement and Concrete Research**, v. 173, p. 107301, 1 nov. 2023.

SAFIUDDIN, Md.; HEARN, Nataliya. Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 1008–1013, 1 maio 2005.

SAHA, Ashish Kumer; KHAN, M. N. N.; SARKER, Prabir Kumar. Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, p. 10–24, 1 jul. 2018.

SAHA, Ashish Kumer; SARKER, Prabir Kumar. Compressive Strength of Mortar Containing Ferronickel Slag as Replacement of Natural Sand. *In*: Elsevier Ltd, 2017.

SAHOO, Smita; PARHI, Pravat Kumar; CHANDRA PANDA, Bikash. Durability properties of concrete with silica fume and rice husk ash. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, p. 100067, jun. 2021.

SANJUÁN, M. A.; ANDRADE, C.; CHEYREZY, M. Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. **Advances in Cement Research**, v. 15, n. 4, p. 171–180, out. 2003.

SANJUÁN, Miguel Ángel *et al.* Chloride Diffusion in Concrete Made with Coal Fly Ash Ternary and Ground Granulated Blast-Furnace Slag Portland Cements. **Materials**, v. 15, n. 24, p. 8914, 13 dez. 2022.

SASANIPOUR, Hossein; ASLANI, Farhad; TAHERINEZHAD, Javad. Chloride ion permeability improvement of recycled aggregate concrete using pretreated recycled aggregates by silica fume slurry. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121498, 8 fev. 2021.

SCRIVENER, Karen *et al.* Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, Report of UNEP SBCI WORKING GROUP ON LOW-CO₂ ECO-EFFICIENT CEMENT-BASED MATERIALS. v. 114, p. 49–56, 1 dez. 2018.

SCRIVENER, Karen L.; NONAT, André. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**, Special Issue: 13th International Congress on the Chemistry of Cement. v. 41, n. 7, p. 651–665, 1 jul. 2011.

SCRIVENER, Karen. Electron microscopy. *In*: SCRIVENER, Karen; SNELLINGS, Ruben; LOTHENBACH, Barbara (Orgs.). **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016.

SHAH, Vineet; BISHNOI, Shashank. Carbonation resistance of cements containing supplementary cementitious materials and its relation to various parameters of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 219–232, 30 jul. 2018.

SHI, Xianming *et al.* Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 125–138, maio 2012.

SILVA, Rui Vasco *et al.* Prediction of Chloride Ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete. **Materials Research**, v. 18, n. 2, p. 427–440, abr. 2015.

SILVA, Turibio José da. Mecanismos de Transporte de Massa no Concreto. *In*: TUTIKIAN, Bernardo *et al.* (Orgs.). **CONCRETO: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo, SP: Ibracon, 2022. v. II.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2022**. São Paulo. 2022.

SKIBSTED, Jørgen; SNELLINGS, Ruben. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105799, 1 out. 2019.

SNELLINGS, Ruben *et al.* RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. **Materials and Structures**, v. 51, n. 6, p. 172, dez. 2018.

SNELLINGS, Ruben. X-ray powder diffraction applied to cement. *In*: SCRIVENER, Karen; SNELLINGS, Ruben; LOTHENBACH, Barbara (Orgs.). **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016.

SNELLINGS, Ruben; SURANENI, Prannoy; SKIBSTED, Jørgen. Future and emerging supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 171, p. 107199, 1 set. 2023.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. [S.l.]: PINI, 1998.

SPOSITO, Ricarda; DÜRR, Isabel; THIENEL, Karl-Christian. Lignosulfonates in Cementitious Systems Blended with Calcined Clays. *In*: SP-326: DURABILITY AND SUSTAINABILITY OF CONCRETE STRUCTURES (DSCS-2018). **SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018)**. American Concrete Institute, 2018.

SPRAGG, Robert *et al.* Factors that Influence Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2342, n. 1, p. 90–98, jan. 2013.

SUN, Jianwei; FENG, Jingjing; CHEN, Zhonghui. Effect of ferronickel slag as fine aggregate on properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 201–209, 10 maio 2019.

SUN, Xiaogang *et al.* Mechanical activation of steel slag to prepare supplementary cementitious materials: A comparative research based on the particle size distribution, hydration, toxicity assessment and carbon dioxide emission. **Journal of Building Engineering**, v. 60, p. 105200, nov. 2022.

SUPRIYA *et al.* Low-CO₂ emission strategies to achieve net zero target in cement sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 417, p. 137466, 10 set. 2023.

TAFFESE, Woubishet Zewdu; ESPINOSA-LEAL, Leonardo. A machine learning method for predicting the chloride migration coefficient of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 348, p. 128566, 19 set. 2022.

TANG, Huimin *et al.* Preparation of refractory materials from electric furnace ferronickel slag and blast furnace ferronickel slag: A comparison. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 3, p. 107929, 1 jun. 2022.

TIBBETTS, Caitlin M. *et al.* Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, p. 103491, 1 mar. 2020.

TUUTTI, Kyösti. **Corrosion of steel in concrete**. Doctoral Thesis (monograph)—[S.l.]: Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

URATANI, Joao M.; GRIFFITHS, Steve. A forward looking perspective on the cement and concrete industry: Implications of growth and development in the Global South. **Energy Research & Social Science**, v. 97, p. 102972, 1 mar. 2023.

VAN NOORT, R.; HUNGER, M.; SPIESZ, P. Long-term chloride migration coefficient in slag cement-based concrete and resistivity as an alternative test method. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 746–759, jul. 2016.

VISHAVKARMA, Arvind; KUMAR, Manoj; HARISH, Kizhakkumodom Venkatanarayanan. Influence of combined substitution of slag and fly ash in improving the pore structure and corrosion resistance of foam concrete mixtures used for reinforced concrete applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, p. e03449, 1 dez. 2024.

VOGLER, Nico *et al.* Alternative pH-indicators for determination of carbonation depth on cement-based concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 109, p. 103565, 1 maio 2020.

VON GREVE-DIERFELD, Stefanie *et al.* Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and Structures**, v. 53, n. 6, p. 136, dez. 2020.

WANG, Chong *et al.* Thermogravimetric analysis (TGA) for characterization of self-cementation of recycled concrete aggregates in pavement. **Thermochimica Acta**, v. 733, p. 179680, 1 mar. 2024.

WANG, Xuefang *et al.* Tailoring mechanical properties of alkali activated slag-electric furnace nickel slag composite system through Ca/Si and Si/Al ratios. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. e04635, 1 jul. 2025.

WARNER, A. E. M. *et al.* **JOM World Nonferrous Smelter Survey, Part III: Nickel: Laterite**. Journal of Metals, 2006.

WHITTINGTON, H. W.; MCCARTER, J.; FORDE, M. C. The conduction of electricity through concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 33, n. 114, p. 48–60, mar. 1981.

WILLIAMSON, Jon; ISGOR, O. Burkan. The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar. **Corrosion Science**, v. 106, p. 82–95, maio 2016.

WORRELL, Ernst *et al.* CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 26, n. 1, p. 303–329, nov. 2001.

XU, Qiulang *et al.* Factors Influencing Chloride Ion Diffusion in Reinforced Concrete Structures. **Materials**, v. 17, n. 13, p. 3296, jan. 2024.

YANNING, Song *et al.* Application of metallurgical ferronickel slag in building materials: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 96, p. 110632, 1 nov. 2024.

YOON, In-Seok. Comprehensive Approach to Calculate Oxygen Diffusivity of Cementitious Materials Considering Carbonation. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 1, p. 16, 21 fev. 2018.

YOON, Yong-Sik *et al.* Mechanical Performance and Shrinkage Behavior of Ultrahigh-Performance Concrete with Ferronickel Slag Under Various Curing Conditions. **Buildings**, v. 15, n. 20, p. 3670, jan. 2025.

YOU, Nanqiao *et al.* The influence of steel slag and ferronickel slag on the properties of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116614, dez. 2019.

ZEVGOLIS, Emmanouil N.; DASKALAKIS, Konstantinos A. The Nickel Production Methods from Laterites and the Greek Ferronickel Production among Them. **MDPI**, p. 104, 31 jan. 2022.

ZHANG, Yu *et al.* Hydration behavior and cementitious properties of steel slag: From an early age to a long-term. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e03066, 1 jul. 2024.

ZHAO, Piqi *et al.* Assessment of the quantitative accuracy of Rietveld/XRD analysis of crystalline and amorphous phases in fly ash. **Analytical Methods**, v. 9, n. 16, p. 2415–2424, 2017.

ZHENG, Shaojun *et al.* Effects of Water-to-Cement Ratio on Pore Structure Evolution and Strength Development of Cement Slurry Based on HYMOSTRUC3D and Micro-CT. **Applied Sciences**, v. 11, n. 7, p. 3063, jan. 2021.

ZHOU, Yuqi; SHI, Chunfang. Experimental study of electric furnace ferronickel slag as a supplementary cementitious material in massive high-strength concrete. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 8, p. 4983–4993, 1 abr. 2022

APÊNDICE A – CÓDIGO PYTHON

Código em Python para filtragem de dados. Bibliotecas necessárias “pandas” e “openpyxl”

```
import pandas as pd

def calcular_media_em_blocos():
    # Perguntar ao usuário o caminho e nome do arquivo de origem
    caminho_arquivo = input("Digite o caminho completo da pasta onde está o arquivo (sem a barra final): ")
    nome_arquivo = input("Digite o nome do arquivo (com extensão .xlsx): ")

    # Carregar o arquivo Excel especificado
    arquivo_origem = f"{caminho_arquivo}/{nome_arquivo}"
    df = pd.read_excel(arquivo_origem, engine='openpyxl')

    # Configurar os parâmetros de cálculo
    intervalo_linhas = 1800
    limite_linhas = 90000
    colunas = df.columns[1:20] # Colunas de B até T (index 1 até 20 excluindo 20)

    medias = []

    # Realizar o cálculo das médias em blocos de 1800 linhas
    for inicio in range(0, limite_linhas, intervalo_linhas):
        bloco = df.iloc[inicio:inicio+intervalo_linhas, 1:20]
    # Seleciona o bloco de linhas e colunas B até T
        media_bloco = bloco.mean() # Calcula a média
        medias.append(media_bloco.values) # Armazena o resultado

    # Criar um novo DataFrame com as médias
    df_medias = pd.DataFrame(medias, columns=colunas)

    # Perguntar onde salvar o arquivo final e o nome desejado
    caminho_destino = input("Digite o caminho da pasta onde deseja salvar o arquivo de saída (sem a barra final): ")
    nome_saida = input("Digite o nome do arquivo de saída (com extensão .xlsx): ")
    arquivo_saida = f"{caminho_destino}/{nome_saida}"

    # Salvar o DataFrame de médias em um novo arquivo Excel
    df_medias.to_excel(arquivo_saida, index=False, engine='openpyxl')

    print("Arquivo com as médias salvo com sucesso!")

# Executar a função
calcular_media_em_blocos()
```

APÊNDICE B – TESTE PILOTO CÓDIGO DE FILTRAGEM RCPT

A Tabela 24 exibe o cálculo comparativo entre os métodos para validação do código de filtragem de dados para carga passante no ensaio da ASTM C1202.

Tabela 24 – Diferença média entre métodos de cálculo de carga passante.

ID Corpo de Prova	A	B	Diferença		
	Q (Carga) - C Integral Sem filtro	Q (Carga) - C Fórmula Com Filtro	A-B	(A-B)/A	Média
CP1	3640	3638	2	0,06%	0,10%
CP2	3440	3440	1	0,02%	
CP3	4204	4206	-1	-0,03%	
CP4	4498	4474	24	0,53%	
CP5	3676	3669	7	0,18%	
CP6	3798	3803	-5	-0,13%	
CP7	4172	4167	6	0,13%	
CP8	4155	4159	-4	-0,09%	
CP9	4387	4387	0	0,00%	
CP10	4409	4410	-2	-0,03%	
CP11	5430	5409	21	0,38%	
CP12	4386	4382	3	0,07%	
CP13	5509	5492	17	0,30%	
CP14	4427	4417	10	0,24%	
CP15	4644	4637	7	0,14%	
CP16	5088	5094	-6	-0,12%	
CP17	3534	3526	8	0,23%	
CP18	4107	4107	0	-0,01%	
CP19	3506	3500	6	0,17%	
CP20	3924	3925	-1	-0,03%	

Fonte: Autor

APÊNDICE C – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A seguir, são apresentados os resultados completos das análises estatísticas realizadas, incluindo tabelas, testes e demais informações complementares que dão suporte às interpretações discutidas no corpo do trabalho. Para todos os cenários foi utilizado valores de 95% de confiabilidade, tanto para ANOVA de duas vias quanto para o teste post-hoc de Tukey.

É importante destacar que, nas tabelas de ANOVA, quando o Valor-p aparece como “0,000”, isso significa que o valor calculado é extremamente baixo (isto é, menor que o limite de arredondamento) e não erro de preenchimento, portanto, entende-se e indica significância estatística.

Apêndice. C - 1. Análise estatística resultados ASTM C1202 – RCPT

A análise de variância (ANOVA) de duas vias é mostrada na Tabela 25, sendo os fatores Teor e Idade, indicou efeito estatisticamente significativo para ambos os fatores principais isolados, bem como para a interação Teor × Idade (Valor-p < 0,05), demonstrando que a resposta é influenciada tanto pelo nível de incorporação quanto pelo tempo de cura e, majoritariamente, que o impacto da incorporação não é constante ao longo das idades.

Tabela 25 – ANOVA duas vias para RCPT.

Fonte	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Amostra (Teor)	50613758,9	4	12653439,7	95,2	0,0000
Idade	7906615,8	2	3953307,9	29,7	0,0000
Interação (Teor x Idade)	6587520,1	8	823440,0	6,2	0,0000
Idade	5979808,5	45	132884,6		

Fonte: Autor

Diante da interação significativa, a interpretação estatística correta requer o desdobramento por meio de comparações múltiplas dentro de cada idade por teste Tukey-HSD a 5% em cada idade conforme Tabela 26.

Tabela 26 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para RCPT.

Composição	28 dias			56 dias			91 dias		
	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey
REF	3633	411	A-B	3838	331,8	B	3742	442	C
FIL30	4813	557	C	5092	511,0	C	4628	232	D
EFN10	4171	112	B-C	3315	448,2	B	2892	241	B
EFN30	3583	438	A-B	2345	272,0	A	2042	340	A
EFN50	3123	380	A	1786	217,2	A	1661	263	A

Fonte: Autor

Observa-se que aos 28 dias há maior sobreposição entre grupos (famílias menos separadas), com FIL30 ocupando o patamar superior e EFN50 no inferior, enquanto REF, EFN10 e EFN30 apresentam comportamento intermediário com interseções estatísticas. Em contraste, a mistura EFN50 já apresentava aos 28 dias valores numericamente inferiores à REF, indicando um desempenho promissor da escória de ferroníquel, porém ainda no mesmo grupo.

Já aos 56 dias, as famílias tornam-se mais bem definidas, FIL30 permanece no grupo de maior carga passante, REF e EFN10 concentram-se em uma faixa intermediária sem diferença entre si, e EFN30 e EFN50 formam outro grupo de menor carga passante, também sem diferença entre si.

Aos 91 dias, a separação é mais distinta, com hierarquia estatística mais completa, FIL-30 mantém os maiores valores, REF ocupa isoladamente um grupo de carga passante acima das misturas com EFN. EFN10 aparece em nível intermediário inferior, e EFN30 e EFN50 se agrupam novamente no patamar de menores cargas passantes, sem diferenças estatísticas entre si. Esse padrão de agrupamentos ao longo do tempo materializa exatamente o que a ANOVA de duas vias sinaliza: as diferenças entre composições se intensificam e se reorganizam com a idade.

Em síntese, a análise conjunta das idades indica que, enquanto misturas inertes ou de referência mantêm níveis de carga passante mais estáveis entre 28 e 91 dias, as misturas com EFN apresentam redução progressiva da carga passante, demonstrando ganho contínuo de durabilidade ao longo da cura. Esse comportamento é compatível com a atuação de adições de reatividade tardia, que promovem refinamento contínuo da microestrutura e menor conectividade dos poros via reações pozolânicas, dificultando o transporte iônico na matriz.

Apêndice. C - 2. Análise estatística resultados NT Build 492 - RCMT

A ANOVA de duas vias (Teor × Idade) exibida na Tabela 27 indicou efeito significativo tanto dos fatores quanto da interação (Valor-p < 0,05), demonstrando que o impacto da incorporação não é constante ao longo do tempo, mas depende da idade de ensaio, coerentemente com a evolução microestrutural distinta entre as misturas.

Tabela 27 – ANOVA duas vias para RCMT.

Fonte	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Amostra (teor)	1716,0	4	429,0	298,2	0,0000
Idade	98,5	2	49,3	34,2	0,0000
Interação (Teor x Idade)	506,6	8	63,3	44,0	0,0000
Erro	64,7	45	1,4		

Fonte: Autor

Essa dependência fica visível nos agrupamentos do teste de Tukey-HSD por idade demonstrados na Tabela 28. Aos 28 dias, observou-se sobreposição entre composições, com FIL30 e EFN10 no grupo B, REF e EFN50 no A e EFN30 em posição intermediária A-B, indicando que parte das diferenças ainda não está plenamente consolidada nesta fase inicial, quando predomina a contribuição do clínquer e os efeitos tardios das adições ainda estão em desenvolvimento.

Tabela 28 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para RCMT.

Composição	28 dias			56 dias			91 dias		
	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey
REF	10,9	1,2	A	14,5	1,7	B-C	11,9	1,3	C
FIL30	15,0	1,8	B	25,9	1,6	D	30,5	0,7	E
EFN10	14,4	0,7	B	16,7	1,3	C	15,5	1,2	D
EFN30	12,4	1,6	A-B	12,9	1,3	B	9,6	0,4	B
EFN50	10,0	0,5	A	8,2	0,7	A	5,5	0,9	A

Fonte: Autor

Aos 56 dias, a separação torna-se mais nítida, com FIL30 passando a se destacar isoladamente com maiores valores e EFN50 com os menores, enquanto REF/EFN10/EFN30 permanecem em faixa intermediária, sugerindo que, com a maturação, a matriz cimentícia passa a refletir mais intensamente os efeitos físicos e químicos de cada incorporação.

Por fim, aos 91 dias, Tukey demonstra a separação completa entre todas as composições. As misturas EFN30 e EFN50 ficaram nos grupos superiores, porém

distintos (A e B), obtendo os melhores resultados, a cinética tardia e o refinamento progressivo da rede porosa (com redução da conectividade capilar e maior tortuosidade) tendem a diminuir o parâmetro avaliado, refletindo a evolução do grau de hidratação, reações secundárias e alterações na microestrutura ao longo do tempo.

Apêndice. C - 3. Análise estatística resultados Resistividade Elétrica

A análise estatística via ANOVA por duas vias revelou que a resistividade elétrica (ρ) é controlada simultaneamente pela composição do concreto e pela idade de cura, bem como pela interação entre esses fatores. Assim, o efeito do traço não é constante ao longo do tempo e que a evolução temporal de ρ depende do nível de substituição.

Isso implica que, se plotadas, as curvas de resistividade ao longo do tempo não serão paralelas, algumas misturas apresentam ganhos mais acentuados em idades intermediárias e tardias, enquanto outras evoluem de forma mais discreta, o que é compatível com mecanismos de reação e densificação distintos.

Adicionalmente, a reduzida parcela de variabilidade atribuída ao erro experimental (Erro SQ = 8,20 frente a $\sum SQ = 2433,69$) reforça a elevada consistência dos dados e a forte capacidade explicativa do modelo, conferindo alta confiança às diferenças detectadas, a Tabela 29 exibe tais dados estatísticos.

Tabela 29 – ANOVA duas vias para Resistividade Elétrica.

Fonte	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Amostra (teor)	692,1	4	173,0	1899,7	0,0000
Idade	906,6	5	181,3	1990,9	0,0000
Interação (Teor x Idade)	826,8	20	41,3	453,9	0,0000
Erro	8,2	90	0,1		

Fonte: Autor

Portanto, fez-se necessário o teste de Tukey, a seguir, nas Tabela 30 e Tabela 31 são exibidos os agrupamentos resultantes.

Tabela 30 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para Resistividade Elétrica para idades 7, 14 e 21 dias.

Composição	7 dias			14 dias			21 dias		
	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey
REF	3,35	0,13	C	3,81	0,10	C	3,93	0,17	B
FIL30	2,44	0,07	A	2,62	0,08	A	2,90	0,07	A
EFN10	2,77	0,11	B	3,44	0,07	B	4,14	0,13	B
EFN30	2,75	0,08	B	3,40	0,07	B	4,75	0,08	C
EFN50	2,25	0,05	A	4,00	0,06	D	6,49	0,09	D

Fonte: Autor

Tabela 31 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para Resistividade Elétrica para idades 28, 56 e 91 dias.

Composição	28 dias			56 dias			91 dias		
	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey
REF	4,86	0,07	B	5,57	0,12	B	5,82	0,32	A-B
FIL30	3,45	0,15	A	4,08	0,11	A	4,52	0,20	A
EFN10	4,58	0,08	B	5,83	0,20	B	6,31	0,20	B
EFN30	5,84	0,14	C	9,15	0,23	C	11,98	0,80	C
EFN50	8,08	0,19	D	16,08	0,35	D	24,24	1,20	D

Fonte: Autor

Os agrupamentos de Tukey mostraram tendências similares, nas idades iniciais, as diferenças entre traços são menos pronunciadas, ainda assim, a amostra de referência apresentou um desempenho superior (maiores valores), classificada no grupo "C" pelo teste de Tukey, enquanto as misturas com adições de escória de ferroníquel e filer calcário mostraram valores reduzidos. Esse comportamento inicial é justificado pela hidratação imediata do clínquer, que REF possui em inteiro teor.

A partir dos 21 dias, houve uma inversão de desempenho, com as misturas contendo EFN apresentando um crescimento acelerado da resistividade e superando estatisticamente a referência. O destaque foi a composição EFN50, que aos 91 dias atingiu 24,24 kΩ.cm, valor aproximadamente quatro vezes superior ao da referência (5,82 kΩ.cm). Vale ressaltar também que desde os 21 dias até esta última idade, REF e EFN10 firam estatisticamente iguais. Portanto, tais resultados demonstram a compensação, em termos de durabilidade, da troca de clínquer por adições acontece com o tempo de hidratação pelo refinamento da microestrutura de forma tardia.

Apêndice. C - 4. Análise estatística resultados Carbonatação Acelerada

A análise estatística ANOVA de duas vias demonstrou que o teor de substituição, a idade de exposição e a interação entre esses fatores impactam significativamente a profundidade de carbonatação ($p < 0,05$), apresentados na Tabela 32. De forma abrangente, o teste post-hoc de Tukey, verificou-se que o aumento do teor de escória de ferroníquel (EFN) eleva a profundidade de carbonatação, com a mistura EFN50 apresentando o desempenho menos favorável em todos os períodos analisados.

Por outro lado, o teste de Tukey (Tabela 33) destacou uma evolução temporal positiva para a mistura com 10% de substituição (EFN10). Embora apresentasse valores superiores à referência nas idades iniciais, aos 91 dias de exposição, a composição EFN10 tornou-se estatisticamente equivalente ao concreto de referência (Grupo A). Esse resultado sugere que baixos teores de EFN permitem um desempenho de durabilidade similar ao concreto convencional a longo prazo, ao passo que teores de 30% e 50% mantêm índices de carbonatação significativamente mais elevados.

Tabela 32 – ANOVA duas vias para Carbonatação Acelerada.

Fonte	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Amostra (teor)	2575,0	4	643,8	854,1	0,0000
Idade	56,1	2	28,0	37,2	0,0000
Interação (Teor x Idade)	59,6	8	7,4	9,9	0,0000
Erro	22,6	30	0,8		

Fonte: Autor

Tabela 33 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para Carbonatação Acelerada.

Composição	28 dias			56 dias			91 dias		
	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey
REF	8,5	0,4	A	9,00	0,3	A	8,50	0,04	A
FIL30	21,5	1,0	D	21,00	1,3	D	20,00	1,8	C
EFN10	11,0	0,7	B	11,50	0,5	B	10,50	0,8	A
EFN30	18,5	0,9	C	17,00	0,5	C	15,00	0,3	B
EFN50	34,0	1,0	E	30,00	1,2	E	26,00	0,8	D

Fonte: Autor

Apêndice. C - 5. Análise estatística resultados Resistência à Compressão

A análise de variância (ANOVA) demonstrada na Tabela 34, mostra que a composição das misturas e a idade de cura são fatores determinantes para a resistência à compressão, com significância estatística de Valor-p < 0,05. No entanto, a interação entre teor e idade não apresentou significância (Valor-p = 0,093 > 0,05), o que indica que as diferentes misturas seguem um padrão de desenvolvimento de resistência similar ao longo do tempo, sem alteração relevante no “perfil” relativo entre misturas com o avanço da cura.

Tabela 34 – ANOVA duas vias para Resistência à Compressão.

Fonte	SQ	gl	MQ	F	Valor-p
Amostra (teor)	3744,0	4	936,0	277,9	0,0000
Idade	484,5	2	242,2	71,9	0,0000
Interação (Teor x Idade)	49,7	8	6,2	1,8	0,0935
Erro	151,6	45	3,4		

Fonte: Autor

Exibido na Tabela 35, o teste de Tukey mostra que inicialmente aos 28 dias, a mistura com 10% de escória (EFN10) destaca-se por apresentar desempenho equivalente ao concreto de referência (REF), situando-se no mesmo grupo estatístico de maior resistência.

Tabela 35 – Agrupamentos do Teste post-hoc de Tukey para Resistência à Compressão.

Composição	28 dias			56 dias			91 dias		
	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey	Média	Sd	Tukey
REF	54,2	3,0	D	59,6	0,6	C	59,3	1,0	C
FIL30	37,4	2,4	B	41,2	1,4	A	42,1	1,7	A
EFN10	51,5	1,1	D	57,5	2,4	C	57,7	1,8	C
EFN30	46,0	1,0	C	49,6	1,5	B	54,0	1,9	B
EFN50	32,8	1,9	A	39,5	2,4	A	42,1	1,8	A

Fonte: Autor

O aumento do teor de substituição por escória de ferroníquel promove uma redução gradual na capacidade mecânica, sendo o teor de 50% (EFN50) o de menor desempenho em todas as idades. Contudo, a comparação entre a escória e o fíler calcário revela que a mistura EFN30 supera significativamente a FIL30 aos 28 dias,

destacando uma contribuição química superior da escória em relação ao material inerte.

Quanto à evolução temporal, verifica-se um incremento de resistência em todas as composições entre 28 e 56 dias. No entanto, entre as idades de 56 e 91 dias, nota-se menores incrementos, tendendo a estabilização, com as misturas permanecendo nos mesmos grupos estatísticos. Esse comportamento indica que o processo de hidratação e as reações tardias das adições atingiram um patamar de maturação, consolidando a estrutura da matriz cimentícia nas idades avançadas.