

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

FERNANDA BREKAILO

MODELO DE PENETRAÇÃO DE ÍONS SULFATO EM CONCRETO: ABORDAGEM
BASEADA EM ENSAIOS DE RESISTIVIDADE E MIGRAÇÃO IÔNICA

PONTA GROSSA
2025

FERNANDA BREKAILO

MODELO DE PENETRAÇÃO DE ÍONS SULFATO EM CONCRETO: ABORDAGEM
BASEADA EM ENSAIOS DE RESISTIVIDADE E MIGRAÇÃO IÔNICA

Tese apresentada para a obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência de Materiais, na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pereira.
Coorientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior.

PONTA GROSSA

2025

B835 Brekailo, Fernanda
Modelo de penetração de íons sulfato em concreto: abordagem baseada em ensaios de resistividade e migração iônica / Fernanda Brekailo. Ponta Grossa, 2025.
163 f.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais - Área de Concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Pereira.

Coorientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior.

1. Modelo de penetração de sulfatos. 2. Ataque por sulfatos. 3. Migração iônica. 4. Resistividade. I. Pereira, Eduardo. II. Medeiros Junior, Ronaldo Alves de. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Desenvolvimento e Caracterização de Materiais. IV.T.

CDD: 620.11

FERNANDA BREKAILO

MODELO DE PENETRAÇÃO DE ÍONS SULFATO EM CONCRETO: ABORDAGEM
BASEADA EM ENSAIOS DE RESISTIVIDADE E MIGRAÇÃO IÔNICA

Tese apresentada para a obtenção do título de Doutora em Engenharia e Ciência de
Materiais, na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de Desenvolvimento e
Caracterização de Materiais.

Ponta Grossa, 21 de março de 2025.

Documento assinado digitalmente
 EDUARDO PEREIRA
Data: 03/04/2025 11:01:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Pereira
Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Documento assinado digitalmente
 MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS
Data: 01/04/2025 01:02:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Sergio Henrique Piliarissi Cavalaro
Doutor em Ingeniería de la Construcción
Loughborough University

Documento assinado digitalmente
 ADRIANA SCOTON ANTONIO CHINELATTO
Data: 03/04/2025 10:44:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Adriana Scoton Antonio Chinelatto
Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Documento assinado digitalmente
 SIDNEI ANTONIO PIANARO
Data: 02/04/2025 21:54:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sidnei Antonio Pianaro
Doutor em Química
Universidade Estadual de Ponta Grossa

À aqueles que enchem minha vida de amor, acreditam nos meus sonhos e
são meus maiores incentivadores: Rafael, meu esposo, Erci, minha mãe, e Tamires,
minha irmã

AGRADECIMENTOS

Depois de 4 anos de doutorado e 10 anos dedicados a pesquisa científica, os agradecimentos deixam de ser de cunho protocolar e passam a ser extremamente pessoais. São anos que vão além do aprofundamento no conhecimento, pois são também de formação profissional, e diria ainda mais de formação pessoal.

Assim, começo agradecendo ao meu esposo, Rafael. A ele, que ouviu meus desabafos e me acalmou nos momentos de desespero. Meu porto seguro em todos os momentos bons e ruins ao longo deste trabalho, que segurou as pontas quando a ansiedade tomou conta. Ele que me acompanhou e ajudou nas atividades do laboratório nos fins de semana e buscou cimento diversas vezes para minhas moldagens. Agradeço a você por estar sempre ao meu lado e me dar a melhor família do mundo. Ela faz todo esse esforço valer a pena!

Agradeço também a minha mãe, Erci. Ela que me deu colo e foi meu acalento. Que me ouviu desabafar, com toda paciência, sempre perguntando o que poderia fazer para me ajudar. Agradeço por todo amor, apoio e incentivo, fosse em uma palavra, um abraço ou um almoço quentinho. Sempre será tudo por e para ela!

Agradeço a minha irmã, Tamires, por sempre se fazer presente, fosse com uma mensagem para saber como as coisas estavam ou para me distrair nos momentos difíceis. Sempre com esse cuidado de irmã mais velha, vibrando e ficando orgulhosa de mim por cada etapa da pesquisa, desde o ingresso no Doutorado até a finalização do texto.

Eu só consegui chegar até aqui graças a essas três pessoas incríveis que Deus me apresentou para dividir essa experiência terrena.

Agradeço ao meu orientador, professor Eduardo Pereira, pelo processo de orientação que foi realizado de forma tão humana e presente. Queria que todos pós-graduandos tivessem essa sorte. Um processo de orientação de já dura 10 anos e que se tornou uma amizade. Eduardo sempre acreditou mais em mim do que eu mesma, e com isso, me propôs vários desafios que me permitiram crescer no processo de formação pessoal e profissional. Agradeço por toda atenção, carinho e incentivo ao longo desses anos.

Ao meu coorientador, professor Ronaldo Alves de Medeiros Junior, por abrir as portas da Universidade Federal do Paraná para essa pesquisa, além de toda colaboração e conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento deste trabalho e dos artigos realizados.

A todos colegas e alunos do nosso grupo de pesquisa que me ajudaram no trabalho experimental. Agradeço em especial ao aluno Rafael Fernando de Oliveira Juncos. Se não fosse por ele, nada disso teria sido possível. Obrigada, Rafael, por fazer tanto pelo meu trabalho. Tive ainda a sorte de ter outros colegas do grupo ao meu lado. Agradeço a Adriana Fiori Moura, a Taynah Almeida de Jesus e ao Matheus Villian Valenga, por doarem seu tempo me auxiliando nas moldagens das amostras. Agradeço também ao Marcelo Miranda Farias pelo auxílio nas análises dos dados de microCT. A ajuda de vocês foi inestimável!

Aos meus amigos e colegas de trabalho, Eloise Aparecida Langaro, Nisiane Madalozzo Wambier, Patrícia Krüger e Rafael Jansen Mikami, pelas longas conversas, paciência, sororidade e palavras de incentivo. Agradeço também a Eloise pelas ideias de pesquisa compartilhadas, por me acompanhar na realização do ensaio de SDT em Curitiba, além de me ensinar a analisar os dados desse teste. Agradeço a Nisiane pelo tempo dedicado em me auxiliar na elaboração de figuras para a Tese. Agradeço também ao Rafael pela paciência na ajuda constante na análise estatística dos meus dados.

Aos laboratórios e técnicos que permitiram a realização do programa experimental desta pesquisa. Agradeço aos laboratoristas e técnicos do Departamento de Engenharia Civil e do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pelo auxílio nos ensaios deste trabalho.

Agradeço ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU) da Universidade Estadual de Ponta Grossa pela cessão de seus laboratórios, e aos seus técnicos, Vanessa Parise Chagury pelas análises de microestrutura, e Hudson André Batista dos Santos pelas análises de DRX.

Agradeço ainda a diretora Anelize Manuela Bahniuk Rumbelsperger e ao técnico Leandro Keiji Maurer Ozahata, em nome dos quais deixo meu agradecimento ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (ILAMIR) por abrir suas portas e permitir a análise de microCT, que trouxe dados essenciais para realização deste trabalho. Também da Universidade Federal do Paraná, agradeço a técnica Vivianne

Luiza Costa, do Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME) do Departamento de Construção Civil, pela realização dos ensaios de SDT.

As empresas que cederam materiais que permitiram a realização dos ensaios desta Tese. Agradeço ao Grupo Arena pela doação de cimento e a empresa MC-Bauchemie pela doação do aditivo superplastificante utilizado.

A CAPES, pelo financiamento na forma de bolsas de estudo, que permitiu a minha maior dedicação a esta pesquisa.

Além disso, agradeço a Universidade Estadual de Ponta Grossa, seus funcionários, corpo docente, direção e administração, pelo trabalho realizado em prol de um ensino superior de qualidade. Tenho orgulho de vestir a camisa da UEPG, de caminhar nessa instituição há 12 anos e pode defender uma universidade pública de qualidade.

Este trabalho só foi possível pelo ambiente onde estive e pelo apoio e incentivo de diversas pessoas. A estas pessoas, que cruzaram meu caminho nestes anos de pesquisa, que direta e indiretamente fizeram parte desta etapa de minha formação, meus sinceros agradecimentos.

“Em relação a essa ética do esforço, um caso que costumo contar é do exímio pianista Arthur Moreira Lima. Após um concerto magnífico, um jovem foi até ele e falou: “Gostei demais do concerto, eu daria a vida para tocar piano como o senhor”. E ele, de pronto, respondeu: “Eu dei. Foram quarenta anos de dedicação, de nova a dez horas diárias de esforço.” [...]

O desgaste é inerente a qualquer processo de produção: do tempo, do espírito, da peça, da natureza. E esse desgaste poderá ser negativo se eu não entender o sentido daquilo que estou fazendo. Mas, se existir um objetivo adiante, um propósito maior, esse desgaste será recompensado pelo resultado.”
(Livro “Por que fazemos o que fazemos?” De Mario Sergio Cortella)

RESUMO

O ataque por sulfatos é um complexo fenômeno de degradação de matrizes cimentícias e os modelos para avaliação deste tipo de degradação ainda não são um consenso na literatura. Assim, este trabalho propõe um modelo de penetração para aplicação nos estudos de ataque externo por sulfatos. Este modelo baseia-se em dados de resistividade e migração iônica. A metodologia da pesquisa foi dividida em três etapas. A primeira correspondeu ao ajuste do ensaio de migração, para 1 dosagem de concreto, variando os eletrodos utilizados e espessura das amostras para solução de sulfato de sódio e magnésio. A partir dos resultados desta etapa, optou-se pelo uso de eletrodos de grafite e amostras de 25 mm de espessura. Ajustado o ensaio de migração, na segunda etapa foram determinados os parâmetros de entrada do modelo, incluindo um fator dano para considerar a resposta mecânica da interação entre os íons sulfatos e a matriz cimentícia. A segunda etapa foi realizada para 6 dosagens de concreto expostas aos sulfatos analisados (sódio e magnésio) tanto em ensaios de migração iônica quanto difusão (mantidos em imersão), além de 2 traços de referência. As amostras de difusão tiveram a resistividade e velocidade de ultrassom monitoradas mensalmente, além de determinações da resistência à compressão, absorção de água por imersão, perfis de sulfato e análise de dano pelo ensaio de SDT. Para as amostras do ensaio de migração, foi monitorada a condutividade elétrica das soluções e posteriormente determinado os perfis de sulfato. A equação do modelo foi então proposta de forma a possibilitar sua aplicação na determinação da penetração de sulfatos para outras dosagens, a partir da relação água/cimento do traço e da resistividade elétrica do concreto após o período de cura. Na terceira etapa foi realizada a validação do modelo proposto para outras 2 dosagens de concreto, para ambos tipos de sulfatos, e para dados da literatura. Estas amostras foram mantidas em situação de difusão em solução de sulfatos com monitoramento mensal da resistividade e ultrassom, além de determinações dos perfis de sulfatos em diferentes idades. As profundidades de sulfatos empíricas foram comparadas aos valores determinados pelo modelo proposto, com erros que variam de aproximadamente 2 a 80%. A maior diferença encontrada entre os dados foi de 8 mm para os traços dosados nesta etapa e 14 mm para os dados da literatura. O trabalho destaca as limitações e possibilidades de aplicação do modelo proposto.

Palavras-chave: Modelo de penetração de sulfatos. Ataque por sulfatos. Migração iônica. Resistividade.

ABSTRACT

Sulfate attack is a complex degradation phenomenon affecting cementitious matrices, and there is no consensus in the literature regarding models for evaluating this type of degradation. This study proposes a penetration model for application in external sulfate attack studies, based on resistivity and ionic migration data. The research methodology was divided into three stages. In the first stage, the migration test was adjusted for one concrete mix, varying the electrodes and sample thickness in sodium and magnesium sulfate solutions. Based on the results, graphite electrodes and 25 mm thick samples were selected. In the second stage, the input parameters for the model were determined, including a damage factor to account for the mechanical response of the interaction between sulfate ions and the cementitious matrix. This stage was conducted for six concrete mixes exposed to sodium and magnesium sulfates, both in ionic migration and diffusion tests (under immersion), as well as for two reference mixes. The diffusion samples were monitored monthly for resistivity and ultrasonic pulse velocity, and tested for compressive strength, water absorption by immersion, sulfate profiles, and damage analysis using SDT. For the migration test samples, the electrical conductivity of the solutions was monitored, followed by sulfate profile determinations. The model equation was proposed to estimate sulfate penetration for other concrete mixes, based on the water/cement ratio and the concrete's electrical resistivity after the curing period. In the third stage, the proposed model was validated for two additional concrete mixes exposed to both sulfate types, and for literature data. These samples were subjected to diffusion in sulfate solutions, with monthly monitoring of resistivity and ultrasonic pulse velocity, as well as sulfate profile measurements at different ages. The empirical sulfate penetration depths were compared with the values predicted by the model, showing errors ranging from approximately 2% to 80%. The maximum absolute difference was 8 mm for concrete mixes tested in this stage and 14 mm for the literature data. The study highlights the limitations and potential applications of the proposed model.

Keywords: Sulfate penetration model. Sulfate attack. Ionic migration. Resistivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Número de publicações sobre modelos de ataque por sulfatos nas bases de dados da ScienceDirect e Scopus (pesquisa de março de 2022).	24
Figura 2 - Cristais formados no ESA e seu efeito na microestrutura: a) gipsita, b) etringita, c) deslocamento da parede dos poros.....	26
Figura 3 - Expansão de argamassa pela teoria do aumento de volume: a) preenchimento dos poros, b) poro completamente preenchido, c) formação de cristais nas fissuras.	28
Figura 4 - Evolução dos compostos formados e expansões radiais de argamassas expostas ao ataque por sulfatos para (a) a/c de 0,45 e porosidade de 12,4% e (b) a/c de 0,45 e porosidade de 18,8%.	30
Figura 5 - Micrografia SEM de cristais de brucita em pasta de cimento.....	32
Figura 6 - Esquema cronológico e de dependência entre os modelos numéricos de ESA.	34
Figura 7 - Expansão linear obtida experimentalmente x calculada pelos modelos de Tixier e Mobasher (2003b) e Ikumi <i>et al.</i> (2014).	35
Figura 8 - Conteúdo de cálcio e enxofre obtido experimentalmente x calculado pelos modelos de Yu, Y., Zhang e Khennane (2015) e Samson e Marchand (2007).	36
Figura 9 - Princípio do funcionamento do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.	39
Figura 10 – Avaliação de amostras de concreto expostas a diferentes concentrações de sulfato de sódio: (a) evolução do módulo de elasticidade, (b) evolução do dano.	40
Figura 11 - Determinação do Índice de Danos de Rigidez (SDI) e do Índice de Deformação Plástica (PDI) com base na saída do Teste de Danos de Rigidez (SDT).	41
Figura 12 - Exemplo de gráficos de tensão-deformação obtidos no ensaio de SDT para amostras de concreto afetados por DEF.	42
Figura 13 - Esquema do método de Wenner.	46
Figura 14 - Evolução da resistividade elétrica de concretos expostos a ciclos de molhagem e secagem com (a) água, (b) sulfatos.....	48

Figura 15 - Evolução da resistividade elétrica de pastas de cimento expostas a sulfatos.	49
Figura 16 - Arranjo experimental usado em testes de migração.	51
Figura 17 - Representação da variação da concentração do compartimento anódico com o tempo durante o ensaio de migração de cloretos.	52
Figura 18 - Esquema das células de migração de sulfatos.	54
Figura 19 - Perfil de concentração de sulfatos nas amostras de concreto após ensaios de migração e difusão natural em estado estacionário (SS) e não estacionário (NSS).	55
Figura 20 - Coeficientes de difusão de sulfato de migração e difusão em estado estacionário: (a) sulfato de sódio, (b) sulfato de magnésio.	55
Figura 21 - Coeficientes de difusão de sulfato de migração e difusão em estado não estacionário: (a) sulfato de sódio, (b) sulfato de magnésio.	56
Figura 22 - Relação entre os coeficientes de difusão determinados pela 1ª Lei de Fick e os dados de resistividade elétrica superficial.	61
Figura 23 - Organograma da etapa 1 do programa experimental.	63
Figura 24 - Organograma da etapa 2 do programa experimental.	64
Figura 25 - Organograma da etapa 3 do programa experimental.	65
Figura 26 - Difratograma de raios X da amostra de areia.	67
Figura 27 - Curva granulométrica do agregado miúdo.	68
Figura 28 - Curva granulométrica do agregado graúdo.	68
Figura 29 - Esquema do corte de discos de concreto realizado a partir de corpos de prova cilíndricos.	71
Figura 30 - Configuração das células de migração de sulfatos.	71
Figura 31 - Montagem das células de migração.	72
Figura 32 - Realização das leituras de condutividade da solução anódica.	72
Figura 33 - Esquema da determinação dos perfis de concentração de sulfatos nas amostras de difusão (imersão).	78
Figura 34 - Esquema da determinação dos perfis de concentração de sulfatos nas amostras de migração.	79
Figura 35 - Leitura da resistividade elétrica superficial nos corpos de prova.	81
Figura 36 - Determinação da profundidade de difusão de sulfatos experimental.	83
Figura 37 - Ensaio de SDT - corpo de prova com extensômetro e gráfico gerado.	85
Figura 38 - Determinação do valor de <i>time-lag</i> no ensaio de migração.	89

Figura 39 - Influência da espessura da amostra na concentração de sulfatos no compartimento anódico: a) sulfato de sódio; b) sulfato de magnésio.	90
Figura 40 - Influência do tipo de eletrodo na concentração de sulfatos no compartimento anódico: a) sulfato de sódio; b) sulfato de magnésio.	91
Figura 41 - Análise visual do compartimento anódico e dos eletrodos após o ensaio de migração.	92
Figura 42 - Difratoograma de raios X das amostras de concreto após o ensaio de migração com diferentes tipos de eletrodo: a) sulfato de sódio, b) sulfato de magnésio.	93
Figura 43 - Análise comparativa do pico de maior intensidade da portlandita das amostras de concreto após o ensaio de migração com diferentes tipos de eletrodo: a) sulfato de sódio, b) sulfato de magnésio.	93
Figura 44 - Microestrutura das amostras de concreto após o ensaio de migração de sulfato de sódio com diferentes tipos de eletrodos: a,b) cobre; c,d) grafite; e,f) aço.....	94
Figura 45 - Microestrutura das amostras de concreto após o ensaio de migração de sulfato de magnésio com diferentes tipos de eletrodos: a,b) cobre; c,d) grafite; e,f) aço.....	95
Figura 46 - Microestrutura das amostras de concreto de difusão natural de Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023): a,b) sulfato de sódio; c,d) sulfato de magnésio.	96
Figura 47 - Aspecto visual das amostras após 12 meses de ensaio: traços de referência.	98
Figura 48 - Aspecto visual das amostras após 12 meses de ensaio: traços expostos ao sulfato de magnésio.	99
Figura 49 - Aspecto visual das amostras após 12 meses de ensaio: traços expostos ao sulfato de sódio.	100
Figura 50 - Valores médios de absorção de água, índice de vazios e resistência à compressão das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio.	102
Figura 51 - Valores médios de absorção de água, índice de vazios e resistência à compressão das amostras de concreto expostas ao sulfato de magnésio.....	103
Figura 52 – Porosidade das amostras de concreto após cura em água.	104

Figura 53 - Evolução da resistividade elétrica das amostras de concreto de referência.	105
Figura 54 - Evolução da resistividade elétrica das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio.	106
Figura 55 - Evolução da resistividade elétrica das amostras de concreto expostas ao sulfato de magnésio.	106
Figura 56 - Evolução da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto de referência.	107
Figura 57 - Evolução da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio.	107
Figura 58 - Evolução da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto expostas ao sulfato de magnésio.	108
Figura 59 - Módulo de elasticidade dinâmico determinado a partir da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio e magnésio.	109
Figura 60 - Resultados de tensão-deformação obtidos no ensaio de SDT para os corpos de prova de referência.	110
Figura 61 - Resultados de tensão-deformação obtidos no ensaio de SDT para os corpos de prova expostos ao sulfato de sódio.	111
Figura 62 - Resultados de tensão-deformação obtidos no ensaio de SDT para os corpos de prova expostos ao sulfato de magnésio.	112
Figura 63 - Módulo de elasticidade estático dos corpos de prova de concreto para as diferentes soluções de exposição avaliadas.	113
Figura 64 - Índices PDI (Índice de Deformação Plástica) e SDI (Índice de Dano da Rigidez) dos corpos de prova de concreto para as diferentes soluções de exposição avaliadas.	114
Figura 65 - Perfis de sulfato nas amostras de concreto após 12 meses de exposição ao sulfato de sódio e magnésio.	115
Figura 66 - Evolução da concentração de sulfatos no compartimento anódico em função do tempo, no ensaio de migração de sulfato de sódio em amostras de concreto.	117
Figura 67 - Evolução da concentração de sulfatos no compartimento anódico em função do tempo, no ensaio de migração de sulfato de magnésio em amostras de concreto.	118

Figura 68 - Perfis de sulfato nas amostras de concreto após ensaio de migração de sulfato de sódio e magnésio.	119
Figura 69 - Evolução da resistividade elétrica para as amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio determinada com base na regressão não linear do fator idade.	121
Figura 70 - Evolução da resistividade elétrica para as amostras de concreto expostas ao sulfato de magnésio determinada com base na regressão não linear do fator idade.	122
Figura 71 - Correlação linear obtida entre o fator idade e a relação água/cimento e teor de C ₃ A.	123
Figura 72 - Correlação entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente para os diferentes traços testados determinados de acordo com a relação de Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014).	124
Figura 73 - Correlação entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente para os diferentes traços testados determinados de acordo com a nova relação proposta.	126
Figura 74 - Correlação entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente para os diferentes traços testados do cimento tipo I avaliados por Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014).	126
Figura 75 - Correlação entre o fator de reação de sulfatos determinado de acordo com a relação de Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014) e propriedades dos concretos.	127
Figura 76 - Correlação entre o fator de reação de sulfatos determinado de acordo com a nova relação proposta e propriedades do concreto.	128
Figura 77 - Correlação entre o fator de reação de cloretos e a relação a/c para diferentes tipos de cimentos brasileiros.	129
Figura 78 - Correlação entre o fator de reação de cloretos e a resistividade elétrica efetiva.	129
Figura 79 - Correlação entre o coeficiente de difusão efetivo e a resistividade elétrica efetiva de acordo com a lei de Einstein.	130
Figura 80 - Correlação entre o coeficiente de difusão efetivo e a resistividade elétrica efetiva de acordo com nova proposta.	131
Figura 81 - Correlação entre o fator dano e a relação água/cimento e teor de C ₃ A.	133

Figura 82 – Correlação entre o fator dano proposto e a profundidade e concentração de sulfatos.....	134
Figura 83 - Aspecto visual das amostras após 12 meses de ensaio: traços expostos ao sulfato de sódio e magnésio.....	138
Figura 84 - Perfis de sulfato nas amostras de concreto após 6 e 12 meses de exposição ao sulfato de sódio e magnésio.....	139
Figura 85 - Evolução da resistividade elétrica das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio e magnésio.....	140
Figura 86 - Evolução da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio e magnésio.....	140
Figura 87 - Evolução da resistividade elétrica para as amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio e magnésio determinada com base no fator idade proposto.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de Melara <i>et al.</i> (2022) aplicando o modelo de Zhou <i>et al.</i> (2015).	38
Tabela 2 - Resultados de Melara <i>et al.</i> (2022), com ajuste no modelo de Zhou <i>et al.</i> (2015) a partir de dados de resistividade elétrica.	38
Tabela 3 - Parâmetros adotados por Melara <i>et al.</i> (2022) na aplicação do modelo de Andrade, C (2004).	60
Tabela 4 - Resultados de Melara <i>et al.</i> (2022) aplicando o modelo de Andrade, C. (2004).	60
Tabela 5 - Caracterização do cimento CP II-F 32 adotado na etapa 1 (% em massa).	66
Tabela 6 - Composição química da amostra de areia.	67
Tabela 7 - Caracterização física do agregado miúdo.	67
Tabela 8 - Caracterização física do agregado graúdo.	68
Tabela 9 - Proporções dos componentes das soluções de sulfato.	69
Tabela 10 - Dosagem das amostras de concreto da etapa 1.	69
Tabela 11 - Caracterização do cimento CP V ARI adotado nas etapas 2 e 3 (% em massa).	74
Tabela 12 - Dosagens das amostras de concreto da etapa 2.	75
Tabela 13 - Quantidade de corpos de prova da etapa 2.	76
Tabela 14 - Dosagens das amostras de concreto da etapa 3.	87
Tabela 15 - Quantidade de corpos de prova da etapa 3.	87
Tabela 16 - Teor de C_3A e volume de pasta das dosagens das amostras de concreto da etapa 2.	98
Tabela 17 - Classificação da qualidade de concretos em função da VPU.	108
Tabela 18 - Tensão de compressão aplicada nos corpos de prova no ensaio de SDT.	109
Tabela 19 - Profundidade de difusão e concentração na superfície dos íons sulfatos.	116
Tabela 20 - Coeficientes de difusão calculados para o ensaio de migração.	120
Tabela 21 - Valores da resistividade inicial e do fator idade para os diferentes traços testados.	121

Tabela 22 - Valores do fator de reação de sulfatos para os diferentes traços testados determinados de acordo com a relação de Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014) e com a nova relação proposta.	124
Tabela 23 - Valores dos coeficientes de difusão para o cimento tipo I dos traços avaliados por Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014).	125
Tabela 24 - Determinação da profundidade de difusão teórica e do fator dano.	132
Tabela 25 - Determinação dos parâmetros do modelo proposto de penetração de íons sulfatos.	136
Tabela 26 - Teor de C ₃ A das dosagens das amostras de concreto da etapa 3.	138
Tabela 27 - Profundidade de difusão e concentração na superfície dos íons sulfatos para as amostras da Etapa 3.	139
Tabela 28 - Parâmetros obtidos para os traços da etapa 3 conforme modelo proposto.	141
Tabela 29 - Determinação da profundidade de difusão pelo modelo proposto e erro relativo obtido para os traços da etapa 3.	142
Tabela 30 - Parâmetros obtidos para os traços de Melara <i>et al.</i> (2022), conforme modelo proposto.	143
Tabela 31 - Determinação da profundidade de difusão pelo modelo proposto e erro relativo obtido para os traços de Melara <i>et al.</i> (2022).	143

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	OBJETIVOS.....	22
1.2	JUSTIFICATIVA.....	22
2	ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS	26
2.1	VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS.....	29
2.2	MECANISMOS DO ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS	31
2.3	MODELAGEM DO ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS.....	32
2.3.1	Ensaio não destrutivo para ajuste empírico de modelos de sulfatos.....	37
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS.....	42
3	MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL BASEADOS EM MIGRAÇÃO IÔNICA E RESISTIVIDADE DO CONCRETO.....	44
3.1	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	44
3.1.1	Variáveis que influenciam na resistividade elétrica do concreto	47
3.2	MIGRAÇÃO IÔNICA.....	50
3.3	FORMULAÇÃO DO MODELO DE ANDRADE (2004).....	56
3.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO DE ANDRADE (2004).....	61
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
4.1	AJUSTE DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO.....	65
4.1.1	Variáveis de análise.....	65
4.1.2	Caracterização dos materiais	66
4.1.3	Dosagem do concreto e moldagem dos corpos de prova.....	69
4.1.4	Ensaio de migração de sulfatos.....	70
4.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO	73
4.2.1	Variáveis de análise.....	73
4.2.2	Caracterização dos materiais	74
4.2.3	Dosagem do concreto e moldagem dos corpos de prova.....	74
4.2.4	Ensaio de caracterização do concreto	77
4.2.5	Ensaio de migração de sulfatos.....	78
4.2.6	Cálculo do fator de reação dos sulfatos (r_s).....	80
4.2.7	Ensaio de resistividade elétrica	81

4.2.8	Cálculo do fator idade (q).....	82
4.2.9	Determinação do fator relativo à agressividade ambiental (k_s).....	82
4.2.10	Ajuste do modelo de Andrade (2004)	82
4.3	VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	85
4.3.1	Variáveis de análise.....	86
4.3.2	Caracterização dos materiais	86
4.3.3	Dosagem do concreto e moldagem dos corpos de prova.....	86
4.3.4	Ensaio de caracterização do concreto	87
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.1	ETAPA 1 – AJUSTE DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO	89
5.1.1	Discussões Finais da Etapa 1.....	95
5.2	ETAPA 2 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO.....	97
5.2.1	Caracterização das amostras de concreto.....	97
5.2.2	Parâmetros do modelo.....	120
5.2.3	Proposição de modelo	135
5.2.4	Discussões finais da Etapa 2.....	136
5.3	ETAPA 3 – VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	137
5.3.1	Caracterização das amostras de concreto.....	137
5.3.2	Aplicação do modelo proposto.....	140
5.3.3	Discussões finais da Etapa 3.....	144
6	CONCLUSÕES	146
	REFERÊNCIAS.....	150

1 INTRODUÇÃO

Dentre os fenômenos de degradação de matrizes cimentícias, destaca-se como um importante e complexo processo o ataque por sulfatos. Este tipo de degradação é caracterizado pela interação entre íons sulfatos, que podem ter origem interna ou externa ao material, e os componentes presentes na matriz cimentícia. O resultado desta interação é a formação de compostos de caráter expansivo (Skalny; Marchand; Odler, 2002; Mehta; Monteiro, 2014).

Esta expansão da matriz é descrita por duas teorias, onde a primeira justifica as expansões pelo volume de sólidos gerado pelos compostos formados, que é maior que os que lhe deram origem (Irassar; Bonavetti; González, 2003). A segunda teoria atribui as expansões a pressão de cristalização, já que os cristais são formados em um ambiente confinado, originando grandes pressões (Bary *et al.*, 2014; Skalny; Marchand; Odler, 2002).

Independente da teoria adotada para descrever o fenômeno, tem-se como resposta um processo expansivo na matriz, que origina tensões de tração. Ao excederem a resistência do material, as tensões dão origem a fissuras, podendo gerar redução na resistência à compressão e perda de coesão do material, até o colapso de estruturas em casos extremos (Ikumi; Cavalaro; Segura, 2019; Jiang; Niu, 2016; Müllauer; Beddoe; Heinz, 2013).

Para controlar e mitigar o ataque por sulfatos, as principais medidas atuais estão relacionadas a dosagem dos constituintes do concreto. Para situações de exposição a este agente agressivo, as normativas exigem o emprego de cimentos considerados resistentes a sulfatos (ABNT, 2018a; ASTM, 2021). Estes cimentos têm o teor de triáluminato de cálcio (C_3A) limitado e devem atender os limites de expansão em ensaios realizados em barras de argamassa.

Outra forma de prevenção a este fenômeno é a redução da permeabilidade da matriz, que pode ser feita com a redução da relação água/cimento e também com o uso de adições minerais (Hossack; Thomas, 2015; Mehta; Monteiro, 2014; Neville, A. M.; Brooks, 2013). Além disso, para os sulfatos de origem externa, pode-se utilizar também com tratamentos de superfícies nas estruturas, dificultando o ingresso dos íons na matriz porosa (Ibrahim *et al.*, 1999).

Com o foco no estudo da durabilidade de estruturas, uma área que se mostra promissora é o uso de modelos de previsão de vida útil. Esses modelos relacionam

comportamentos experimentais e equações matemáticas, buscando entender e traduzir o desempenho das estruturas submetidas a diferentes processos de degradação que podem acometer. Estes modelos permitem avaliar e quantificar fenômenos e seu impacto na durabilidade do material (Ikumi; Segura, 2019; Medeiros-Junior, 2014).

Porém, a complexidade do tema, no que se refere ao ataque por sulfatos em si e também a complexidade da matriz cimentícia, devido à grande variabilidade de dosagens e materiais utilizados na construção, faz com que ainda se tenham lacunas deste conhecimento técnico-científico, e os modelos de previsão de ataque por sulfatos ainda não sejam consolidados (Andrade, J. J. de O. *et al.*, 2009).

Neste sentido, destaca-se o modelo de Andrade, C. (2004), utilizado para quantificar o período de iniciação e propagação da corrosão de armaduras de concretos expostos à ação de íons cloretos. As variáveis de entrada do modelo para íons cloretos foram definidas em estudos da autora e colaboradores para diferentes tipos de cimento, com base em resultados de ensaios de resistividade elétrica superficial e ensaios de migração de cloretos (Andrade, C.; D'Andrea, 2010; Andrade, C.; D'Andrea; Rebolledo, 2014).

Este modelo apresenta grande potencial de aplicabilidade em situações rotineiras (Melara *et al.*, 2022), podendo ser utilizado de diferentes formas. A proposta de Andrade, C. (2004) traz como resposta uma relação entre a resistividade do concreto, o tempo necessário de vida útil e a espessura da camada de cobrimento das armaduras: conhecendo duas das variáveis, é possível estimar a terceira.

Melara *et al.* (2022) apresentam o primeiro estudo da aplicação direta do modelo de Andrade, C. (2004) para a previsão da penetração de íons sulfato, e obtiveram bons resultados. Porém, os autores adotam ainda alguns ajustes empíricos e um pequeno grupo experimental. Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023b) propõe uma metodologia que permite a realização de ensaios de migração para estudos de íons sulfatos, e com isso, associado a ensaios de resistividade elétrica, há a possibilidade de determinar as variáveis de entrada no modelo de Andrade, C. (2004) aplicado a sulfatos.

Neste cenário, este estudo traz como proposta a aplicação de um modelo já consolidado de cloretos, adaptado para a aplicação no estudo de penetração de sulfatos em estruturas sujeitas ao ataque por sulfatos de origem externa, e ainda, a correlação deste ingresso de íons com o dano da matriz cimentícia. Este modelo é

baseado em dados relativamente simples de serem obtidos, como parâmetros determinados em ensaios de migração e dados de resistividade, podendo estes ser obtido inclusive em estruturas reais em campo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral neste trabalho é propor um modelo para prever a penetração de íons sulfatos em concreto, fundamentado em ensaios eletroquímicos de migração e medidas de resistividade, visando sua aplicação no estudo do ataque externo por sulfatos.

Como objetivos específicos desta pesquisa têm-se:

- Refinar a metodologia do ensaio de migração para íons sulfatos em concreto, visando aprimorar seus resultados e obter uma correlação mais precisa entre este ensaio acelerado e a difusão natural desses íons.
- Determinar os parâmetros numéricos necessários para aplicação do modelo de Andrade, C. (2004) na análise da penetração de íons sulfatos em concreto, obtendo os valores por meio de ensaios de migração e resistividade.
- Avaliar o dano causado pelos íons sulfatos na matriz cimentícia, utilizando técnicas de diagnóstico como medidas de velocidade de pulso ultrassônico e *Stiffness Damage Test* (SDT). Com base nestes dados, ajustar o modelo de Andrade, C. (2004) à sulfatos.
- Estabelecer uma relação entre a penetração de íons sulfatos e o dano na matriz cimentícia, visando uma melhor compreensão do fenômeno.
- Verificar a aplicabilidade do modelo proposto para determinar a penetração de íons sulfatos em concreto.

1.2 JUSTIFICATIVA

O ataque por sulfatos é destacado como um importante fenômeno de degradação de matrizes cimentícias tendo em vista a sua agressividade. Este processo pode ser de difícil identificação em fases iniciais, com pequenas idades, e depois de identificado, pode dispendir de onerosos métodos de reabilitação. Assim,

destaca-se a importância de modelos que auxiliam a descrever, compreender, bem como quantificar e prever este processo.

A fim de compreender onde encontra-se o cenário científico desta temática, uma revisão sistemática foi realizada em março de 2022 em duas bases de dados, a *ScienceDirect* e *Scopus*. Como balizadores, a pesquisa foi limitada a artigos de periódicos, que contenham no título os termos “*Model*”, “*Modelling*” ou “*Modeling*” e “*Sulfate attack*”, sem restrição da data de publicação e sem a inclusão de artigos de revisão da literatura. A pesquisa completa está disponível no trabalho de Brekailo, Pereira e Medeiros (2023) - Visão sistêmica sobre publicações relacionadas aos modelos de previsão do ataque por sulfatos em matrizes cimentícias.

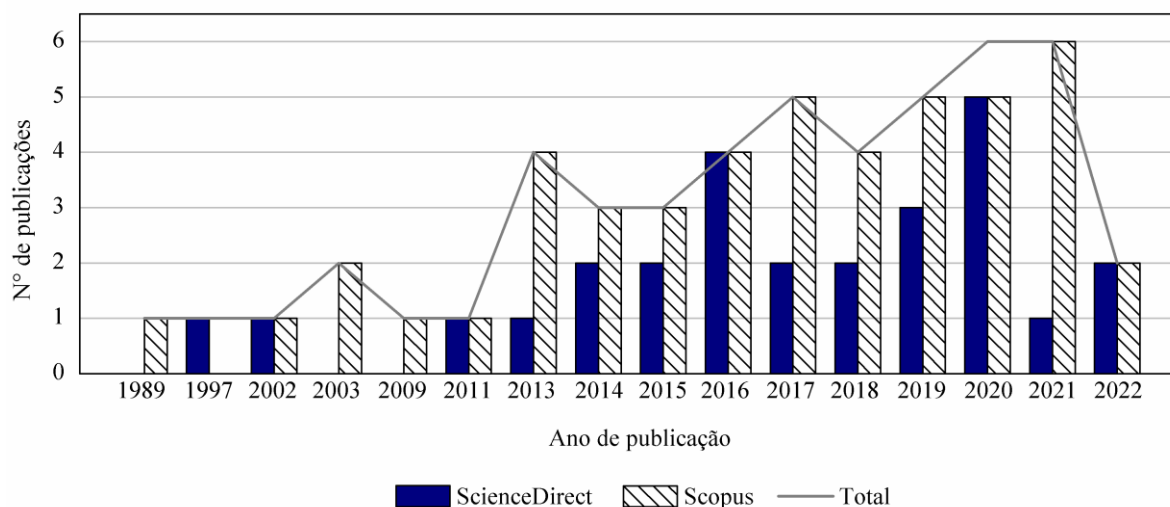
Com isso, encontrou-se como retorno 89 publicações, das quais 29 eram comuns em ambas as bases de dados. Ainda, 6 publicações foram retiradas das análises por tratarem de temas além do escopo do trabalho de revisão sistemática, abordando ataque ácido (Fatima; Muntean, 2014), ataque físico (Zhang, Z. *et al.*, 2022), ou ainda modelagens de cloretos quando associados a sulfatos (Wang, P. *et al.*, 2021a, 2021b, 2022).

A Figura 1 apresenta a distribuição destas publicações ao longo dos anos. As publicações referem-se a modelos de ataque interno e externo, tanto numéricos quanto empíricos, aplicados a diferentes matrizes cimentícias, como concreto, argamassa e pasta. Cerca de 92% dos trabalhos encontrados tratam do ataque externo por sulfatos. Os trabalhos encontrados nesta revisão sistema não representam a totalidade de modelos de sulfatos disponíveis na literatura, e sim os que se enquadraram dentro dos parâmetros adotados como filtros.

Ainda assim, pode-se notar as tendências, como evidenciado pela Figura 1, onde identifica-se a quantidade de pesquisas dentro deste tema encontra-se em ascensão. Em pesquisa realizada em janeiro de 2025, adotando os mesmos filtros e as mesmas bases de dados, para os anos de 2022 a 2025, foram encontrados mais 27 trabalhos, sendo 7 em 2022, 10 em 2023, 8 em 2024 e até a data da pesquisa, 2 em 2025, indicando a importância da escolha do objeto de estudo da presente Tese.

Devido à complexidade do ataque externo por sulfatos, os parâmetros e formas de descrever cada um dos processos envolvidos nas modelagens ainda não são um consenso. Além disso, modelos mais precisos, envolvendo complexos processos iterativos resolvidos por *softwares* computacionais tem a aplicabilidade limitada em função da alta capacidade computacional requerida (Ikumi *et al.*, 2016).

Figura 1 - Número de publicações sobre modelos de ataque por sulfatos nas bases de dados da ScienceDirect e Scopus (pesquisa de março de 2022).



Fonte: Brekailo; Pereira; Medeiros, 2023.

Compreender e quantificar este fenômeno permite a previsão do comportamento da estrutura, e assim, programar processos de reparo e recuperação, obtendo estruturas mais duráveis. Neste sentido, destaca-se o modelo de Andrade, C. (2004). A autora é considerada uma referência na temática. Associada ao Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia, na Espanha, ela já publicou mais de 456 trabalhos entre 1977 e 2025, dos quais 41 encontram-se nos top 25% mais citados do mundo, sendo citada em mais de 12600 outros documentos, de acordo com dados da *Scopus* (pesquisa realizada em janeiro de 2025).

O modelo de Andrade, C. (2004) é utilizado para quantificar o período de iniciação e propagação da corrosão de armaduras. Este modelo combina relações matemáticas com parâmetros baseados em medidas de resistividade e coeficiente de difusão da matriz, calculados por ensaios de migração iônica. Ambos testes são relativamente simples e rápidos, o que evidencia a importância do modelo proposto por Andrade, C. (2004).

A resistividade elétrica do concreto pode ser medida a partir de aparelhos comercialmente disponíveis, que pode ser empregado tanto em campo como em laboratório, em um ensaio não destrutivo. A metodologia traz como resposta um parâmetro que pode ser relacionado à porosidade e resistência à compressão do material, por exemplo (Andrade, C.; D'Andrea, 2010; Wang, Z. *et al.*, 2013). Já o ensaio de migração permite a obtenção de dados sobre o transporte de íons na matriz

cimentícia de forma acelerada, quando comparado a situações de difusão natural (Andrade, C., 1993; UNE, 2012a).

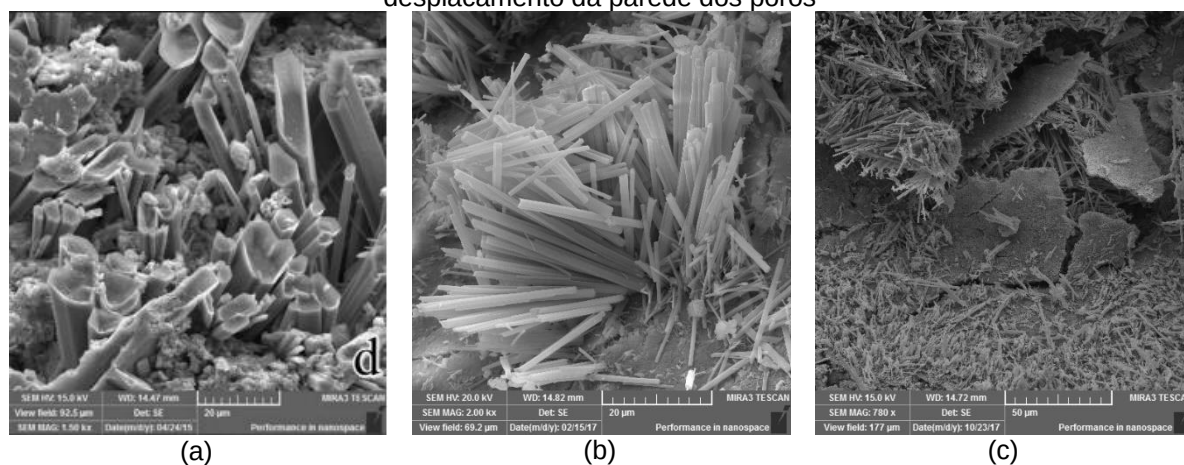
O ajuste do modelo de Andrade, C. (2004) para sulfatos permitirá a realização de previsões de penetração do íons e análise do dano de estruturas de concreto quando inseridas em ambientes sujeitos a este tipo de degradação. O estudo mostra-se relevante para comunidade técnica, pela forma inovadora proposta para obter-se parâmetros e quantificar o fenômeno do ataque externo por sulfatos com base em uma metodologia simplificada, e também para a comunidade científica, por contribuir no desenvolvimento deste conhecimento.

2 ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS

O ataque por sulfatos é um fenômeno de degradação de concretos e argamassas ocasionados por um complexo conjunto de processos químicos e físicos (Skalny; Marchand; Odler, 2002). Dependendo da origem dos íons, ele pode ser dividido em ataque externo, quando os íons vêm de uma fonte externa ao material, ou ataque interno, onde a fonte dos íons pode ser a água de amassamento ou agregado contaminado. No ataque externo por sulfatos, também conhecido pela sigla ESA, do inglês *External Sulfate Attack*, os sulfatos podem ser encontrados em solos, águas subterrâneas ou efluentes industriais, por exemplo (Brown, 2002; Mehta; Monteiro, 2014).

Neste tipo de degradação, os íons sulfatos permeiam a matriz e reagem com os componentes do cimento hidratado, tendo como principais produtos cristais de etringita e gipsita (Figura 2a,b). Estas reações geram forças expansivas, que ao excederem a resistência à tração dos concretos e argamassas, dão origem a fissuras e deslocamentos (Figura 2c) (Mehta; Monteiro, 2014). As pressões de tração podem chegar a ordem de 8 MPa, superior a resistência dos concretos convencionais (Müllauer; Beddoe; Heinz, 2013). As fissuras favorecem a entrada de novos agentes agressivos, de forma que o ataque atinge camadas mais internas do material e se torna cada vez mais agressivo (Santhanam; Cohen; Olek, 2003).

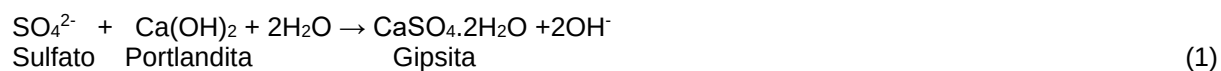
Figura 2 – Cristais formados no ESA e seu efeito na microestrutura: a) gipsita, b) etringita, c) deslocamento da parede dos poros



Fonte: Adaptado de: Pereira *et al.*, 2016, e Brekailo *et al.*, 2022.

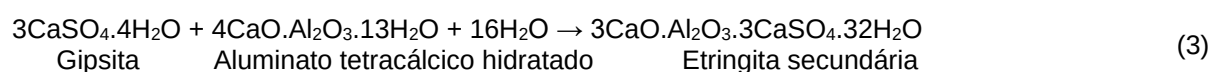
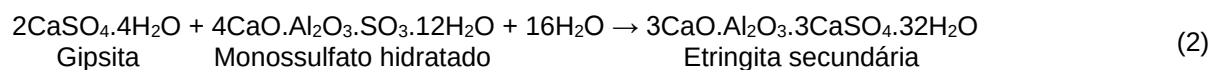
O ataque inicia pela formação de gipsita, que corresponde ao sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Este composto é formado pela reação dos íons sulfatos

com fontes de cálcio disponível na matriz, principalmente o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), conhecido como portlandita, formada na hidratação do cimento (Equação (1)) (Brown, 2002; Irassar; Di Maio; Batic, 1996). A portlandita é responsável pela estabilidade química dos compostos, por manter o pH do sistema elevado, e seu consumo e consequente redução do pH pode tornar outros compostos suscetíveis a serem consumidos (Mehta; Monteiro, 2014).



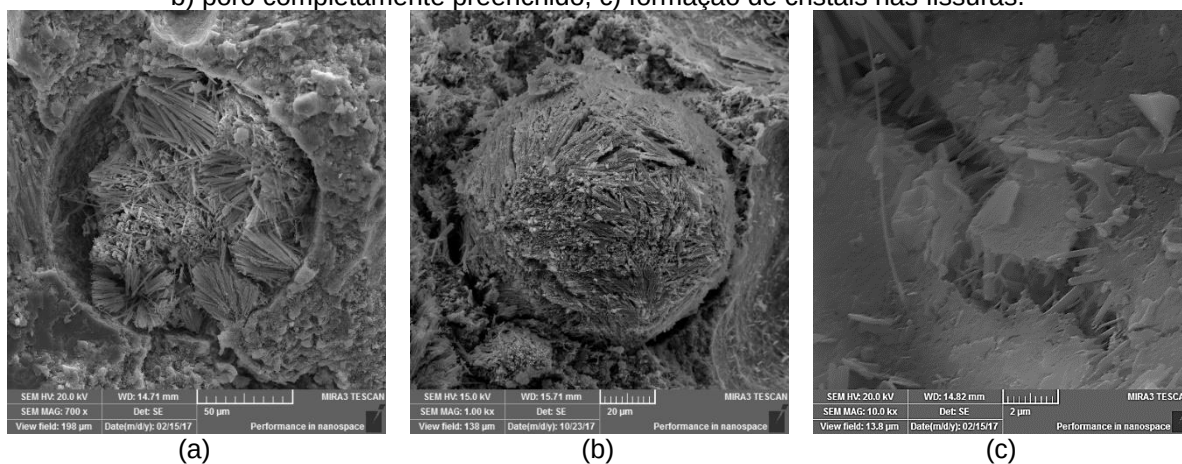
As expansões observadas no ESA são atribuídas primordialmente a etringita secundária ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) (Ikumi *et al.*, 2014). O termo “secundária” é adotado para diferenciá-la da etringita primária, formada durante o processo de hidratação do cimento, devido a reação entre os aluminatos com o gesso adicionado ao clínquer no cimento Portland. Ao consumir o sulfato do gesso, esta etringita é convertida em monossulfato hidratado (Baur *et al.*, 2004; Mehta; Monteiro, 2014). Porém, ao ter contato com uma fonte adicional de sulfatos, como ocorre no ataque externo, o monossulfato hidratado volta a ser convertido em etringita, neste caso, etringita secundária.

A gipsita é o principal produto formado quando se tem altas concentrações de sulfato (Santhanam; Cohen; Olek, 2002b). Este composto combina-se com o monossulfato formado pela hidratação do cimento (Equação (2)) ou com aluminato tetracálcico hidratado (Equação (3)), e dá origem a etringita secundária. A etringita secundária também pode ser formada pela reação entre o C_3A não hidratado remanescente do cimento Portland com a gipsita (Equação (4)) (Casanova; Aguado; Agulló, 1997; Tixier; Mobasher, 2003a; Mehta; Monteiro, 2014). Assim, a gipsita geralmente é considerada um passo intermediário para a formação de etringita secundária (Tixier; Mobasher, 2003a).



A expansão da matriz devido à estas reações são descritas na literatura por dois fenômenos: a teoria do aumento de volume de sólidos e a teoria da pressão da cristalização. Na primeira, as expansões são associadas ao fato de os compostos formados nas reações terem volume maior que os originais. Irassar, Di Maio e Batic, (1996) afirmam que o aumento de volume é de aproximadamente 1,2 vezes para a gipsita e 2,5 vezes para a etringita. A teoria do aumento de volume de sólidos descreve a formação dos cristais dentro dos poros da matriz (Figura 3a), que uma vez preenchidos (Figura 3b), dão origem a pressões internas na matriz, e consequentemente, a formação de fissuras. Os cristais passam então a ser formados dentro destas fissuras, e a degradação continua (Figura 3c) (Irassar; Di Maio; Batic, 1996; Skalny; Marchand; Odler, 2002).

Figura 3 – Expansão de argamassa pela teoria do aumento de volume: a) preenchimento dos poros, b) poro completamente preenchido, c) formação de cristais nas fissuras.



Fonte: Adaptado de: Brekailo *et al.*, 2022.

Já a teoria da pressão de cristalização, que é mais aceita nas pesquisas dos últimos anos, associa a expansão observada ao fato de a solução de poros estar supersaturada. Sendo assim, ao formar cristais em um ambiente confinado, como é o caso da rede de poros da matriz cimentícia, dá-se origem a grandes pressões (Bary *et al.*, 2014; Skalny; Marchand; Odler, 2002). Da mesma forma que na teoria anterior, quando estas pressões são maiores que a resistência à tração da matriz, originam-se fissuras. Para alguns autores, como Bary *et al.* (2014) e Ikumi *et al.* (2014), o fenômeno expansivo pode ser descrito por ambas teorias, onde cada uma representa fases distintas do ataque.

2.1 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS

Para que a degradação devido ao ESA ocorra, é preciso a presença concomitante da matriz cimentícia, uma fonte externa de íons sulfatos e água, de forma dissociar os íons e os difundir pela matriz. Atendido estes fatores, a velocidade com que ocorrerão as reações expansivas e agressividade do fenômeno são influenciadas por diferentes variáveis. Algumas destas variáveis são a temperatura de exposição e concentração da solução de sulfatos, relativos ao ambiente onde a estrutura será inserida (ACI, 2014; Santhanam; Cohen; Olek, 2002b). Outros fatores influentes dizem respeito a fatores intrínsecos do material, como tipo de cimento Portland adotado, a porosidade e permeabilidade da matriz cimentícia e a presença e tamanho dos agregados (Naik *et al.*, 2006; Neville, 2004; Mehta; Monteiro, 2014).

Uma revisão dos fatores e da forma como influenciam na ESA pode ser encontrada em Brekailo (2020) e Zhang *et al.* (2024). Aqui será destacado o relevante para discussões de resultados do presente trabalho, que estuda concretos com diferentes valores de porosidade e permeabilidade.

A maior ou menor permeabilidade da matriz cimentícia afeta na movimentação de fluídos no interior do concreto. Assim, quanto maior a permeabilidade, maior a vulnerabilidade a ataques químicos. Neste sentido, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a redução desta propriedade é a melhor maneira de prevenir o ataque por sulfatos. A permeabilidade pode ser reduzida diminuindo a relação água/cimento da mistura e também com o uso de adições minerais, que juntos determinam o tamanho, volume e continuidade dos vazios capilares (Mehta; Monteiro, 2014; Silveira, 1996).

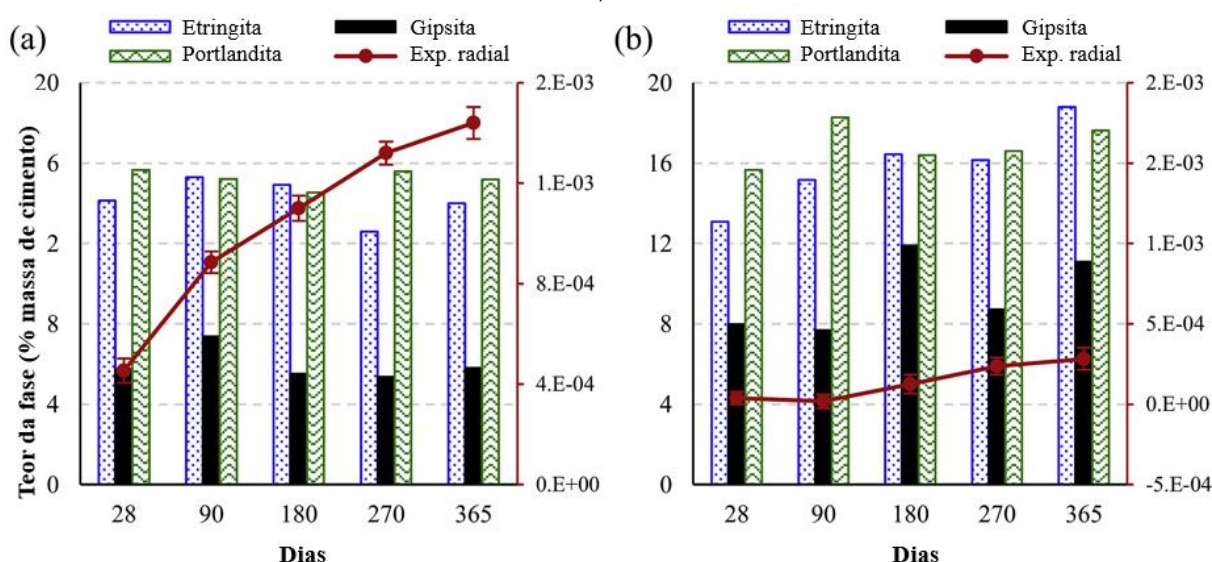
Para obter estruturas duráveis, as normativas costumam restringir as relações água/cimento para ambientes agressivos, de forma a obter matrizes menos permeáveis e mais resistentes (ABNT, 2018a; Ikumi; Cavalaro; Segura, 2019). Apesar de permeabilidade e porosidade não serem sinônimos, a limitação da permeabilidade implica na redução da porosidade do material cimentício. Porém, a rede de poros não está relacionada apenas ao transporte de fluídos (Ikumi; Cavalaro; Segura, 2019).

Quando do ataque por sulfatos, os poros representam espaços capazes de acomodar os subprodutos das reações expansivas, podendo um material poroso ter um efeito positivo quando comparado a uma matriz com baixa permeabilidade e porosidade quando sujeitos a esta degradação (Ikumi; Cavalaro; Segura, 2019). Falhas precoces podem ocorrer em matrizes que não tenham espaço capaz deste

amortecimento, espaços estes que podem ser criados com o uso de aditivos incorporadores de ar (Naik *et al.*, 2006; Santhanam; Cohen; Olek, 2002a, 2003).

Ikumi, Cavalaro e Segura (2019) apresentam um estudo sobre o papel da porosidade no ESA. Os resultados dos autores indicam que um aumento intencional na porosidade aumenta a capacidade de acomodação dos produtos, reduzindo as forças expansivas. Este efeito fica evidente na Figura 4, onde, para argamassas de mesma relação água/cimento, o aumento da porosidade permite obter reduções nas expansões radiais.

Figura 4 - Evolução dos compostos formados e expansões radiais de argamassas expostas ao ataque por sulfatos para (a) a/c de 0,45 e porosidade de 12,4% e (b) a/c de 0,45 e porosidade de 18,8%.



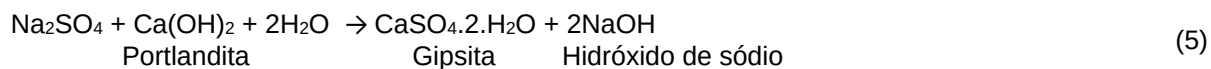
Fonte: Ikumi; Cavalaro; Segura, 2019.

Assim, uma matriz de baixa permeabilidade, mas com alta porosidade teria um melhor desempenho em situações de ataque por sulfatos. Apesar disso, estas discussões ainda são realizadas na literatura. Ainda que observe-se uma melhora na durabilidade em idades menores pelo efeito de acomodação dos compostos, a formação contínua de etringita pode ocasionar uma redução na resistência da matriz, devido a descalcificação pelo consumo da portlandita ou do C-S-H (Ikumi; Cavalaro; Segura, 2019).

2.2 MECANISMOS DO ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS

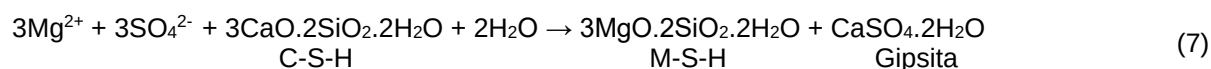
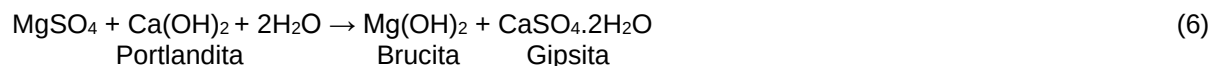
Além das variáveis citadas anteriormente, o cátion associado ao íon sulfato é um dos fatores que determina a agressividade da degradação da matriz cimentícia devido o ESA, em função do hidróxido formado associado (Mehta; Monteiro, 2014). Sulfato de sódio, magnésio, cálcio e amônio estão entre os mais discutidos na literatura (Santhanam; Cohen; Olek, 2002a; Jiang; Niu, 2016; Aguayo; Drimalas; Folliard, 2019; Martins *et al.*, 2021; Mehta; Monteiro, 2014). Os dois primeiros são o foco deste estudo, e assim, os seus mecanismos de ataque serão apresentados.

O sulfato de sódio é o comumente associado ao ESA na literatura, e é o composto utilizado nas metodologias normativas de avaliação de resistência de argamassas ao ataque por sulfatos (ABNT, 2014a; ASTM, 2018). Neste caso, o sulfato de sódio reage com a portlandita, e além de gipsita forma-se hidróxido de sódio (Equação (5)). Este composto mantém a alcalinidade do sistema, mesmo com o consumo de portlandita, e assim, a estabilidade química pode ser parcialmente mantida (Mehta; Monteiro, 2014).



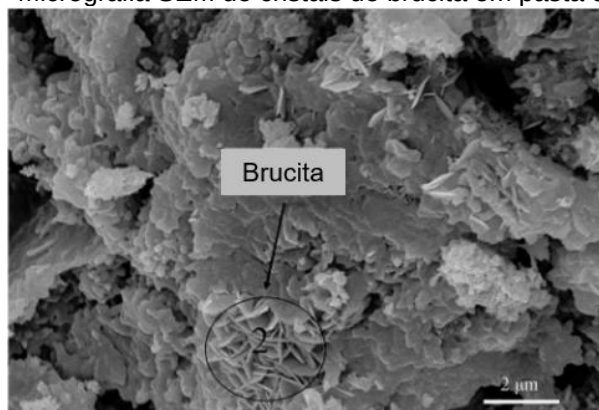
A degradação observada ocorre então pelos fenômenos expansivos associados à formação de gipsita e etringita secundária. A expansão observada divide-se em duas etapas, uma primeira onde pouco efeito é quantificado (Santhanam; Cohen; Olek, 2002a). Neste momento pode-se observar até aumentos de resistência, devido ao preenchimento dos poros da matriz (Jiang; Niu, 2016). Em seguida, tem-se um período de significativa expansão, que ao iniciar, prossegue a uma taxa praticamente constante (Santhanam; Cohen; Olek, 2002a).

Já no ataque por sulfato de magnésio, o hidróxido associado é o hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), conhecido como brucita (Equação (6)). Este composto é insolúvel e reduz o pH do sistema, o que torna o C-S-H instável e capaz de ser atacado, formando silicato de magnésio hidratado (M-S-H) (Equação (20)). O C-S-H é responsável pela coesão e resistência mecânica da matriz cimentícia, e por isso, o ataque por sulfato de magnésio é ainda mais agressivo que o de sódio (Mehta; Monteiro, 2014).



A brucita formada retarda a entrada dos íons sulfatos na matriz, o que faz com que não haja um aumento acentuado na taxa de expansão ao longo do tempo (Santhanam; Cohen; Olek, 2002a). Apesar da menor taxa de expansão, o grau de degradação e perdas mecânicas são mais acentuadas neste tipo de ataque (Jiang; Niu, 2016). A Figura 5 apresenta cristais de brucita formados em pasta de cimento que utilizam agente expansivo de óxido de magnésio levemente queimado.

Figura 5 – Micrografia SEM de cristais de brucita em pasta de cimento.



Fonte: Traduzido de: Yu, L. *et al.* (2019).

2.3 MODELAGEM DO ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS

Para otimizar a avaliação do ataque externo por sulfatos, com base em dados confiáveis, diferentes modelos de vida útil vêm sendo desenvolvidos, de forma a compreender e descrever quantitativamente este fenômeno. Estes modelos podem ser de dois tipos, empíricos ou numéricos. Os modelos empíricos têm como base observações, medições e dados experimentais. Já os modelos numéricos são baseados em cálculos iterativos avançados, com uso de algoritmos complexos. Os modelos empíricos começam a ser desenvolvidos entre os anos de 1980 a 1990, e a partir dos anos 2000 observa-se um crescimento das modelagens numéricas (Ikumi; Segura, 2019). Da revisão sistêmica realizada dentro deste tema, apresentada por Brekailo, Pereira e Medeiros (2023), 82,9% dos trabalhos encontrados dizem respeito a modelagem numérica e 17,1% a modelagem empírica.

Os números podem estar relacionados as críticas que modelos empíricos recebem, devido a sua aplicabilidade, pois muitas vezes são válidos apenas para compósitos nas mesmas condições de ensaio (Ikumi; Segura, 2019). Por outro lado, devido à complexidade do ESA, os modelos numéricos muitas vezes apresentam uma simplificação em alguma das etapas do ataque: no transporte iônico, nas reações químicas, nas forças expansivas e/ou nos danos gerados pelo processo (Lothenbach *et al.*, 2010; Samson; Marchand, 2007). De acordo com Brekailo, Pereira e Medeiros (2023), buscando associar os benefícios de cada modelagem, alguns modelos numéricos são associados a ajustes experimentais como pode ser visto em Chen, Qian e Song (2016), Min *et al.* (2019), Yao, Yang e Chen (2020) e Yin *et al.* (2017).

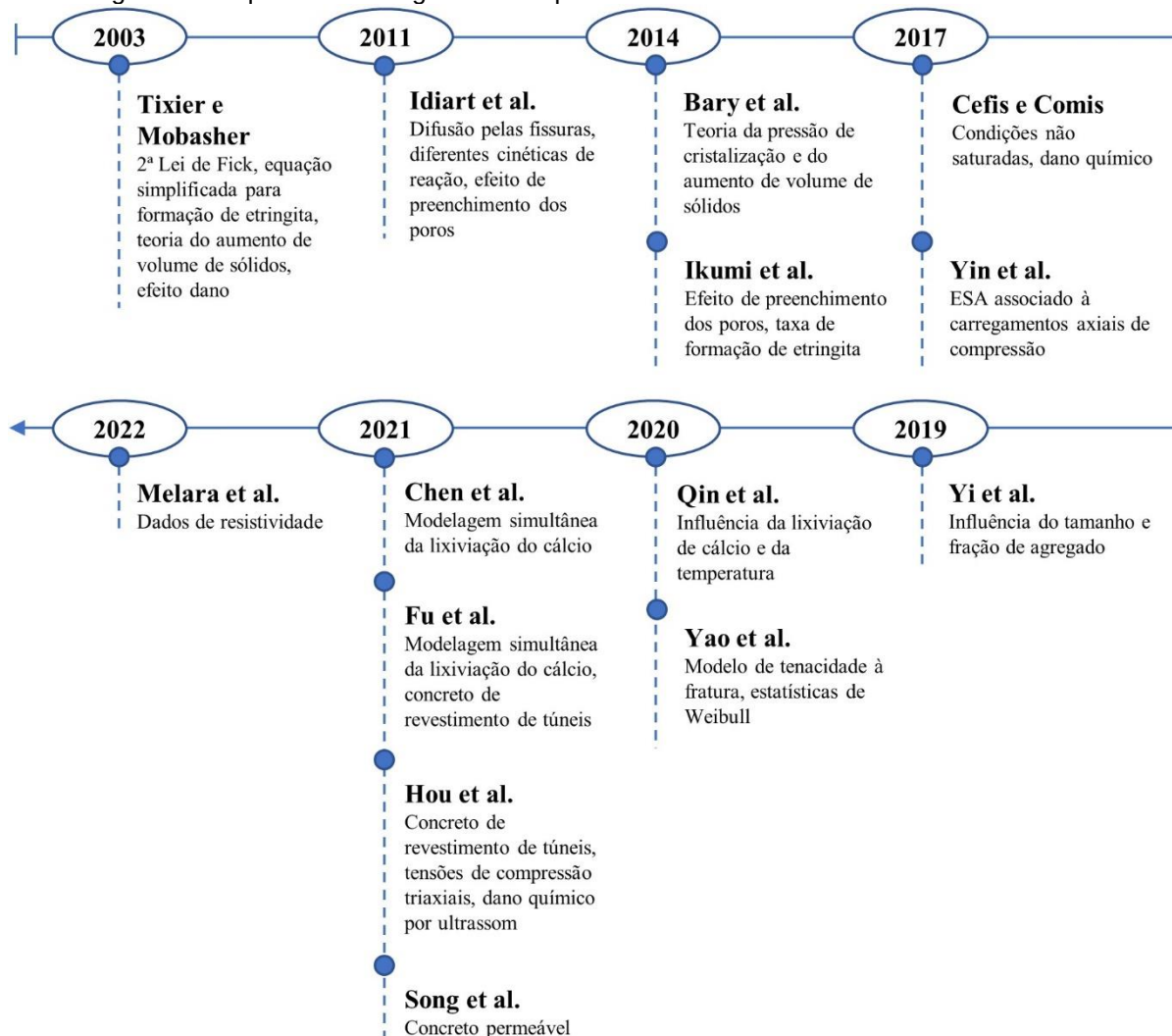
Dentro da linha do tempo de publicações deste tema, o trabalho de Tixier e Mobasher (2003a, 2003b) é destacado, apresentando grande número de citações, e servindo de base para diferentes outros modelos que foram desenvolvidos na sequência. A Figura 6 apresenta a relação entre os modelos numéricos que tratam de ESA dentro da linha do tempo.

O modelo desenvolvido por Tixier e Mobasher (2003a) considera os quatro principais processos envolvidos no ataque externo por sulfatos. Para o transporte, os autores consideram apenas o efeito da difusão, que é descrita pela segunda lei de Fick. O produto expansivo considerado neste trabalho é apenas a etringita, assim como ocorre em diversos outros modelos (Bary *et al.*, 2014; Cefis; Comi, 2014; Idiart; López; Carol, 2011; Ikumi *et al.*, 2014).

Dentro do modelo proposto por Tixier e Mobasher (2003a), destaca-se a simplificação na descrição da formação de etringita. A etringita pode ser formada pela reação do aluminato tetracálcico hidratado, do monossulfato ou do C₃A com gipsita, e os autores propõem quantificar a formação deste composto a partir de uma única equação simplificada, baseada no teor equivalente de cálcio-aluminatos disponíveis.

A equação simplificada de formação de etringita é descrita na Equação (8). Neste caso, C_a corresponde ao teor equivalente de cálcio-aluminatos disponíveis, definido pela Equação (9), e q é o peso estequiométrico médio das reações de formação de etringita, descrito na Equação (10).

Figura 6 - Esquema cronológico e de dependência entre os modelos numéricos de ESA.



Fonte: Brekailo; Pereira; Medeiros, 2023.



$$C_a = \sum_{i=1}^3 \gamma_i P_i \quad (9)$$

$$q = \sum_{i=1}^3 \gamma_i a_i \quad (10)$$

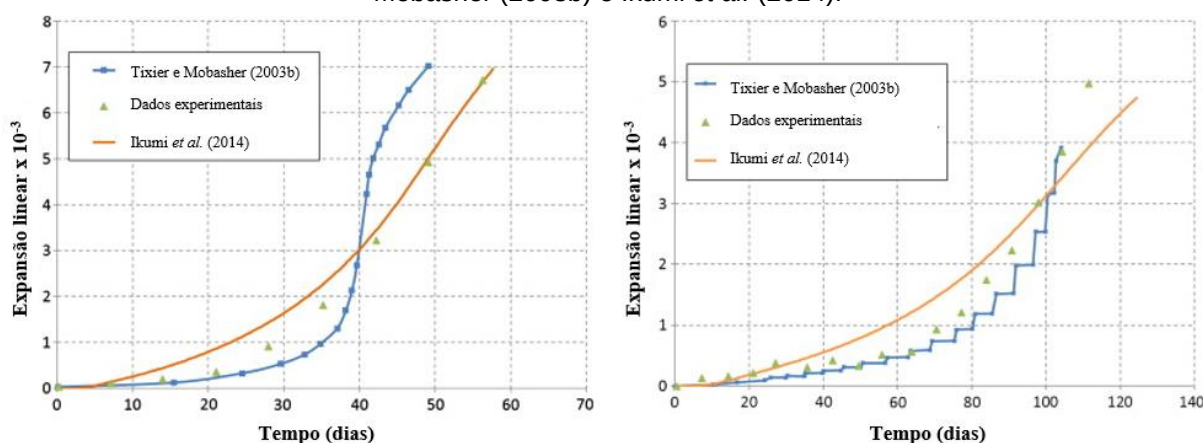
As reações de formação de etringita secundária foram apresentadas nas Equações (2), (3) e (4). Neste caso, γ_i corresponde ao teor de aluminatos em cada um dos reagentes P que forma etringita, e a_i representa o valor estequiométrico dos sulfatos presentes na gipsita em cada uma das reações.

Tixier e Mobasher (2003a) consideram que os esforços serão originados a partir do momento que a taxa de amortecimento for alcançada, que diz respeito a porosidade que deve ser preenchida pelos compostos para que então tenha-se tensões de expansão. Neste caso, apenas a teoria do aumento de volume é considerada, pois mesmo com o apoio da teoria da cristalização na literatura, sua aplicação em modelos ainda é limitada pela complexidade das análises (Ikumi *et al.*, 2014). Outro ponto importante dentro do modelo de Tixier e Mobasher (2003a) é a consideração do efeito do dano gerado pelo ESA na difusividade, já que as fissuras originadas no ataque afetam o coeficiente de difusão e propriedades da matriz.

Novos modelos para descrição do ataque por sulfatos vêm sendo então desenvolvidos, buscando novas respostas e incorporando diferentes análises. Observando a Figura 6, nota-se a possibilidade de avaliar diferentes propriedades da matriz cimentícia, como resistência à flexão, tenacidade a fratura, além da influência de variáveis no ESA, como a temperatura, grau de saturação e a presença de agregados.

Os modelos propostos por Idiart, López e Carol (2011), Ikumi *et al.* (2014) e Tixier e Mobasher (2003a) tem como resposta a expansão da matriz. A Figura 7 ilustra os resultados obtidos na validação destes modelos propostos.

Figura 7 – Expansão linear obtida experimentalmente x calculada pelos modelos de Tixier e Mobasher (2003b) e Ikumi *et al.* (2014).

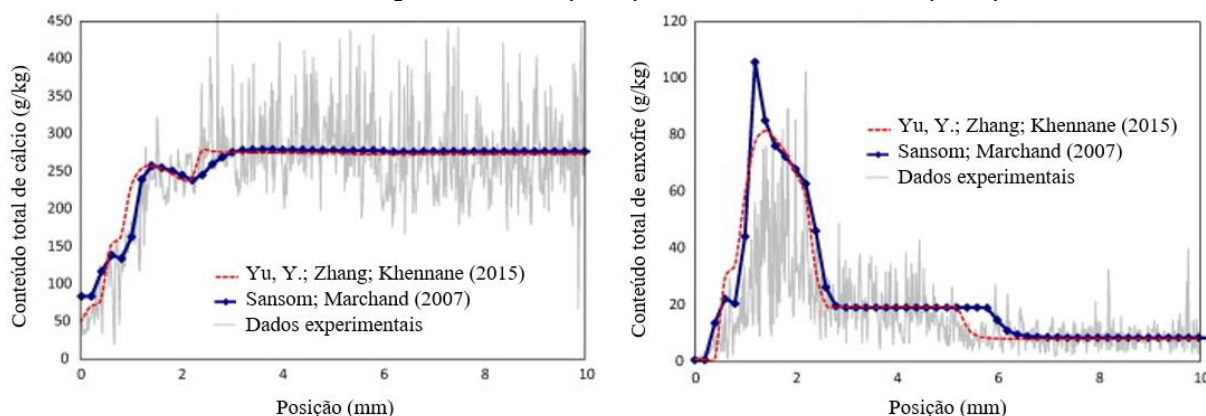


Fonte: Traduzido e adaptado de: Ikumi *et al.*, 2014.

Alguns trabalhos apresentam também propostas para a estimativa da concentração de sulfato e/ou de cálcio ao longo da profundidade da amostra (Qin *et al.*, 2020; Soive; Tran, 2017; Yu, Y.; Zhang; Khennane, 2015), como exemplifica a Figura 8.

No levantamento bibliométrico realizado por Brekailo, Pereira e Medeiros (2023), os modelos numéricos verificaram sua aplicabilidade com dados obtidos para ataque por sulfato de sódio. Os modelos empíricos são também desenvolvidos apenas para este tipo de sulfato, com exceção do trabalho de Santhanam, Cohen e Olek (2002b). Para outros tipos de sulfato, a cinética de difusão e reações são alteradas, fazendo com que os modelos desenvolvidos não sejam adequados.

Figura 8 - Conteúdo de cálcio e enxofre obtido experimentalmente x calculado pelos modelos de Yu, Y., Zhang e Khennane (2015) e Samson e Marchand (2007).



Fonte: Traduzido e adaptado de: Yu, Y.; Zhang; Khennane, 2015.

Os modelos apresentados tem boas relações com dados experimentais, mas ainda há divergências e complexidade nas suas aplicações. Como destacado por Brekailo, Pereira e Medeiros (2023), alguns pontos que ainda divergem na literatura são a consideração ou não da gipsita como produto expansivo, a descrição das expansões pela teoria de aumento de volume ou de pressão de cristalização e a consideração do dano químico ou físico. Ainda, a associação do ataque a solicitações mecânicas e verificação da aplicação dos modelos para diferentes tipos de matrizes cimentícias e para outros tipos de sulfatos. Destaca-se ainda que alguns modelos matemáticos tem a aplicabilidade limitada em função da alta capacidade computacional requerida (Ikumi *et al.*, 2016).

Assim, Brekailo, Pereira e Medeiros (2023) recomendam a associação de modelos numéricos a ajustes empíricos, o que pode ser realizado com dados obtidos em ensaios não destrutivos como medidas de ultrassom e de resistividade elétrica.

2.3.1 Ensaios não destrutivos para ajuste empírico de modelos de sulfatos

Com o intuito de ajustar modelagens de ataque externo por sulfatos a partir de ensaios não destrutivos, entre modelos associados à medidas de resistividade elétrica, cita-se o trabalho de Melara *et al.* (2022). Os autores propõem uma adaptação no modelo numérico desenvolvido por Zhou *et al.* (2015). O modelo de Zhou *et al.* (2015), que tem como base a equação simplificada de formação de etringita proposta por Tixier e Mobasher (2003a), fornece a Equação (11) para previsão da profundidade de penetração de sulfatos.

$$X = \eta \sqrt{\frac{2D_{e,0}t_0^m(C_s - C_0)q}{C_{CA}}} \sqrt{t^{1-m}} \quad (11)$$

Onde:

X = profundidade de difusão dos íons sulfatos;
 η = fator de aceleração das reações devido ao método de exposição aos sulfatos;
 $D_{e,0}$ = coeficiente de difusão medido no tempo t_0 ;
 t_0 = primeira idade de monitoramento;
 t = tempo de exposição à solução de sulfatos;
 m = coeficiente de atenuação da difusão;
 C_s = concentração de sulfatos na solução agressiva;
 C_0 = concentração de sulfatos no concreto aos 28 dias;
 C_{CA} = concentração de aluminatos de cálcio presentes no cimento Portland;
 q = constante estequiométrica das reações de formação de etringita.

A adoção do coeficiente objetiva ajustar a equação em função do método de degradação acelerado adotado, e de acordo com Zhou *et al.* (2015), pode ser determinado pelo ajuste para dois pontos conhecidos da Equação (11). O coeficiente m , pode ser calculado conhecendo a profundidade X de sulfatos em dois tempos distintos, conforme mostra a Equação (12).

$$m = 1 - 2 \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{\ln t_2 - \ln t_1} \quad (12)$$

Para os dois traços de concreto analisados pelos autores, é feito um comparativo entre a profundidade de sulfato calculada de acordo com a Equação (11) e a profundidade determinada experimentalmente, obtendo erros relativos aproximados de 12 a 17%, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados de Melara *et al.* (2022) aplicando o modelo de Zhou *et al.* (2015).

Período de exposição		140 dias	168 dias
Traço A	Experimental	20,9 mm	21,1 mm
	Calculado	24,1 mm	25,4 mm
	Erro relativo	13,3%	16,9%
Traço B	Experimental	21,8 mm	22,6 mm
	Calculado	19,2 mm	20,1 mm
	Erro relativo	13,7%	12,6%

Fonte: Traduzido e adaptado de: Melara *et al.*, 2022.

Melara *et al.* (2022), aplicando a relação de Einstein que correlaciona o coeficiente de difusão $D_{e,0}$ com dados de resistividade elétrica superficial (RES), encontram um fator de relação da concentração iônica com a agressividade do meio ambiente de 10616,15, conforme apresenta a Equação (13). Substituindo esta relação na Equação (11) proposta por Zhou *et al.* (2015), Melara *et al.* (2022) conseguiram calcular a profundidade de difusão de sulfatos a partir de dados de resistividade elétrica (Equação (14)). Os resultados obtidos com este ajuste são apresentados na Tabela 2, reduzindo os erros relativos para valores de 5 a 10%. Assim, nota-se a possibilidade do uso da resistividade como variável nas modelagens do ataque por sulfatos.

$$D_{e,0} = \frac{10616,15}{RES} \quad (13)$$

$$X = \eta \sqrt{\frac{21232,3t_0^m(C_s - C_0)q}{RES \cdot C_{CA}}} \sqrt{t^{1-m}} \quad (14)$$

Tabela 2 – Resultados de Melara *et al.* (2022), com ajuste no modelo de Zhou *et al.* (2015) a partir de dados de resistividade elétrica.

Período de exposição		140 dias	168 dias
Traço A	Experimental	20,9 mm	21,1 mm
	Calculado	22,0 mm	23,2 mm
	Erro relativo	5,1%	9%
Traço B	Experimental	21,8 mm	22,6 mm
	Calculado	20,6 mm	21,5 mm
	Erro relativo	5,9%	4,9%

Fonte: Traduzido e adaptado de: Melara *et al.*, 2022.

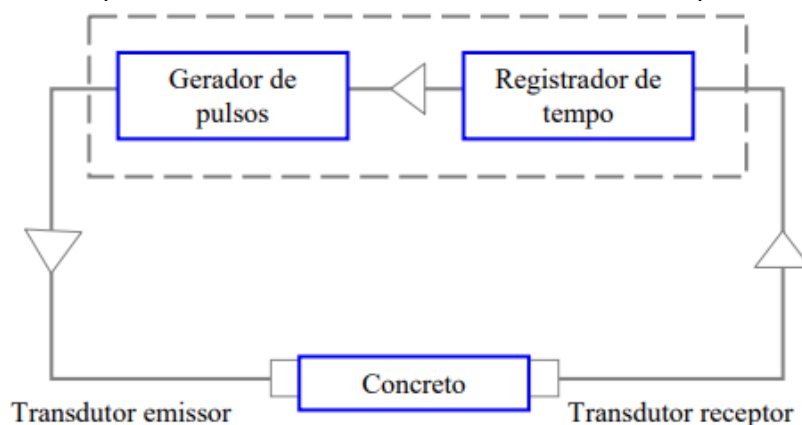
Para modelos associados à medidas de velocidade de pulso ultrassônico para avaliar o dano gerado em matrizes cimentícias, pode-se destacar a pesquisa de Chen, Qian e Song (2016). Os autores definem a evolução do dano D conforme a Equação (15), em função da redução do módulo de elasticidade do material, calculado a partir

das medidas de velocidade de onda. Neste caso, E corresponde ao módulo de elasticidade na idade analisada e $E_{\text{máx}}$ o maior módulo de elasticidade da amostra.

$$D = 1 - \frac{E}{E_{\text{máx}}} \quad (15)$$

O ensaio de ultrassom consiste em um teste não destrutivo para determinação da velocidade de propagação de ondas a partir de pulsos ultrassônicos aplicados na amostra a partir de um transdutor, como ilustra a Figura 9. Este teste é normatizado no Brasil pela NBR 8802 (ABNT, 2019), e seu resultado pode ser relacionado a estimativa de profundidade de fissuras, monitoramento de propriedades do concreto, determinação do módulo de elasticidade dinâmico e avaliação da resistência à compressão da matriz. Pode ser realizado tanto para análise de estruturas em campo como amostras em laboratório.

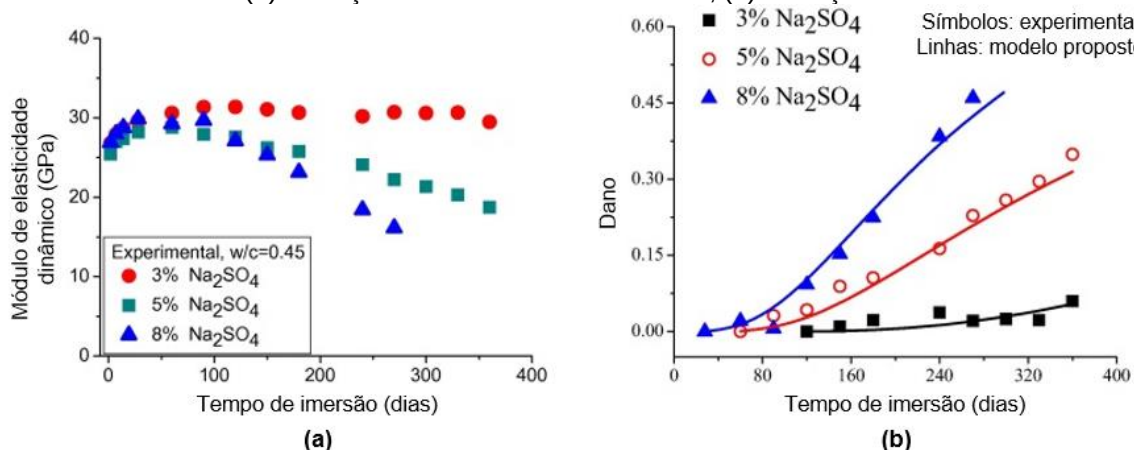
Figura 9 – Princípio do funcionamento do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico.



Fonte: Lorenzi (2009).

Chen, Qian e Song (2016) afirmam que a evolução do dano determinada pela Equação (15) pode ser dividida em duas etapas. Na primeira, o módulo de elasticidade aumenta, pelo preenchimento dos poros pelos produtos das reações com sulfatos, e na segunda etapa o módulo diminui (Figura 10a), onde aplica-se a relação de dano apresentada. Com base nos resultados experimentais, os autores apresentam ainda um modelo teórico de evolução de dano (Figura 10b) (Chen; Qian; Song, 2016). Nota-se também que a evolução do dano é mais rápida quanto maior é a concentração da solução de sulfatos (Figura 10b).

Figura 10 – Avaliação de amostras de concreto expostas a diferentes concentrações de sulfato de sódio: (a) evolução do módulo de elasticidade, (b) evolução do dano.



Fonte: Traduzido de: Chen; Qian; Song, 2016.

O aumento inicial no módulo de elasticidade determinado por medidas de velocidade de onda ultrassom, seguido por sua redução com a evolução no ataque por sulfatos também é observado por outros autores (Sun *et al.*, 2019; Yang; Luo, 2012). Jiang *et al.* (2014), Jiang e Niu (2016) e Wu, Ma e Huang (2021), trabalham com o módulo de elasticidade dinâmico relativo (E_r), valor adimensional obtido da relação entre o módulo de elasticidade na idade t avaliada (E_{dt}) e o módulo de elasticidade inicial das amostras (E_{d0}), antes da exposição à sulfatos, conforme mostra a Equação (16).

$$E_r = \frac{E_{dt}}{E_{d0}} \quad (16)$$

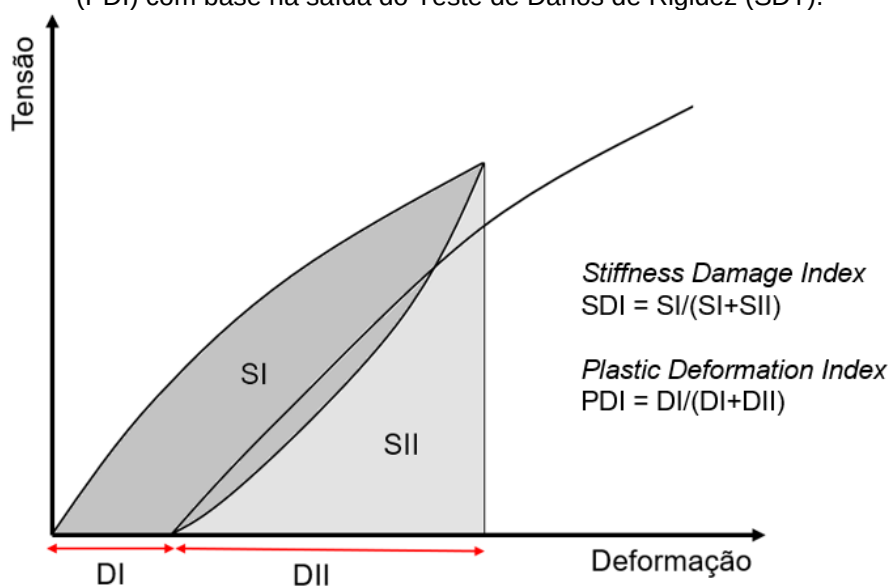
Para avaliação de dano, destaca-se também o Teste de Dano da Rigidez, tradução para *Stiffness Damage Test*, conhecido como SDT. Esta técnica é aqui abordada pois faz parte do escopo experimental desta pesquisa, que investiga este método como parâmetro para ajuste de modelo de sulfatos. O SDT é um ensaio que permite diagnóstico de estruturas tanto em campo como em laboratório, aplicado principalmente para matrizes sujeitas à reação álcali-agregado (RAA) (Langaro, 2023; Sanchez *et al.*, 2014, 2015, 2016), e para avaliação de concretos acometidos por DEF (*delayed ettringite formation*) – formação de etringita tardia (Giannini *et al.*, 2018). Nota-se que ambos casos tratam de reações expansivas em matrizes cimentícias, e, portanto, acredita-se também ser promissor para avaliação do ataque externo por sulfatos.

O SDT é um teste que pode ser aplicado a corpos de prova moldados em laboratório ou obtidos a partir da extração de testemunhos de estruturas em campo. Consiste em aplicar ciclos de carga e descarga de compressão uniaxial com uma carga menor que a resistência à compressão do concreto, de forma a ser um ensaio não destrutivo que permite a utilização de amostras posteriormente para outras análises (Sanchez *et al.*, 2014, 2015, 2016).

Sanchez *et al.* (2014) determinam que a adoção de cargas correspondentes à 40% da resistência à compressão do concreto aos 28 dias é o parâmetro de entrada ideal para o ensaio, mantendo o caráter não destrutivo do teste. A resistência deve ser então determinada previamente ao ensaio de SDT, seja para amostras laboratoriais ou de extração de testemunho. Giannini *et al.* (2018) também afirmam que valores próximos a 40% possibilitaram a caracterização de concretos afetados por DEF.

Como parâmetro de saída, Sanchez *et al.* (2016) apresentam a aplicação de dois índices para avaliação do dano: o *Stiffness Damage Index* (SDI), traduzido para Índice de Dano da Rigidez, e o *Plastic Deformation Index* (PDI), que corresponde ao Índice de Deformação Plástica. Estes índices são determinados com base na razão entre a energia de deformação elástica (área SII) e a energia de deformação plástica (SI), e suas correspondentes deformações DI e DII, representados na Figura 11.

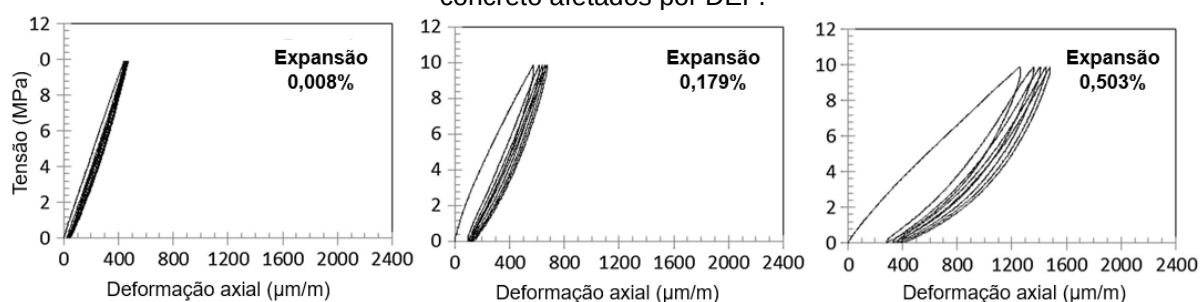
Figura 11 - Determinação do Índice de Danos de Rigidez (SDI) e do Índice de Deformação Plástica (PDI) com base na saída do Teste de Danos de Rigidez (SDT).



Fonte: Adaptado de: Sanchez *et al.*, 2016.

Giannini *et al.* (2018) obtiveram uma boa correlação entre os índices SDI e PDI com a expansão de amostras de concreto com DEF. Além disso, como pode-se observar na Figura 12, quando maior a expansão das amostras, os sinais de maior dano podem também ser vistos de forma qualitativa nas curvas tensão deformação, pelas maiores áreas de histerese, que indicam maior deformação plástica acumulada e rigidez reduzida. Isso ocorre pois para amostras fissuradas, essas fissuras tendem a se fechar na carga de compressão e o concreto perde sua capacidade de retornar à forma original, apresentando assim uma deformação residual a cada ciclo (Giannini *et al.*, 2018; Sanchez *et al.*, 2014).

Figura 12 – Exemplo de gráficos de tensão-deformação obtidos no ensaio de SDT para amostras de concreto afetados por DEF.



Fonte: Traduzido de: Giannini *et al.*, 2018.

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ATAQUE EXTERNO POR SULFATOS

Com base na revisão apresentada no item 2, nota-se:

- O ataque externo por sulfatos é um importante e complexo mecanismo de degradação de concretos e argamassas, que pode ocasionar expansão, fissuras, perda de resistência, chegando até o colapso de estruturas (Mehta; Monteiro, 2014; Skalny; Marchand; Odler, 2002);
- O fenômeno é considerado complexo, pois envolve o transporte da solução na rede de poros, as reações químicas entre os íons sulfatos e a matriz cimentícia, as forças expansivas originadas devido as reações e a resposta mecânica da matriz (Ferraris; Stutzman; Snyder, 2006; Ikumi; Segura, 2019);
- O mecanismo e agressividade da degradação está relacionada ao cátion associado aos íons sulfatos (Mehta; Monteiro, 2014; Santhanam; Cohen; Olek, 2003).

Assim, buscando descrever este fenômeno, podem ser encontrados diferentes modelos na literatura, tanto empíricos quanto numéricos. Porém, ainda não há um consenso sobre as modelagens do ataque externo por sulfatos, além da complexidade na sua aplicação. A associação dos modelos com ensaios não destrutivos, que apresentam resultados rápidos e simples, que podem até mesmo ser aplicados em campo, pode permitir um melhor ajuste, além de facilidade na utilização das modelagens. Além disso, praticamente não são encontrados modelos na literatura que permitam a aplicação para estudos de ataque por sulfato de magnésio.

3 MODELOS DE PREVISÃO DE VIDA ÚTIL BASEADOS EM MIGRAÇÃO IÔNICA E RESISTIVIDADE DO CONCRETO

A presente Tese tem como proposta a adaptação do modelo de Andradre, C. (2004), que permite a previsão do tempo de iniciação e corrosão de armaduras expostas a íons cloretos. Para tanto, baseia-se em medidas de resistividade elétrica e dados obtidos em ensaios de migração iônica em amostras de concreto. Assim, estas metodologias serão descritas a seguir, para então a formulação do modelo original de Andradre, C. (2004) ser apresentada.

3.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica (ρ) é uma propriedade dos materiais relacionada a sua capacidade de transporte de cargas elétricas. Esta propriedade corresponde ao inverso da condutividade, ou seja, está relacionada com a resistência da passagem de corrente no interior do material. A resistividade é descrita na Equação (17) (Callister Jr; Rethwish, 2012; Halliday; Resnick, 2016).

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (17)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$);

R = resistência elétrica do material (Ω);

A = área da seção do material (m^2).

L = comprimento do material (m).

De acordo com a lei de Ohm (Equação (18)), a tensão (V) é proporcional a corrente elétrica (I), tendo como constante de proporcionalidade a resistência elétrica (R) do material. Assim, pela lei de Ohm, conhecida a diferença de potencial entre dois pontos e a intensidade de corrente que atravessa o material, pode-se determinar a resistência elétrica, e com isso, determina-se a resistividade elétrica, com base na Equação (17).

Expandido este conceito ao concreto, devido ao movimento dos íons na solução aquosa pela rede de poros da matriz, origina-se corrente elétrica. É possível então possível medir a sua resistividade elétrica, que representará a maior ou menor

facilidade de movimentação dos íons. Sendo assim, o valor da resistividade determinado será dependente da porosidade do concreto, no que diz respeito a quantidade, interconectividade, tamanho e distribuição dos poros. Depende também do seu grau de saturação, da composição química da solução aquosa dos poros, e do teor de umidade do concreto (Halliday; Resnick, 2016; Villagrán Zaccardi *et al.*, 2009).

$$V = R.I \quad (18)$$

Dentro de uma peça de concreto, pode-se citar duas regiões, com valores de resistividade elétrica diferentes. A primeira delas, uma zona superficial, exposta a maiores variações de umidade e, conseqüentemente, de valor da resistividade em curtos períodos de tempo. A segunda, uma zona interna, com menor variação na quantidade de água e maior estabilidade da resistividade (Lencioni, 2011). Para as avaliações feitas nesta região superficial, que envolve também processos de degradação devido à agentes externos, adota-se também a nomenclatura de resistividade elétrica superficial, conhecida pela sigla RES (Melara, 2021).

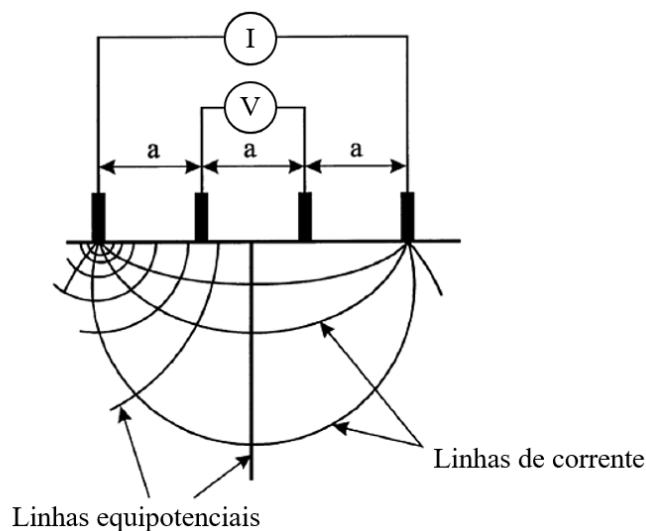
A determinação da resistividade elétrica do concreto pode ser realizada por diferentes técnicas experimentais, como o método do eletrodo externo, método direto, método dos dois pontos, método da resistividade volumétrica (ou dos três pontos) e o método dos quatro pontos (Lencioni, 2011). O método mais empregado na literatura, e também de interesse desta Tese, é o método dos quatro pontos.

O método dos quatro pontos, conhecido também como método de Wenner, é normatizado pela UNE 83988-2 (UNE, 2012b). Esta metodologia permite a obtenção da RES por meio de um equipamento disponível comercialmente, que pode ser aplicado tanto em campo quanto em laboratório. A Figura 13 apresenta um esquema do método, que consiste em posicionar quatro eletrodos (por isso o nome método dos quatro pontos) equidistantes em uma linha. Uma corrente elétrica é aplicada, e mede-se a diferença de potencial entre os dois eletrodos internos, que permite a determinação da resistividade elétrica do concreto (UNE, 2012b).

O método tem como hipótese a existência de um meio semi-infinito, de forma que a corrente se propague de forma uniforme. Para peças de concreto menores, como amostras de laboratório, o valor medido pode não corresponder ao valor real de resistividade. Assim, deve-se considerar fatores de forma para corrigir as

determinações em amostras pequenas, que podem ser encontrados na UNE 83988-2 (UNE, 2012b).

Figura 13 – Esquema do método de Wenner.



Fonte: Traduzido de Gowers; Millard, 1999.

O ensaio de resistividade elétrica é destacado na literatura por se tratar de uma metodologia não destrutiva, de baixo custo e fácil execução (Andrade, C.; D'Andrea, 2010, 2011; Azarsa; Gupta, 2017; Rehman *et al.*, 2016). Estes benefícios fazem que este seja um parâmetro promissor na avaliação da durabilidade de matrizes cimentícias (Wang, Z. *et al.*, 2013). Propriedades como resistência à compressão podem ser avaliadas utilizando a resistividade como indicador, além de poder auxiliar na dosagens de concretos (Andrade, C.; D'Andrea, 2010, 2011; Mendes, S. E. S. *et al.*, 2018; Sabbağ; Uyanik, 2018).

As medidas de resistividade elétrica podem ser ajustadas à resistência à compressão através de curvas logarítmicas ou retas, obtendo valores de R^2 acima de 0,9. A medida que a resistência aumenta, a resistividade também (Dong *et al.*, 2016; Ferreira; Jalali, 2010; Mendes, S. E. S. *et al.*, 2018; Wei; Xiao; Li, 2012). Medeiros-Junior *et al.* (2019) também obteve boas correlações para amostras em situação molhagem e secagem com soluções de sulfatos, com valores de R^2 de 0,969, 0,955, 0,796 e 0,829 para análises aos 42, 91, 140 e 189 dias, respectivamente. Esse valor sobe para 0,981 ao se relacionar a resistência à compressão aos 189 dias com as medidas iniciais de resistividade das amostras, de forma a possibilitar a estimativa da

resistência à compressão de uma amostra exposta a sulfatos com dados iniciais de resistividade.

Além disso, por se tratar de um parâmetro relacionado a movimentação dos íons na rede de poros, a resistividade elétrica pode ser associada as propriedades de transporte do material (Wang, Z. *et al.*, 2013). Esta avaliação indireta da porosidade e conectividade dos poros do concreto está também relacionada ao transporte de substâncias nestes poros, que podem ou não conter agentes agressivos à matriz cimentícia, como íons cloretos, sulfatos e CO₂ (Medeiros-Junior, 2014). O uso da resistividade como parâmetro para avaliar o risco de corrosão de armaduras pode ser encontrado em diversas pesquisas, muitas vezes associado a avaliações de potencial de corrosão (Balestra *et al.*, 2019; Hornbostel; Larsen; Geiker, 2013; Shevtsov; Zartsyn; Komarova, 2021).

3.1.1 Variáveis que influenciam na resistividade elétrica do concreto

Azarsa e Gupta (2017) apresentam em seu trabalho uma revisão da literatura sobre o uso da resistividade elétrica do concreto para avaliações de durabilidade. Um dos itens desta pesquisa trata sobre parâmetros que tem influência na resistividade elétrica, que são divididos pelos autores em fatores intrínsecos ao concreto e fatores que afetam as medidas de condutividade. É importante observar esses fatores para garantir a qualidade dos resultados obtidos (Melara, 2021).

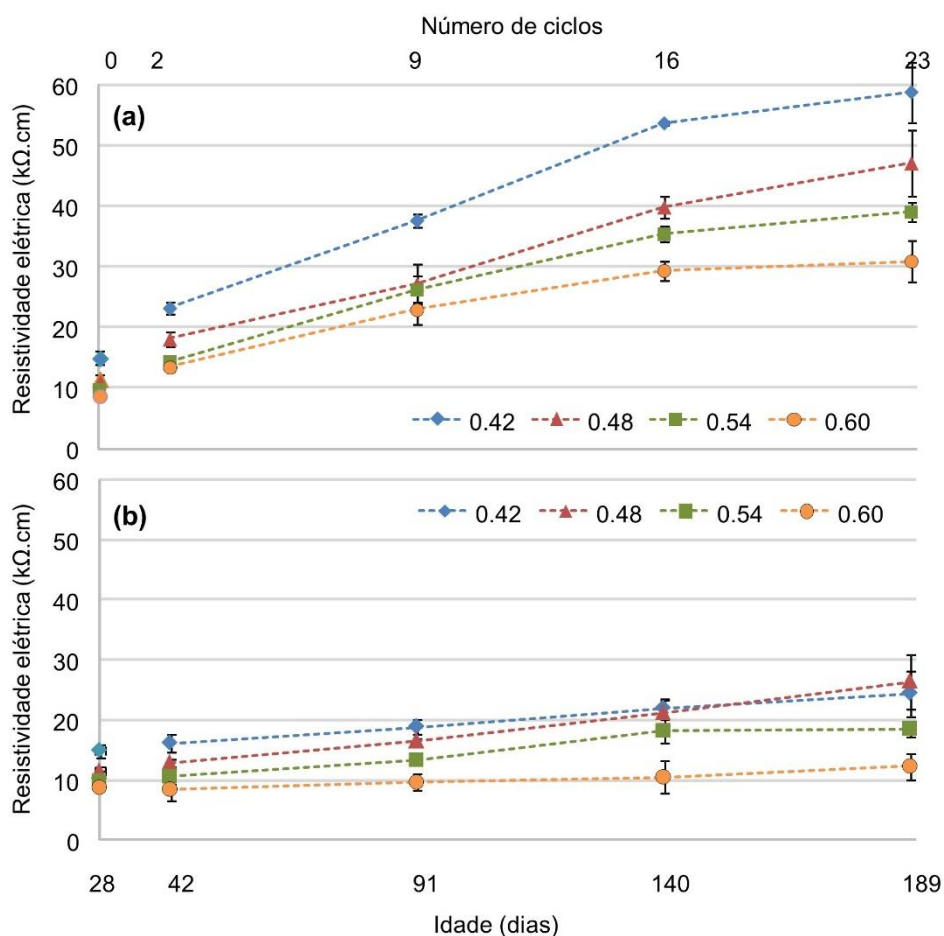
No primeiro grupo, dos fatores intrínsecos, Azarsa e Gupta (2017) destacam a relação água/cimento adotada, o tamanho e tipo de agregado e as condições de cura. Pode-se acrescentar ainda o tipo e consumo de cimento Portland (Medeiros-Junior *et al.*, 2014). Todos estes parâmetros tem impacto na distribuição de poros da microestrutura do concreto, quantidade de água livre na solução de poros e também na sua composição química, e consequentemente, influenciam na resistividade elétrica determinada.

Azarsa e Gupta (2017) indicam ainda como fatores que afetam as medidas de condutividade a presença de armaduras e/ou fissuras no concreto. Tem-se também parâmetros relativos à realização do ensaio pelo método de Wenner, como espaçamento entre os eletrodos, a área de contato do eletrodo com a amostra, forma e frequência do sinal elétrico.

Pode-se ainda apresentar fatores extrínsecos ao concreto, relativos ao meio ambiente onde a peça está inserida, que também tem impacto na resistividade elétrica determinada. Entre eles, destaca-se a temperatura e a presença de íons agressivos, como dióxido de carbono, cloretos e sulfatos (Melara, 2021).

Saleem *et al.* (1996) observaram redução na resistividade elétrica de amostras de concreto devido a contaminação de sulfatos. Medeiros-Junior *et al.* (2019) estudam o efeito da ciclos de molhagem e secagem com soluções com a presença de cloretos e sulfatos, isolados ou combinados, na resistividade de amostras de concreto. O cimento adotado pelos autores foi do tipo CP IV, com adição de cinza volante. A Figura 14 apresenta os resultados da evolução de resistividade das amostras de Medeiros-Junior *et al.* (2019).

Figura 14 - Evolução da resistividade elétrica de concretos expostos a ciclos de molhagem e secagem com (a) água, (b) sulfatos.



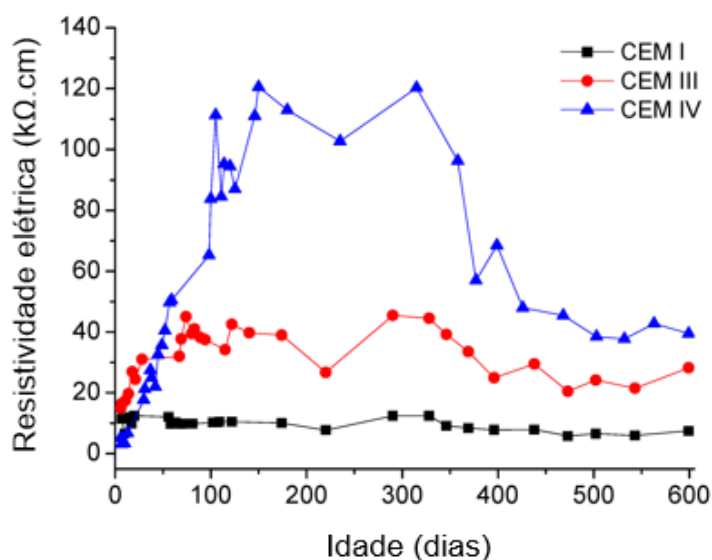
Fonte: Traduzido de Medeiros-Junior *et al.*, 2019.

Como mostra a Figura 14, a resistividade medida foi menor para as soluções com sulfatos quando comparado aos ciclos em água, mas com tendências de

crescimento no tempo analisado (de 189 dias). Melara *et al.* (2022) também obtiveram aumento na resistividade elétrica de amostras de concreto expostas a sulfatos ao longo do tempo, utilizando cimento do tipo CP V-ARI, com análises até 168 dias. O decréscimo na resistividade observado por Saleem *et al.* (1996) ou a redução nos valores de resistividade na presença de sulfatos quando comparado a ciclos em água no trabalho de Medeiros-Junior *et al.* (2019) pode ser justificada pelos íons presentes na solução de poros facilitarem a movimentação das cargas, reduzindo os valores de resistividade (Koleva *et al.*, 2008).

Ortega *et al.* (2016, 2017) estudaram o comportamento de pastas de cimento em ambientes de sulfato. Para tanto, os autores adotaram cimento do tipo CEM I, que corresponde a um cimento sem adições pozolânicas, cimento do tipo CEM III, que contém adição de escória de alto-forno, e cimento do tipo CEM IV, com adição de cinzas volantes (Figura 15).

Figura 15 - Evolução da resistividade elétrica de pastas de cimento expostas a sulfatos.



Fonte: Traduzido de Ortega *et al.*, 2017.

A resistividade das pastas com cimento CEM III são superiores ao cimento CEM I, e ambas apresentam pouca variação ao longo do tempo, diferente do que ocorre no cimento CEM IV. Para o cimento CEM IV, que possui cinza volante na composição, nota-se que a resistividade aumenta em uma alta taxa nas primeiras idades, permanecendo praticamente constante até 350 dias, seguida uma queda. Os autores associam estes menores valores de resistividade nas idades iniciais do CEM IV ao retardo das reações pozolânicas da cinza volante, quando comparada a

hidratação da escória (CEM III) e do cimento sem adições (CEM I), já que as reações se iniciam apenas quando há portlandita suficiente formada. As pastas com cimento do tipo CEM I apresentaram os menores valores quando comparado aos outros cimentos, justificado pelos autores pelo refinamento da rede de poros nas amostras com cimentos com adições reativas (Ortega *et al.*, 2017).

3.2 MIGRAÇÃO IÔNICA

O transporte de fluidos na matriz cimentícia está relacionado a sua durabilidade, já que o transporte de água pura pode ser agressivo ao concreto, além de substâncias agressivas que podem estar dissolvidos nos fluidos. O transporte depende de fatores relacionados ao meio ambiente, as características intrínsecas do material e ao mecanismo de transporte de fluido (CEB, 1992; Kropp, J; Hilsdorf, H.; Grube, H.; Andrade, C.; Nilsson, 1995).

Os fluidos podem ser transportados por permeabilidade, absorção capilar, migração e difusão iônica (Nepomuceno, 2005). A migração corresponde ao fluxo de espécies iônicas devido à uma diferença de potencial, geralmente originada por dois eletrodos de cargas opostas, e neste caso, os íons se dirigem em direção ao eletrodo de carga oposta. Este mecanismo é muitas vezes associado a ensaios acelerados, pois permite o transporte de íons (como Cl^- e SO_4^{2-}) em tempos mais curtos, quando comparado a situações de difusão natural (Mendes, M. V. A. S., 2009).

O procedimento experimental envolvendo migração de íons em concreto são normalmente desenvolvidos para estudos de íons cloretos. A metodologia foi idealizada por Whiting, em 1981, e é atualmente normatizada pela (ASTM, 2019), utilizada para avaliar a penetrabilidade de cloretos no concreto. Neste ensaio, a força motriz da migração é uma diferença de potencial de 60 V. A alta tensão possui críticas na literatura, pois faz com que a carga avaliada seja referente a todos íons presentes na solução, além de pode levar ao aquecimento das amostras (Andrade, C., 1993).

Andrade, C. (1993) apresenta um estudo da aplicação da equação de Nernst-Planck, que governa a transferência de massa em eletrólitos, para o cálculo do coeficiente de difusão de cloretos a partir de ensaios de migração iônica. Esta equação é composta por três termos, referentes a difusão, a migração e a convecção. Para permitir sua aplicação, algumas simplificações são apresentadas pela autora, entre elas, o termo da convecção não é considerado relevante e o termo da difusão é

desprezado devido à alta tensão do ensaio. Assim, a equação de Nernst-Plank é resumida a parcela da migração (19):

$$J = \frac{zF}{RT} D_s C \frac{\Delta E}{l} \quad (19)$$

Onde:

J = fluxo unidirecional dos íons (mol/s.cm²)

D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário ou coeficiente de difusão efetivo (cm²/s);

z = valência do íon

F = constante de Faraday (96,5 J/Vmol);

R = constante dos gases (8,31 J/molK);

T = temperatura (K);

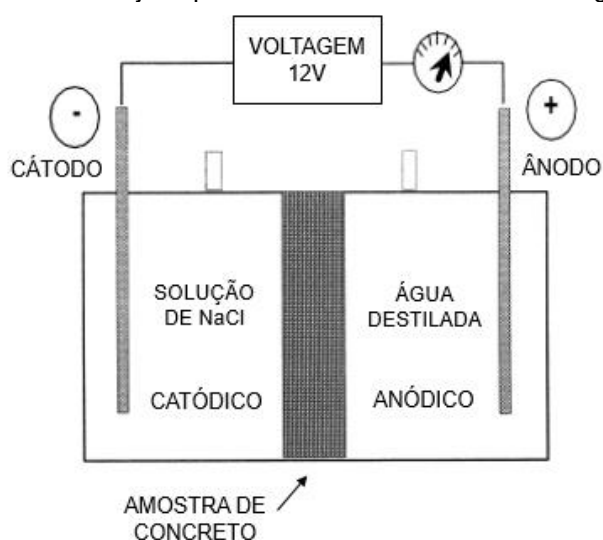
C = concentração do íon na célula catódica (mol/cm³)

l = espessura do disco de concreto (cm);

ΔE = média da tensão efetiva que atravessa as amostras durante o estado estacionário.

A tensão aplicada deve então ser suficiente para permitir que se despreze a difusão, mas de forma que não gere um aquecimento das amostras. O valor de 12 V é adotado por Andrade, C. (1993), e também o normatizado na UNE 83987 (UNE, 2012a). O arranjo do ensaio é apresentado na Figura 16, onde a amostra de concreto é colocada entre dois compartimentos, o catódico e o anódico. O compartimento catódico é preenchido com solução de NaCl, enquanto o anódico com água destilada. Uma ddp de 12 V é aplicada, de forma a acelerar a passagem dos íons Cl⁻ através da amostra para o ânodo, antes livre destes íons.

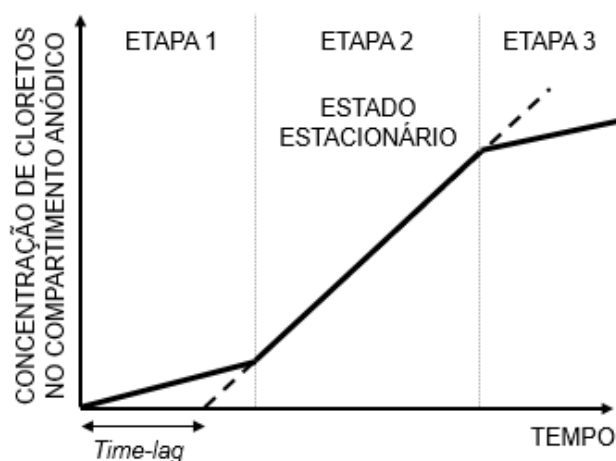
Figura 16 - Arranjo experimental usado em testes de migração.



Fonte: Traduzido de: Castellote; Andrade; Alonso, 2001.

Este mesmo ensaio pode ser adotado para determinar o coeficiente de difusão dos íons cloretos em estado não estacionário (D_{ns}), também conhecido como coeficiente de difusão aparente. Este coeficiente considera as reações entre os íons e a matriz cimentícia, o que não é considerado no coeficiente efetivo. Ao avaliar a variação da concentração de íons ao longo do tempo no compartimento anódico, percebe-se a divisão de três fases. A primeira apresenta um período de saturação das amostras em relação ao íon, seguido pelo período estacionário, com variação linear da concentração no tempo, e a terceira fase representa o fim do ensaio (Figura 17).

Figura 17 – Representação da variação da concentração do compartimento anódico com o tempo durante o ensaio de migração de cloretos.



Fonte: Adaptado de: UNE 83987, 2012a.

Assim, é possível identificar o período estacionário e não estacionário. Os dados da etapa 2 são adotados para o cálculo do coeficiente de difusão efetivo. Já o coeficiente de difusão aparente é determinado com base no tempo chamado de *time-lag* (t_{tl}), obtido pela intersecção da linha reta do fluxo de íons característico do estado estacionário com o eixo horizontal do gráfico. O cálculo do D_{ns} pode então ser feito por meio da Equação (20), apresentada na metodologia da UNE 83987 (UNE, 2012a). As Equações (21) e (22), propostas por Castellote, Andrade e Alonso, (2001), também permitem o cálculo do D_{ns} em função do *time-lag*.

$$D_{ns} = \frac{l^2}{2 \cdot t_{tl} \cdot \phi} \quad (20)$$

$$\frac{t_{tl}}{t_{dif}} = \frac{6}{v^2} \left[v \cdot \coth \frac{v}{2} - 2 \right] \quad (21)$$

$$D_{ns} = \frac{l^2}{3 \cdot t_{dif}} \quad (22)$$

Outra forma de calcular o coeficiente de difusão D_{ns} é pela formulação de uma solução de Nernst-Plank para estado não estacionário (Equação (23)), desde que mantenha-se constante o campo elétrico (Andrade, C. *et al.*, 1994). Considerando as condições de contorno que constam nas Equações (24) e (25), tem-se uma solução para o estado não estacionário (Equação (26)).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{FZ\Delta E}{RT} D_{ns} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (23)$$

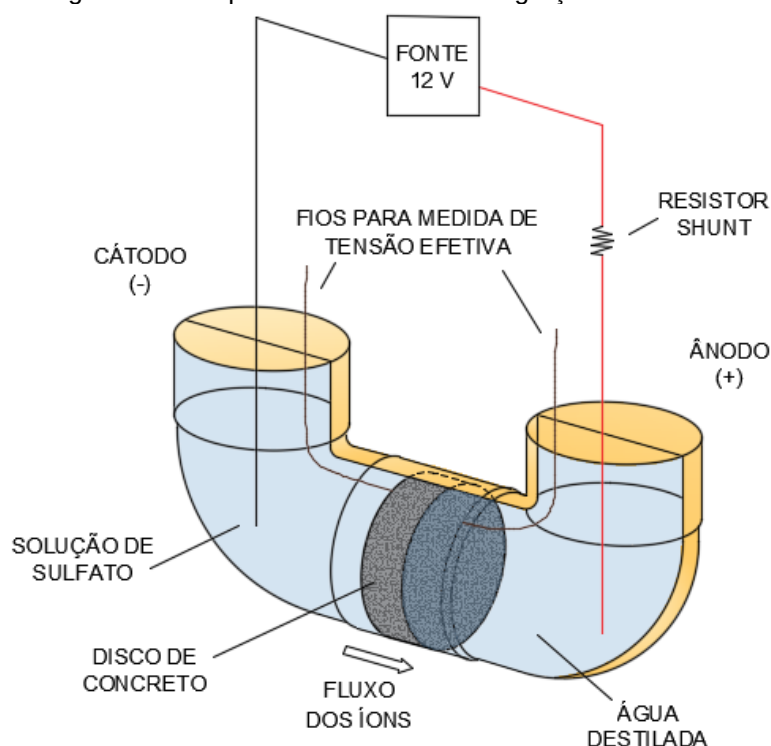
$$C_x=0, x>0, t=0 \quad (24)$$

$$C_x= C_s, x=0, t>0 \quad (25)$$

$$C_x = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \sqrt{\frac{FZ\Delta E}{RT} D_{ns} t}} \quad (26)$$

Estas metodologias foram desenvolvidas para aplicação de estudos de íons cloretos. Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a, 2023b) propõe uma adaptação no ensaio para permitir seu uso para outros agentes agressivos, neste caso, os íons sulfatos. A proposta feita pelos autores corresponde a uma adaptação da solução catódica, adotando soluções de sulfato de sódio e magnésio, com concentrações 5 e 10% de SO_4^{2-} . A ddp adotada foi de 12 V, e as amostras estudadas foram discos de concreto com (25 ± 5) mm de espessura (Figura 18). A concentração da solução anódica foi monitorada a partir do acompanhamento da condutividade elétrica da solução, assim como Castellote, Andrade e Alonso, (2001) propuseram em seu estudo para íons cloretos.

Figura 18 – Esquema das células de migração de sulfatos.



Fonte: Brekailo, 2020.

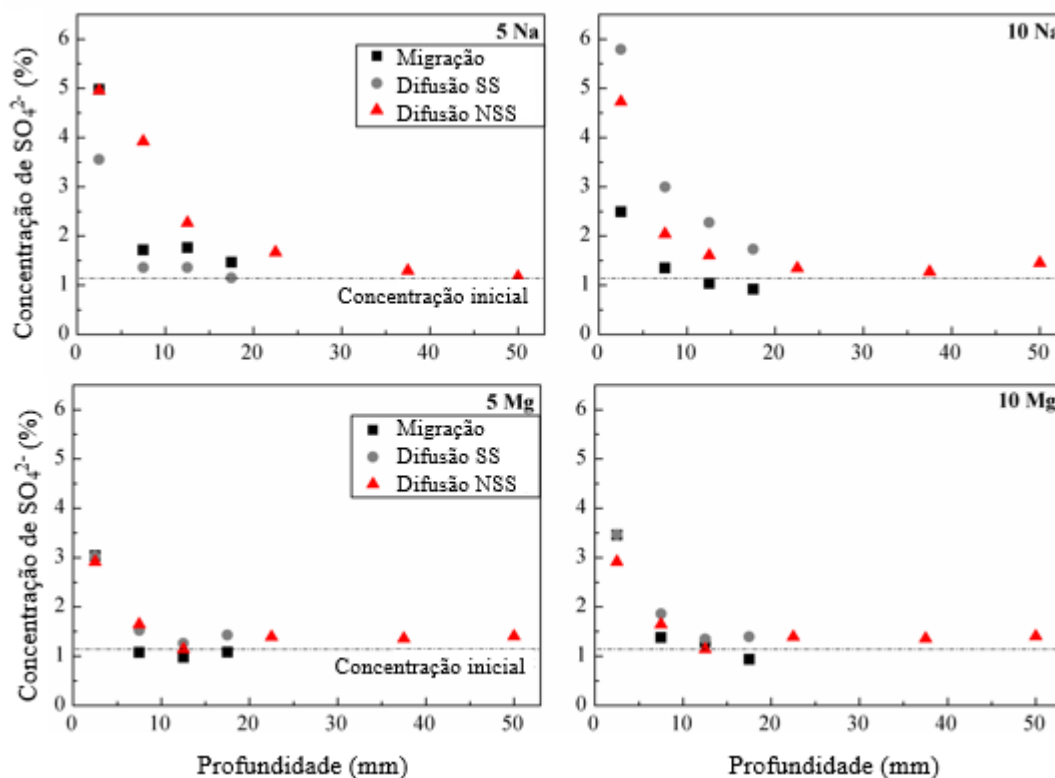
Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a) obtiveram perfis de sulfatos próximos para as amostras de migração e difusão natural, em especial quando o sulfato de magnésio foi adotado no cátodo, como pode ser visto na Figura 19. Neste caso, as soluções com concentração de 5% de SO_4^{2-} apresentaram melhor ajuste no perfil de sulfatos quando comparadas às de 10% de SO_4^{2-} .

Os melhores resultados de coeficiente de difusão calculados por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a) foram obtidos para as soluções com concentrações de 10% de SO_4^{2-} , tanto para estado estacionário (Figura 20) quanto não estacionário (Figura 21). Para este último, foi necessário um fator empírico de ajuste. Para o cálculo do coeficiente de difusão efetivo, a autora adota a equação de Nernst-Plank, e para o coeficiente aparente, a Equação (26), já que não foi identificado *time-lag* para as amostras de sulfato.

Outros trabalhos adotam o ensaio de migração para estudos de íons sulfatos, mas nestes casos, não com o foco no cálculo do coeficiente de difusão, como pode ser visto em Huang *et al.* (2015, 2016, 2017), Li, C. *et al.* (2020) e Lorente, Yssorche-Cubaynes e Auger (2011). Neste caso, os autores avaliam o efeito do campo elétrico em amostras de concreto e argamassa expostas a sulfatos (Huang *et al.*, 2016, 2017; Lorente; Yssorche-Cubaynes; Auger, 2011; Zheng; Bai; Li, 2020), e seu uso como

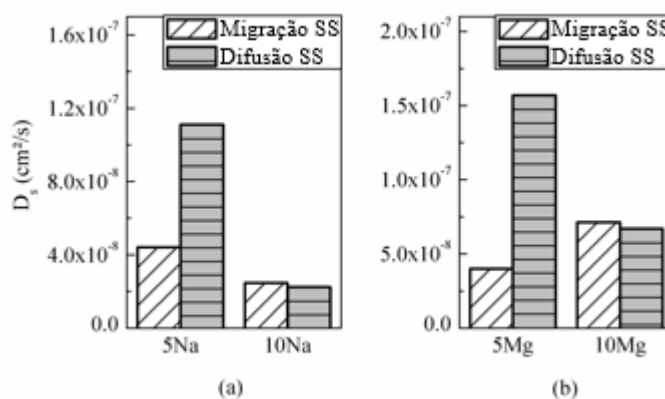
forma de acelerar o ataque por sulfatos (Huang *et al.*, 2015). Apenas Hou, He e Liu (2021) abordam o uso da migração no cálculo do coeficiente de difusão de sulfatos, mas aplicado a argamassas com cimento de sulfoaluminato de cálcio, que neste caso, não apresentaram bons resultados.

Figura 19 – Perfil de concentração de sulfatos nas amostras de concreto após ensaios de migração e difusão natural em estado estacionário (SS) e não estacionário (NSS).



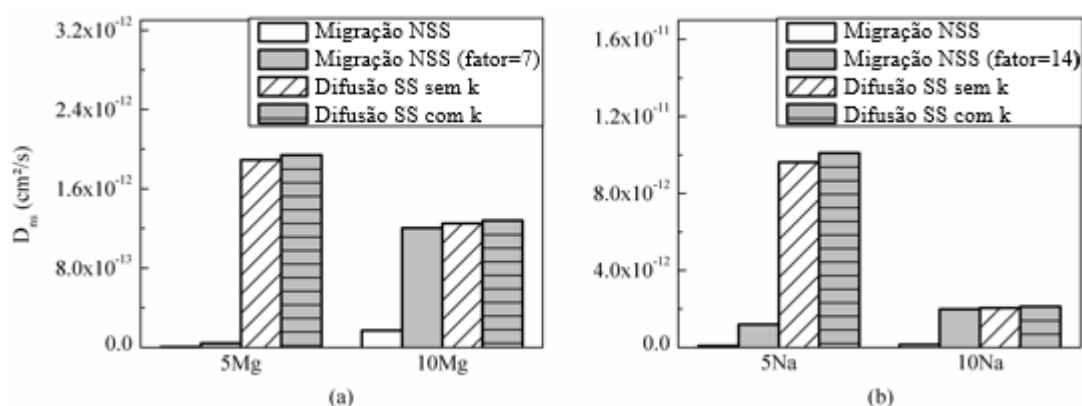
Fonte: Traduzido de: Brekailo; Pereira; Medeiros-Junior, 2023a.

Figura 20 - Coeficientes de difusão de sulfato de migração e difusão em estado estacionário: (a) sulfato de sódio, (b) sulfato de magnésio.



Fonte: Traduzido de: Brekailo; Pereira; Medeiros-Junior, 2023a.

Figura 21 - Coeficientes de difusão de sulfato de migração e difusão em estado não estacionário: (a) sulfato de sódio, (b) sulfato de magnésio.



Fonte: Traduzido de: Brekailo; Pereira; Medeiros-Junior, 2023a.

3.3 FORMULAÇÃO DO MODELO DE ANDRADE (2004)

O modelo de Andrade, C. (2004) foi desenvolvido para estudos de relacionados a corrosão de armaduras e consequente previsão de vida útil de estruturas, onde o processo corrosivo pode ser iniciado por ação de íons cloretos ou por carbonatação. O modelo propõe o uso de medidas de resistividade elétrica para determinar os períodos de iniciação e propagação do processo de corrosão. No período de iniciação, a resistividade elétrica é proporcional à porosidade da matriz, indicando o espaço disponível para os íons Cl^- ou CO_2 penetrarem. Durante este período, a resistividade pode ser relacionada ao cálculo dos processos de transporte, foco desta pesquisa (Andrade, C.; D'Andrea; Rebolledo, 2014). Assim, apenas a etapa de iniciação do modelo de Andrade, C. (2004) será descrita.

A resistividade elétrica está relacionada ao coeficiente de difusão efetivo da matriz, o que é descrito pelo lei de Einstein apresentada na Equação (27) (Andrade, C., 1993, 2004).

$$D_s = \frac{k_{\text{Cl}}}{\rho_{\text{ef}}} \quad (27)$$

Onde:

k_{Cl} = fator que depende da concentração externa de agentes agressivos ($\text{cm}^3 \cdot \Omega / \text{ano}$);
 ρ_{ef} = resistividade efetiva do concreto saturado ($\Omega \cdot \text{cm}$).

A referida lei trata de uma aplicação prática específica para estudos de concreto da equação de Einstein-Smoluchowski (Equação (28)). Tal equação

relaciona a mobilidade elétrica das partículas (μ), a constante de Boltzmann (k_B) e a temperatura (T) (Evangelista *et al.*, 2024).

$$D_s = \mu \cdot k_B \cdot T \quad (28)$$

A mobilidade elétrica está relacionada com a condutividade elétrica (σ), dependendo da concentração de portadores de carga (n) e da carga do elétron (e) (Equação (33)). Substituindo a equação de mobilidade (Equação (33)) na equação de Einstein-Smoluchowski (Equação (28)), tem-se uma relação do coeficiente de difusão com a condutividade elétrica do material, que pode ser vista na Equação (34). A condutividade elétrica, por sua vez, é o inverso da resistividade elétrica (ρ) (Equação (31)) (Callister Jr; Rethwish, 2012).

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu \quad (29)$$

$$D_s = \frac{\sigma \cdot k_B \cdot T}{n \cdot e} \quad (30)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (31)$$

O uso da lei de Einstein em sua forma simplificada para concretos pode ser verificada em diversos trabalhos de Andrade, C (Andrade, C., 1993, 2004; Andrade, C.; D'Andrea, 2010; Andrade, C.; D'Andrea; Rebolledo, 2014; Andrade, C., 2018). Destaca-se a importância desta relação que permite a análise da difusão dos íons a partir de medidas obtidas em um ensaio não destrutivo.

Porém, a expressão não considera a ligação dos íons com a matriz cimentícia, e assim, um fator de reação (r_{cl}) deve ser acrescentado, de forma a representar o retardo na penetração dos íons devido as reações com os componentes do cimento hidratado. Dividindo ambos lados da Equação (27) pelo fator de reação, é possível determinar o coeficiente de difusão aparente por meio da Equação (32) (Andrade, C., 2004; Medeiros-Junior, 2014).

$$\frac{D_s}{r_{cl}} = \frac{k_{Cl}}{\rho_{ef} \cdot r_{cl}} \therefore D_{ns} = \frac{k_{Cl}}{\rho_{ef} \cdot r_{cl}} \quad (32)$$

Andrade, C., D'Andrea e Rebolledo (2014) definem o fator de reação como uma relação linear entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente, e para homogeneizar as unidades dos coeficientes, a porosidade ε (%) da matriz é considerada (Equação (33)).

$$r_{cl} = \frac{D_s}{D_{ns} \cdot \varepsilon} \quad (33)$$

Nota-se então que o fator de reação r_{cl} pode ser obtido a partir da determinação da porosidade e de ensaios de migração iônica, que possibilitam o cálculo dos coeficientes de difusão. Andrade, C. e D'Andrea (2010) e Andrade, C., D'Andrea e Rebolledo (2014) apresentam valores do fator de reação para cimentos utilizados na Europa e nos Estados Unidos. Valores referentes a cimentos brasileiros podem ser encontrados em Medeiros-Junior (2014).

Além da reação entre os íons cloretos e a matriz cimentícia, Andrade, C. (2004) destaca a necessidade de considerar a variação de tempo no valor da resistividade elétrica, devido aos processos de hidratação do cimento. Isso é feito por meio da consideração de um fator idade (q) (34). O fator idade também varia em função do tipo de cimento, e alguns valores podem ser encontrados em Andrade, C. e D'Andrea (2010) e Medeiros-Junior (2014).

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \left(\frac{t_2}{t_0} \right)^q \quad (34)$$

Onde:

ρ_2 = resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$) em uma idade t_2 (em anos);

ρ_0 = resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$) na primeira medição, em t_0 (em anos, usualmente é igual a 28 dias, após a cura saturada do concreto).

O momento de despassivação das armaduras pode ser descrito pela lei da raiz quadrada do tempo (Equação (35)) (Tuutti, 1982).

$$t = \frac{x^2}{D_s} \quad (35)$$

Onde:

t = tempo de iniciação da corrosão (anos);

x = profundidade da penetração limite de cloretos.

Assim, substituindo então a Equação (32) em (35), e considerando a resistividade corrigida em função de um fator tempo, tem-se o modelo de Andrade, C. (2004) para determinação do início da corrosão, dado na Equação (36).

$$t = \frac{x^2 \cdot \rho_2 \cdot r_{cl}}{k_{cl}} \quad (36)$$

O modelo proposto pode ser adotado com diferentes abordagens. Conhecida a resistividade do concreto e o tempo necessário de vida útil, é possível determinar a espessura de cobrimento necessária para as armaduras. Outra possibilidade é a determinação da resistividade mínima aos 28 dias em função de um cobrimento desejado. Para uma estrutura já em uso, é possível determinar a vida de serviço remanescente, considerando que o estado limite seja o momento de despassivação das armaduras (Medeiros-Junior, 2014).

O modelo de Andrade, C. (2004) pode ser utilizado ainda para dosagens de concreto, em uma metodologia descrita por Andrade, C. e D'Andrea (2011), que objetiva dosar o concreto de forma a obter um valor de resistividade pré-estabelecido. Neste método de dosagem, deve-se selecionar o tipo de cimento, para se obter algumas variáveis junto ao seu fabricante. Estima-se então a relação água/cimento (a/c), utilizada então para calcular a porosidade da pasta de cimento e do concreto. Assim, é possível estimar o valor da resistividade elétrica para a dosagem estabelecida. O valor de resistividade estimado é substituído na Equação (36), e verifica-se se é o suficiente para garantir a vida de serviço necessária (Medeiros-Junior, 2014; Mendes, S. E. S. *et al.*, 2018).

É possível observar a aplicação do modelo de Andrade, C. (2004) em diferentes estudos, como andrade, C.; D'Andrea; Rebolledo, 2014, Medeiros-Junior e Bem (2020) e Mendes, S. E. S. *et al.* (2018), associado geralmente à previsões de corrosão de armadura. Já sua aplicação aos íons sulfatos ainda não é consolidada. Melara *et al.* (2022) apresentam o primeiro estudo da aplicação direta do modelo de Andrade, C. (2004) para a previsão da penetração de íons sulfato.

Melara *et al.* (2022) adotam duas dosagens de concreto, com consumo de cimento fixo para moldagem de corpos de prova cúbicos (150 mm de comprimento

lateral) e cilíndricos ($\Phi 100 \times 200$ mm). As amostras foram expostas a ciclos de molhagem e secagem de 7 dias em solução de 10% de Na_2SO_4 , por 140 dias. Neste período, nas idades de 28, 56, 84, 140 e 168 dias monitorou-se a resistividade elétrica das amostras, o perfil de sulfatos e absorção de água. Na idade final, determinou-se ainda a resistência à compressão e avaliou-se a microestrutura do concreto por imagens em microscópio eletrônico de varredura. A Tabela 3 apresenta os parâmetros considerados pelos autores para aplicação do modelo de Andrade, C. (2004).

Tabela 3 – Parâmetros adotados por Melara *et al.* (2022) na aplicação do modelo de Andrade, C (2004).

Parâmetro	Valores		Comentário
	Traço A	Traço B	
t_i	56, 84, 140 e 168 dias		Tempo final - Datas de análise
r_{SO_4}	0,422		Fator de reação - Ajuste empírico
k_{SO_4}	10616,15		Lei de Einstein - Equação (27)
t_0	28		Tempo inicial
ρ_0	8,2	15,3	Resistividade aos 28 dias
q	0,4814	0,1615	Fator idade - Equação (34)

Fonte: Traduzido e adaptado de: Melara *et al.*, 2022.

Os autores encontram boas relações entre os valores de profundidade de difusão de sulfatos determinados experimentalmente e estimados pelo modelo, com uma média nos erros relativos de 8,7%, com erro mínimo de 0,7% e erro máximo de 16,3%, como mostra a Tabela 4, evidenciando o potencial deste modelo no estudo de íons sulfatos.

Tabela 4 – Resultados de Melara *et al.* (2022) aplicando o modelo de Andrade, C. (2004).

Período de exposição		56 dias	84 dias	140 dias	168 dias
Traço A	Experimental	17,2 mm	20,2 mm	20,9 mm	21,1 mm
	Calculado	17,3 mm	20,3 mm	23,2 mm	24,3 mm
	Erro relativo	5,5%	0,7%	11,1%	15,4%
Traço B	Experimental	17,9 mm	20,6 mm	21,8 mm	22,6 mm
	Calculado	15,0 mm	17,7 mm	22,0 mm	23,7 mm
	Erro relativo	16,3%	13,9%	0,7%	4,9%

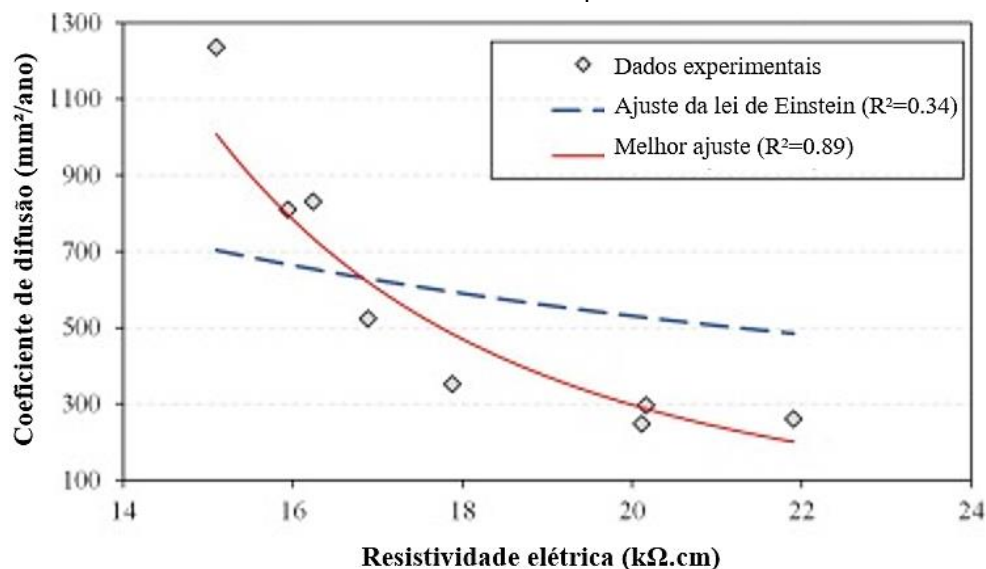
Fonte: Traduzido e adaptado de: Melara *et al.*, 2022.

Apesar de indicar a possibilidade do uso do modelo de Andrade, C. (2004) aplicado a sulfatos pelos baixos erros relativos obtidos por Melara *et al.* (2022), alguns pontos ainda precisam ser estudados. Os autores calculam o coeficiente de difusão pela segunda Lei de Fick, sem utilização do ensaio acelerado de migração. Ainda, Melara *et al.* (2022) adotam apenas duas dosagens de concreto, onde o parâmetro fator de reação é obtido por ajustes empíricos. O fator da concentração externa de

agentes agressivos é determinado pela equação de Einstein (Equação (27)), mas o R^2 obtido foi de 0,34 (Melara *et al.*, 2022), como mostra a

Figura 22.

Figura 22 - Relação entre os coeficientes de difusão determinados pela 1ª Lei de Fick e os dados de resistividade elétrica superficial.



Fonte: Traduzido de: Melara *et al.*, 2022.

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO DE ANDRADE (2004)

Conforme o exposto no item 3, pode-se destacar:

- A resistividade elétrica é um ensaio não destrutivo, com potencial para ser utilizada no monitoramento de estruturas de concreto. Esse ensaio pode ser relacionado com diferentes propriedades do concreto, entre elas, o coeficiente de difusão (Andrade, C., 2004; Azarsa; Gupta, 2017; Rehman *et al.*, 2016).;
- Os estudos do uso da resistividade elétrica são crescentes, inclusive para situações de exposição a sulfatos (Medeiros-Junior *et al.*, 2019; Ortega *et al.*, 2016, 2017; Saleem *et al.*, 1996);
- O uso de ensaios de migração para o cálculo do coeficiente de difusão já são uma realidade para os estudos de íons cloretos (Andrade, C., 1993; Andrade, C. *et al.*, 1994; Castellote; Andrade; Alonso, 2001; UNE, 2012a). Sua aplicação em estudos de íon sulfatos é recente, mas são observados bons resultados a partir de um ensaio rápido e simplificado (Brekailo; Pereira; Medeiros-Junior, 2023a);

- O modelo desenvolvido por Andrade, C. (2004) apresenta diferentes possibilidades na forma de ser aplicado em estudos de vida útil de concreto.

No trabalho de Melara *et al.* (2022) já é possível observar o potencial do modelo de Andrade, C. (2004) no estudo da penetração de íons sulfatos, mas neste caso, os autores não adotam o ensaio de migração para acelerar a obtenção do coeficiente de difusão de sulfatos, e outras matrizes cimentícias devem ser estudadas para obter-se todos parâmetros necessários no modelo. Além disso, a análise é feita apenas para sulfato de sódio, sendo necessário avaliar a possibilidade do uso para outros tipos de sulfato, como o de magnésio.

Como visto no item 2, modelos de sulfatos ainda não são um consenso, além de sua grande complexidade. Assim, a presente Tese busca unir os benefícios do uso das medidas de resistividade elétrica do concreto com os do ensaio de migração, obtendo um modelo capaz de diferentes utilizações em análises de durabilidade de estruturas de concreto, mas neste caso, quando da sua exposição aos íons sulfatos.

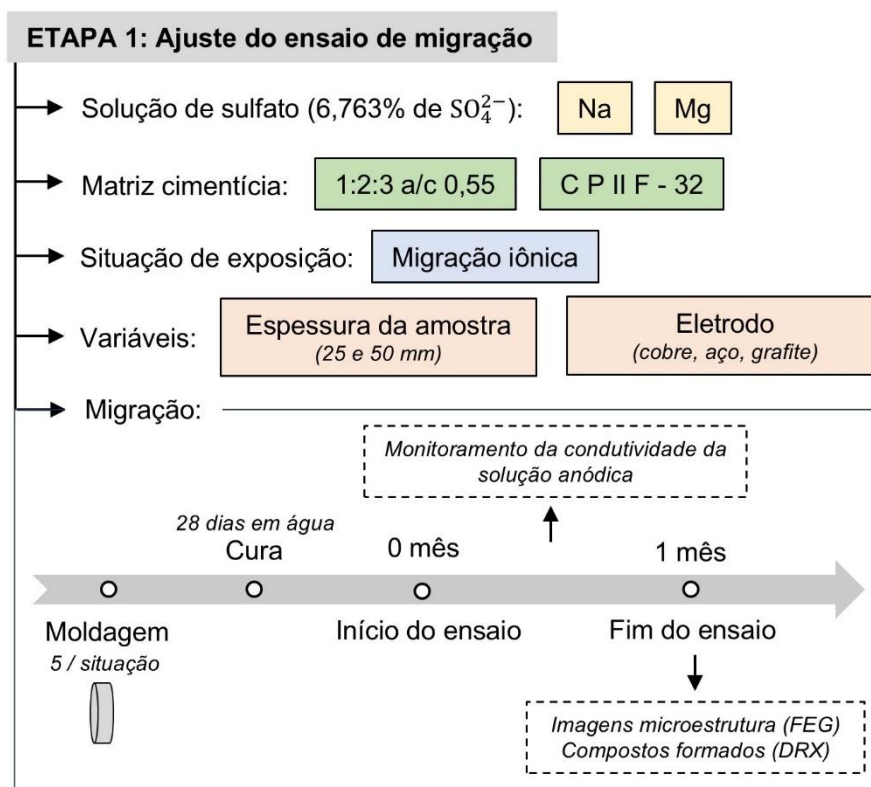
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para atingir os objetivos desta pesquisa e possibilitar a adaptação do modelo de Andrade, C. (2004) para permitir sua aplicação aos íons sulfato, elaborou-se o programa experimental, que foi dividido em três fases:

1. Ajuste do ensaio de migração (Figura 23);
2. Determinação dos parâmetros do modelo (Figura 24);
3. Validação do modelo proposto (Figura 25).

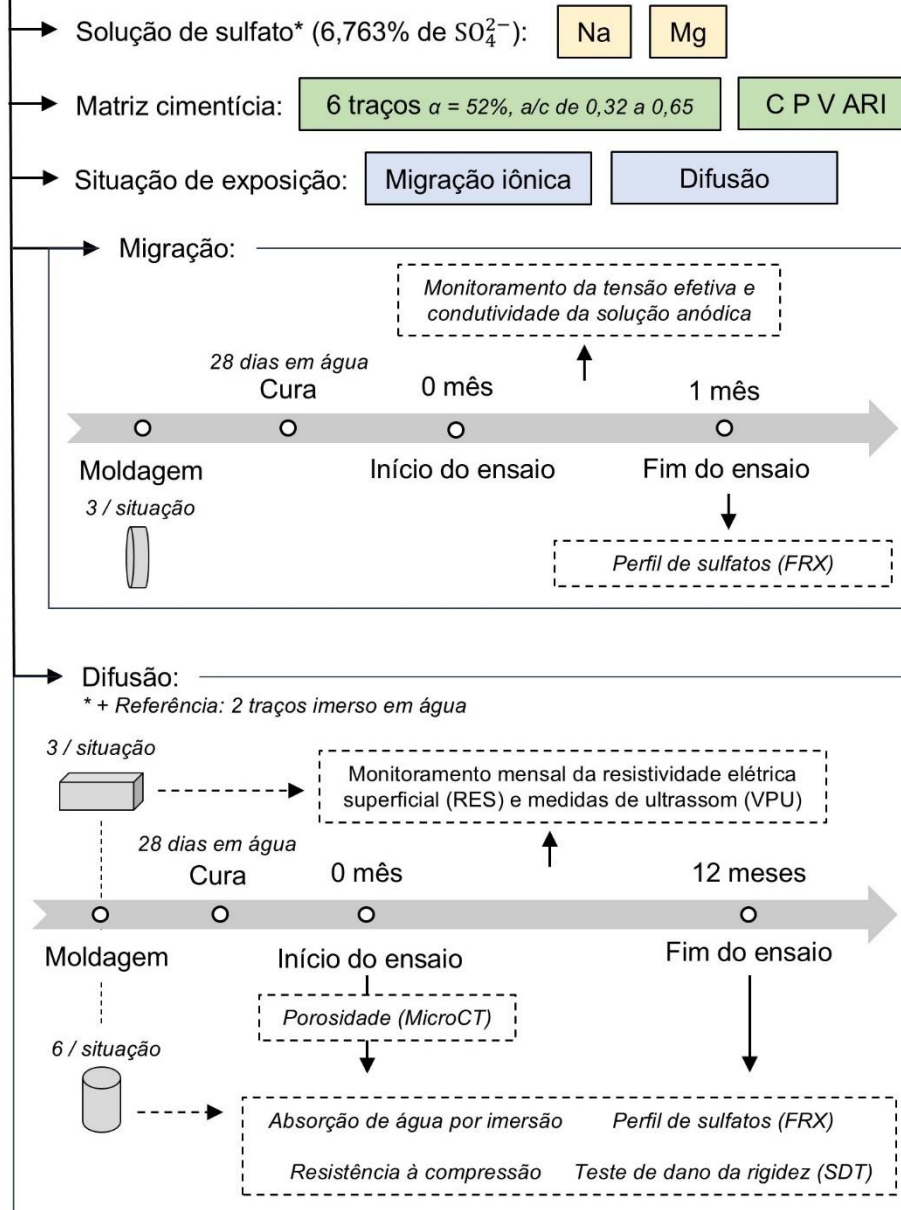
A seguir, é apresentada a descrição de cada uma destas etapas, com definição das variáveis de análise, apresentação dos materiais utilizados e descrição dos ensaios realizados. Para as três etapas, as análises estatísticas dos resultados dos ensaios foram realizadas a partir de testes de análise de variância (ANOVA), sendo as médias comparadas pelo Teste de Tukey com um nível de significância de 5%.

Figura 23 - Organograma da etapa 1 do programa experimental.



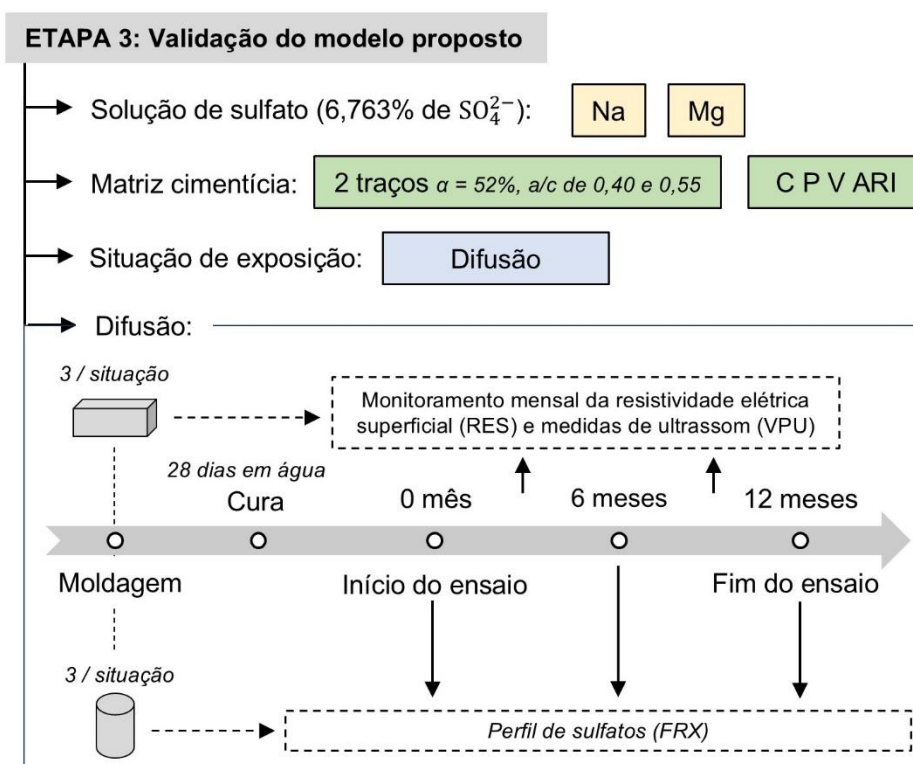
Fonte: A autora.

Figura 24 - Organograma da etapa 2 do programa experimental.

ETAPA 2: Determinação dos parâmetros do modelo

Fonte: A autora.

Figura 25 - Organograma da etapa 3 do programa experimental.



Fonte: A autora.

4.1 AJUSTE DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO

4.1.1 Variáveis de análise

Nesta etapa, o objetivo é a realização de ajuste na metodologia do ensaio de migração de sulfatos, proposto por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a). Foram testados dois ajustes no ensaio: variar a espessura da amostra de concreto e variar o tipo de eletrodo, para verificar se é possível melhorar as correlações obtidas entre situações de migração e difusão natural de sulfatos.

Para isso, foram adotadas como variáveis independentes:

- Tipo de solução: solução de sulfato de sódio e solução de sulfato de magnésio.
- Espessura das amostras: 25 ± 5 mm e 50 ± 5 mm;
- Material do eletrodo: cobre, aço e grafite.

Como o objetivo da pesquisa é a adaptação do modelo de Andrade, C. (2004) para aplicação tanto por sulfato de sódio como magnésio, o ensaio será ajustado para ambas soluções.

Como variáveis dependentes desta fase da pesquisa, tem-se:

- Condutividade da solução anódica;
- Concentração de sulfatos na amostra após a migração;
- Compostos formados na amostra após a migração.

4.1.2 Caracterização dos materiais

Os dados obtidos nesta etapa foram comparados aos de Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a), portanto, adotado o mesmo tipo de cimento Portland, neste caso, cimento Portland composto com material carbonático do tipo CP II F 32, cujos resultados de caracterização são apresentados na Tabela 5. A composição química foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), em espectrômetro modelo Shimadzu EDX-700, instalado no Departamento de Engenharia de Materiais da UEPG. A perda ao fogo foi determinada de acordo com a NBR NM 18 (ABNT, 2004). Os valores encontrados estão de acordo com a normativa NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 5 – Caracterização do cimento CP II-F 32 adotado na etapa 1 (% em massa).

Composição química							Perda ao fogo
CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	6,87
61,23	4,05	18,37	2,58	2,79	2,73	2,83	

Fonte: A autora.

Para agregado miúdo, foi utilizado areia quartzosa proveniente de leito de rio, cuja caracterização química foi realizada por FRX e difração de raios X (DRX), sendo este último realizado em um difratômetro Rigaku Ultima IV, instalado no Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU) da UEPG. A preparação das pastilhas foi realizada pela prensagem manual no próprio porta-amostra, com passo adotado no ensaio de 0,02° e tempo por passo de 50°/min, o intervalo de varredura entre 5° e 75° (2θ). Utilizou-se a radiação Cu-Kα (40 kV, 30 mA) e uma fenda divergente de 1°. As fases químicas minerais foram então identificadas por comparação com os padrões do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Como pode-se observar na

Tabela 6 e

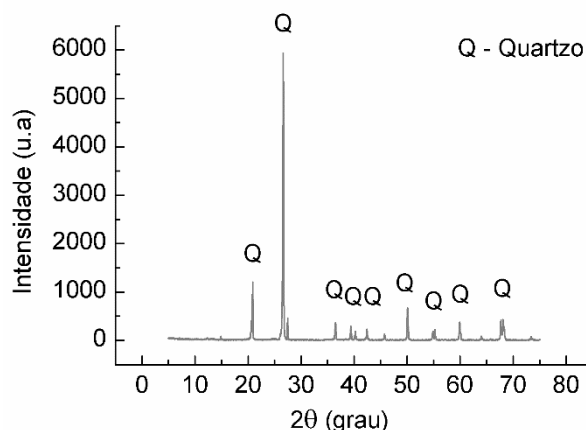
Figura 26, a areia utilizada possui a presença majoritária do óxido de silício (SiO_2), sendo composta basicamente por cristais de quartzo.

Tabela 6 - Composição química da amostra de areia.

Composição química (% em massa)										
SiO_2	CO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	K_2O	CaO	ZrO_2	MgO	Na_2O	SO_3
82,30	7,69	5,39	1,21	0,92	0,69	0,58	0,57	0,25	0,19	0,10

Fonte: A autora.

Figura 26 - Difratoograma de raios X da amostra de areia.



Fonte: A autora.

As caracterizações físicas foram determinadas conforme metodologias apresentadas na Tabela 7. A granulometria do agregado miúdo foi determinada de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022a) e comparada com os limites determinados pela NBR 7211 (ABNT, 2022b). A curva granulométrica obtida consta na Figura 27. A areia possui dimensão máxima característica de 2,36 mm e módulo de finura 1,49. Sua granulometria encontra-se parte enquadrada zona utilizável inferior determinada pela NBR 7211 (ABNT, 2022b).

Tabela 7 - Caracterização física do agregado miúdo.

Propriedade	Metodologia	Resultado
Massa específica do agregado seco	NBR 16916 (ABNT, 2021a)	2,35 g/cm ³
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca	NBR 16916 (ABNT, 2021a)	2,38 g/cm ³
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021a)	1,04 %
Massa unitária no estado compactado	NBR 16972 (ABNT, 2021b)	1,71 g/cm ³
Massa unitária no estado solto	NBR 16972 (ABNT, 2021b)	1,60 g/cm ³
Teor de material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021c)	9,44 %

Fonte: A autora.

Para agregado graúdo, foi utilizado pedrisco proveniente da região de Ponta Grossa. O pedrisco adotado deve possuir DMC máximo menor que a espessura das amostras utilizadas no ensaio de migração (Brekailo, 2020; Medeiros-Junior, 2014). A

caracterização física do pedrisco é apresentada na Tabela 8, e sua distribuição granulométrica, determinada conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022a), consta na Figura 28. O pedrisco apresenta dimensão máxima característica de 12,5 mm (o que está de acordo com a espessura das amostras de migração, descritas no item 4.1.4) e módulo de finura de 6,13, com granulometria dentro dos limites da NBR 7211 (ABNT, 2022b).

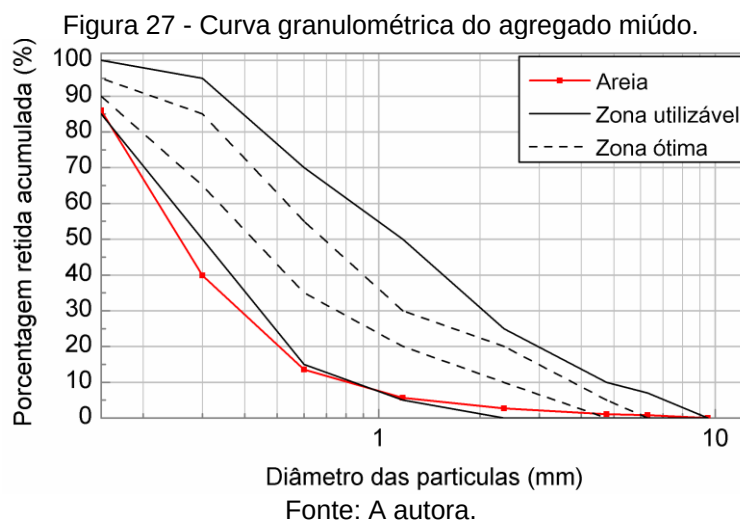
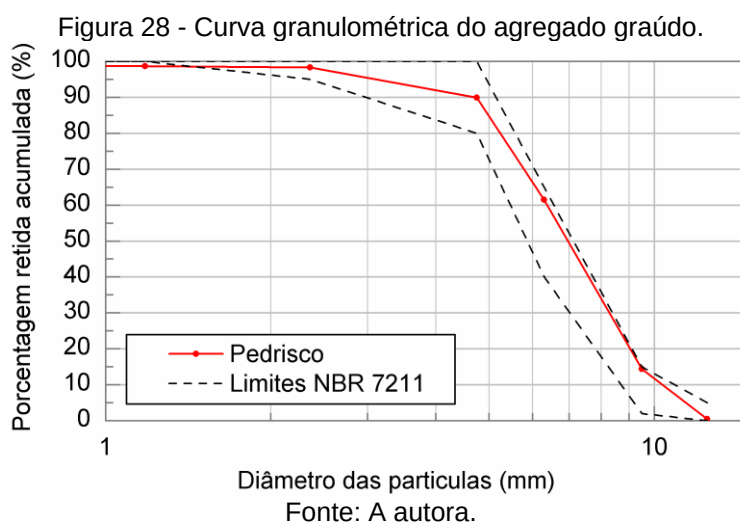


Tabela 8 – Caracterização física do agregado graúdo.

Propriedade	Metodologia	Resultado
Massa específica do agregado seco	NBR 16917 (ABNT, 2021d)	2,93 g/cm ³
Massa específica do agregado na condição saturado superfície seca	NBR 16917 (ABNT, 2021d)	2,96 g/cm ³
Absorção de água	NBR 16917 (ABNT, 2021d)	1,01 %
Massa unitária no estado compactado	NBR 16972 (ABNT, 2021b)	1,69 g/cm ³
Massa unitária no estado solto	NBR 16972 (ABNT, 2021b)	1,54 g/cm ³
Teor de material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021c)	3,80 %

Fonte: A autora.



A água de amassamento utilizada é a fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). Para as soluções dos compartimentos do ensaio de migração de íons, utilizou-se água destilada obtida a partir da fornecida pela SANEPAR.

Para as soluções agressivas, foi utilizado sulfato de sódio e de magnésio anidro PA. A concentração da solução de sulfato de sódio foi fixada em 10% de Na_2SO_4 por litro de solução. Tal escolha deve-se ao fato de este ser o valor preconizado pela norma brasileira que avalia ataque por sulfatos (ABNT, 2014a), além de ser um valor recorrente na literatura (Brekailo *et al.*, 2022; Gong; Cao; Wang, 2016; Jiang; Niu, 2016; Melara *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2019).

A concentração de 10% de Na_2SO_4 por litro de solução corresponde à 6,763% de SO_4^{2-} . A fim de manter fixa a quantidade de íons sulfatos, esse mesmo percentual foi adotado para as soluções de sulfato de magnésio seco. Por análise estequiométrica, estas soluções tem concentração total de 17,35% de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ por litro de solução para manter 6,763% de SO_4^{2-} . As soluções de sulfato foram preparadas de acordo com o as proporções apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Proporções dos componentes das soluções de sulfato.

Solução		Água destilada (g)	Reagente (g)	Teor de SO_4^{2-} (g)	Teor do metal associado (g)
% de SO_4^{2-}	Reagente				
6,763%	Na_2SO_4	900,00	100,00	67,63	32,37
6,763%	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	826,46	173,54	67,63	22,015

Fonte: A autora.

4.1.3 Dosagem do concreto e moldagem dos corpos de prova

Para comparação com os resultado de Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a), adotou-se o mesmo traço do concreto, sendo 1:2:3 (cimento:areia:brita), com relação água/cimento (a/c) de 0,55, cuja dosagem é apresentada na Tabela 10. O traço foi baseado em Castellote, Andrade e Alonso (2001), com aumento na relação a/c para acelerar o ensaio (Brekailo, 2020).

Tabela 10 – Dosagem das amostras de concreto da etapa 1.

Relação a/c	Cimento CP II F 32 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)
0,55	372	204,6	744	1116

Fonte: A autora.

Feita a mistura dos materiais, determinou-se a consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*) (ABNT, 1998), mantendo o valor do abatimento em (80 ± 20) mm, assim como Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a).

Para esta dosagem, foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos de $\Phi 100 \times 200$ mm com procedimento de moldagem de acordo com o descrito na NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 48 h nos moldes metálicos, os corpos de prova foram desmoldados e permaneceram em cura em água até completarem 28 dias. De cada corpo de prova moldado, é possível extrair 3 amostras para o ensaio de migração (Medeiros *et al.*, 2012), conforme descrito no item 4.1.4 a seguir.

4.1.4 Ensaio de migração de sulfatos

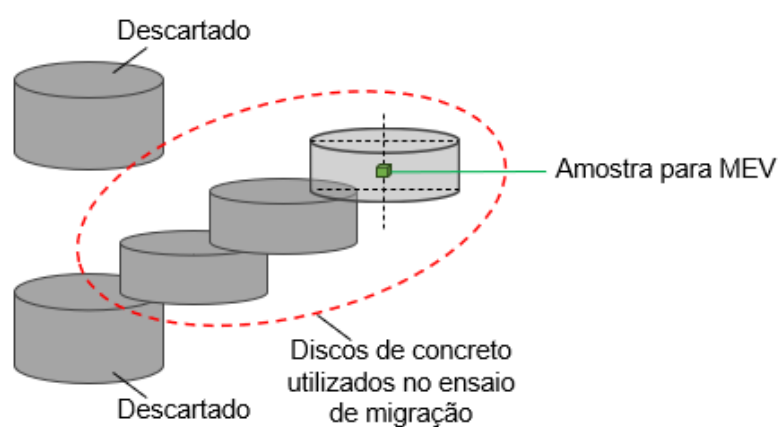
A metodologia do ensaio de migração de sulfatos foi adotada conforme proposto por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a), com algumas adaptações para verificar se é possível melhorar o ajuste entre migração e difusão de íons sulfatos. O ensaio de migração de Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a) é uma adaptação da norma espanhola UNE 83987 (UNE, 2012a), que trata do ensaio multiregime de determinação dos coeficientes de difusão de íons cloreto no concreto endurecido.

Neste ensaio, a amostra de concreto fica entre o compartimento catódico – com a solução de sulfato estudada – e o compartimento anódico – inicialmente com água destilada. Entre os compartimentos é aplicada uma diferença de potencial de 12 V, acelerando a movimentação dos íons de um compartimento para o outro através da amostra.

As amostras foram obtidas do terço médio dos corpos de prova de concreto, com cortes realizados em serra com disco diamantado, extraindo 3 discos de cada corpo de prova (Figura 29). Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a) utilizaram amostras de 25 ± 5 mm de espessura. Para esta etapa de ajuste, neste trabalho foram testados também discos de concreto com altura de 50 ± 5 mm, para retardar o ensaio e verificar se é possível identificar o *time-lag* também para amostras exposta a sulfatos, conforme propõe Brekailo (2020), e assim ainda possibilitando extrair 3 discos de cada corpo de prova (Medeiros *et al.*, 2012).

Feito os cortes, os discos de concreto foram mantidos por 24 horas imersos em água, para garantir a saturação das amostras, evitando o transporte dos íons por absorção (UNE, 2012a). As células de migração foram então montadas, tendo como base a configuração mostrada na Figura 30. O volume de cada compartimento é de aproximadamente 1,1 litros. A Figura 31 mostra a montagem das células de migração. Para avaliação da espessura adequada das amostras, o ensaio foi realizado utilizando fios de cobre como eletrodo, assim como Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a).

Figura 29 - Esquema do corte de discos de concreto realizado a partir de corpos de prova cilíndricos.



Fonte: A autora.

Figura 30 – Configuração das células de migração de sulfatos.



Fonte: A autora.



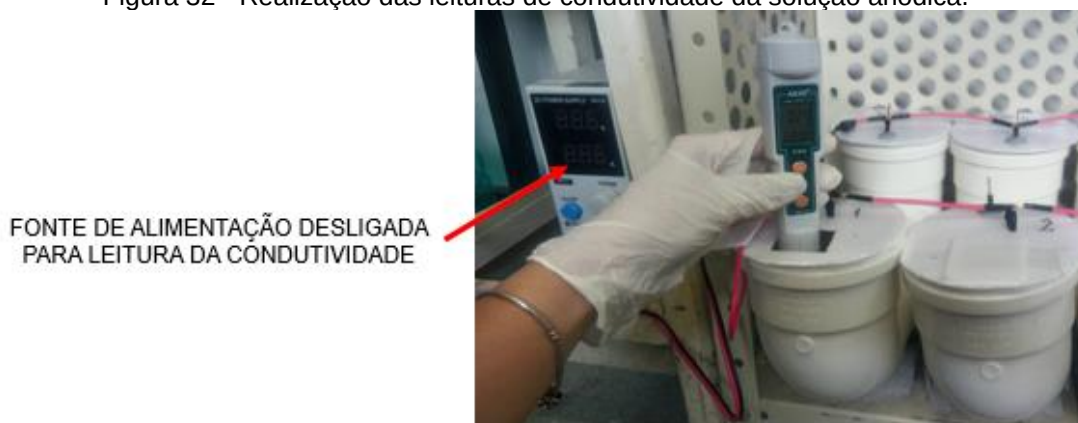
Fonte: Adaptado de: Brekailo, 2020.

A determinação da variação da concentração de sulfatos no compartimento anódico foi realizada de forma indireta a partir do monitoramento da condutividade elétrica da solução, com base nas relações estabelecidas por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a), apresentadas na Equação (37) e na Equação (38) para sulfato de sódio e sulfato de magnésio, respectivamente. Conforme proposto por Castellote, Andrade e Alonso (2001), para a determinação da condutividade, a fonte de tensão deve ser desligada, a solução levemente agitada e a condutividade registrada após estabilização do valor, ligando as fontes em seguida (Figura 32).

Para Na_2SO_4 : Concentração de $\text{SO}_4^{2-} = 0,0480$. Condutividade (mS/cm) (37)

Para MgSO_4 : Concentração de $\text{SO}_4^{2-} = 0,0805$. Condutividade (mS/cm) (38)

Figura 32 - Realização das leituras de condutividade da solução anódica.



Fonte: Brekailo, 2020.

Para cada situação analisada, foram realizadas 5 repetições, totalizando 30 células de migração, cada uma alimentada com 12 V. No ensaio de migração, o monitoramento da condutividade foi realizado durante 30 dias. Finalizado este tempo, a microestrutura foi avaliada a partir de imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura em amostras retiradas da região central dos discos de concreto (Figura 29).

Para esta análise, as amostras foram preparadas com aproximadamente 5 mm de dimensão, com metalização superficial em ouro, com análise realizada na superfície de fratura. As imagens foram obtidas em microscópio FEG SEM, Tescan, Mira 3, instalado no C-LABMU da UEPG. Os compostos formados foram identificados por análises de DRX.

Os resultados obtidos foram comparados aos de migração e difusão natural obtidos por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a), para verificar se as alterações realizadas na metodologia do ensaio de migração melhoraram o ajuste aos dados de difusão natural de íons sulfatos apresentados pelos autores. Foram comparados os dados de concentração de sulfatos no compartimento anódico ao longo do tempo, bem como os compostos identificados na microestrutura da matriz cimentícia.

4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

4.2.1 Variáveis de análise

Para possibilitar o ajuste do modelo de Andrade, C. (2004), é necessário determinar os parâmetros adotados no modelo, em situações de exposição aos íons sulfatos. Os parâmetros necessários para o modelo de Andrade, C. (2004) são o fator de reação r_s , o fator idade q e o fator relativo à concentração do agente agressivo k_s .

Além disso, para o ajuste do modelo, foi determinado também um fator dano D . Como tratado no item 2.3, o ataque por sulfatos envolve quatro processos: transporte da solução de sulfatos na matriz, reações químicas entre os sulfatos e a matriz, as forças expansivas originadas e a resposta mecânica. A inclusão de um efeito do dano nas modelagens de ataque por sulfatos é importante, pois considera o efeito que o dano tem na difusividade, uma vez que as fissuras originadas tem impacto no coeficiente de difusão e outras propriedades elásticas da matriz (Tixier; Mobasher, 2003a).

Para possibilitar o cálculo destes parâmetros, adotou-se como variáveis independentes desta etapa:

- Tipo de solução: solução de sulfato de sódio, solução de sulfato de magnésio e referência (água);
- Situação de exposição: migração iônica e difusão;
- Traços da matriz cimentícia: a/c variando de 0,32 a 0,65.

Como variáveis dependentes, tem-se:

- Abatimento do concreto;
- Resistência à compressão;
- Absorção de água;
- Porosidade das amostras;
- Compostos formados na microestrutura das amostras;
- Perfil de sulfatos nas amostras;
- Coeficiente de difusão em estado estacionário e não estacionário;
- Resistividade elétrica superficial do concreto;
- Velocidade de onda de ultrassom.

Os materiais e dosagens adotadas, bem como ensaios e cálculos realizados são descritos nos itens 4.2.2 a 4.2.9.

4.2.2 Caracterização dos materiais

Para a etapa de determinação dos parâmetros do modelo de vida útil, optou-se por trabalhar como aglomerante com o cimento Portland do tipo CP V ARI, tendo em vista que este é o cimento disponível comercialmente no Brasil com menor teor de adições, neste caso, com valores de 0 a 10% de material carbonático (ABNT, 2018a). Tal escolha foi realizada a fim de minimizar as variáveis intervenientes no modelo, porém, entende-se que em um estudo futuro, a presença de adições minerais, especialmente as reativas, deva ser considerada no modelo.

O cimento teve sua composição química determinada por FRX, e perda ao fogo determinada conforme com a NBR NM 18 (ABNT, 2004), e o resultado é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Caracterização do cimento CP V ARI adotado nas etapas 2 e 3 (% em massa).

Composição química								Perda ao fogo
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	
75,31	10,86	3,33	3,16	2,90	2,36	1,76	0,31	4,57

Fonte: A autora.

Este mesmo cimento foi utilizado na etapa 3 desta pesquisa, de validação do modelo de sulfatos desenvolvido no trabalho. Os agregados miúdo e grão, água de

amassamento e soluções de sulfato são os mesmos adotados na etapa 1, apresentado no item 4.1.2. Também foi utilizado nestas etapas aditivo superplastificante.

4.2.3 Dosagem do concreto e moldagem dos corpos de prova

Modelagens de previsão de vida útil de concretos e argamassas baseados em dados empíricos recebem críticas na literatura por restringir sua aplicação a situações de mesmas condições às empregadas nos ensaios e testes que os originaram (Brekailo; Pereira; Medeiros, 2023; Ikumi; Segura, 2019). Com base nisso, optou-se por trabalhar com uma gama de composições, englobando diferentes relações a/c, proporções de agregados e consumos de cimento, tendo em vista possibilitar aumentar os limites de aplicação do modelo a ser obtido.

As dosagens empregadas foram baseadas em Mendes, S. E. S. *et al.* (2018), estudo que apresenta o uso da resistividade elétrica como parâmetro de durabilidade do concreto. Foram fixados dois parâmetros: o teor ótimo de argamassa, em 52%, e o abatimento do concreto, em (100 ± 20) mm. O abatimento do tronco de cone foi determinado conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998). A consistência foi controlada com o uso de aditivo superplastificante (SP). As composições de concreto adotadas são apresentadas na Tabela 12.

Os traços com relação a/c de 0,60 e 0,35 foram escolhidos também para referência, sendo mantidos em imersão em água. O traço com relação a/c de 0,70 adotado por Mendes, S. E. S. *et al.* (2018) foi retirado, pois não pode ser adotado para nenhuma classe de agressividade ambiental, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014b).

Tabela 12 – Dosagens das amostras de concreto da etapa 2.

Relação a/c	Cimento CP V ARI (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	SP (%)
0,32	656	208	454	1027	0,47
0,35*	572	199	551	1034	0,37
0,44	444	194	681	1037	0,30
0,50	395	197	721	1030	0,20
0,60*	328	196	785	1029	0,15
0,65	297	193	820	1034	0,10

NOTA: * traços adotados também como referência.

Fonte: A autora.

Mendes, S. E. S. *et al.* (2018) propõe, para os traços avaliados em seu trabalho, diagramas de dosagem que incluem a resistividade elétrica, além de modelos empíricos para estimar a resistividade após 28 dias de cura baseados na relação água/aglomerante, teor de cimento e de agregado, além da resistência à compressão aos 28 dias. Objetiva-se com o modelo a ser obtido na presente Tese estimar qual a resistividade necessária aos 28 dias para um traço limitando a profundidade de penetração de sulfatos. Assim, a escolha por adotar os traços dos autores deve-se a possibilidade de utilizar as equações propostas Mendes, S. E. S. *et al.* (2018) para realização de dosagens a partir de um valor de resistividade conhecido.

Além disso, ao variar a relação água/cimento e a quantidade de cimento e consequente volume de pasta por dosagem, é possível avaliar tanto o efeito da variação de porosidade como da quantidade de fase reativa disponível.

Corpos de prova de concreto cilíndricos de $\Phi 100 \times 200$ mm e prismáticos com dimensão de $150 \times 150 \times 250$ mm foram moldados também de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), mantidos em cura por imersão em água até completarem 28 dias. A quantidade de amostras para cada ensaio foi determinada avaliando a quantidade de traços, as idades de análise, para dois tipos de solução de sulfatos. Foram consideradas 3 repetições para cada situação estudada. A Tabela 13 apresenta a quantidade de amostras avaliadas por ensaio nesta etapa.

Tabela 13 – Quantidade de corpos de prova da etapa 2.

	Ensaio	Quantidade de corpos de prova	Formato dos corpos de prova
Migração	Condutividade elétrica	12*	Cilíndricos*
	Tensão efetiva		Cilíndricos
	Perfis de sulfato		Cilíndricos
Difusão	Resistividade	42**	Prismáticos
	Ultrassom	42**	Prismáticos
	Resistência à compressão	84***	Cilíndricos
	Absorção de água	84***	Cilíndricos
	Perfis de sulfato (FRX)	60****	Cilíndricos
	Teste de dano da rigidez (SDT)	18****	Cilíndricos

NOTAS: * De cada corpo de prova, foram preparados 3 discos, totalizando 36 discos.

** Os mesmos corpos de prova foram utilizados para os dois ensaios.

*** Os mesmos corpos de prova foram utilizados para os dois ensaios.

**** Os mesmos corpos de prova foram utilizados para os dois ensaios.

Fonte: A autora.

4.2.4 Ensaios de caracterização do concreto

Após a cura por 28 dias dos corpos de prova, determinou-se a absorção de água por imersão das amostras, conforme NBR 9778 (ABNT, 2009), com exceção à temperatura de secagem das amostras. Como os mesmos corpos de prova foram utilizados para o ensaio de absorção de água e resistência à compressão, a temperatura de secagem adotada foi de 60°C, para minimizar a degradação térmica das fases da matriz. A secagem foi realizada até a constância de massa das amostras, após 7 dias de secagem.

Após a realização do ensaio de absorção, cada traço teve sua resistência à compressão determinada, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018b). Para tanto, foi utilizada para o rompimento uma prensa hidráulica com acionamento elétrico, de registro digital e capacidade de 1000 kN, instalada no Departamento de Engenharia Civil da UEPG.

As amostras foram também caracterizadas de acordo com sua porosidade (ϵ), determinada em microtomógrafo de Raios X da marca Skyscan, modelo 117, instalado no Instituto LAMIR da Universidade Federal do Paraná. O equipamento possui resolução de 1332 x 2000 pixels sem filtro e tamanho de pixel de 5,93 μm , e para realização deste teste, utilizou-se a tensão de 100 kV e corrente de 100 μA . O resultado de porosidade é utilizado tanto para caracterização dos concretos, como para o cálculo do fator de reação dos sulfatos (r_s), descrito em 4.2.6.

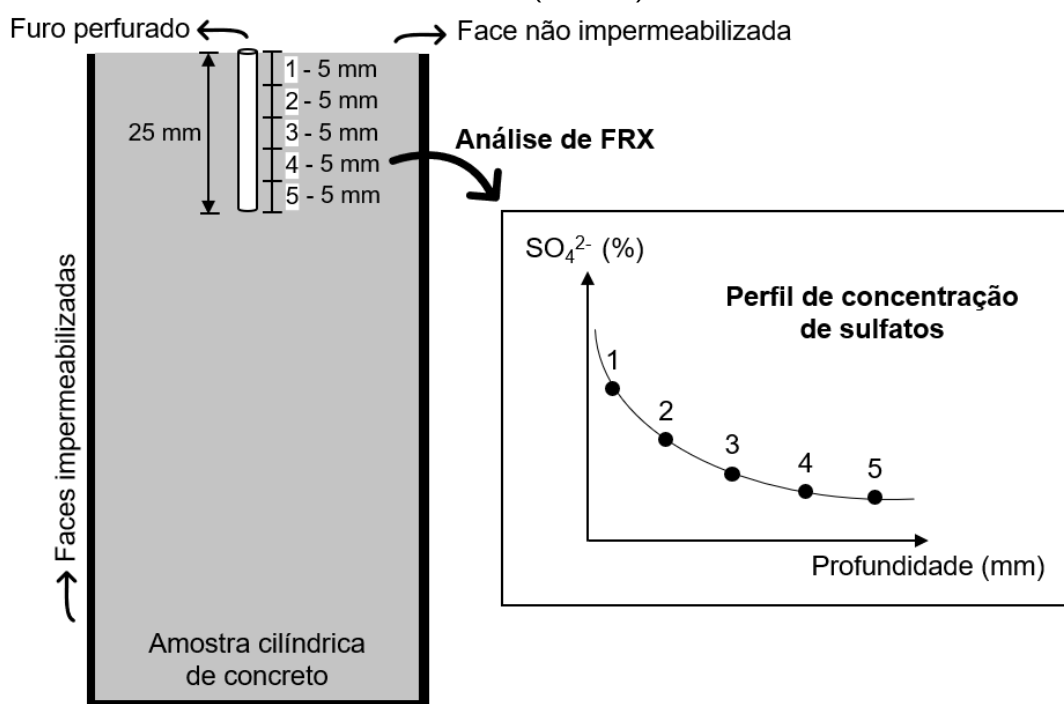
Os corpos de prova foram então submetidos às seguintes condições de exposição: parte em difusão (imersão) em solução de sulfato de sódio, parte em difusão em solução de sulfato de magnésio, além dos traços de referência, mantidos em imersão em água. A proporção adotada entre solução/concreto foi de 1,8 em volume. Para isso, as laterais e fundo dos corpos de prova foram impermeabilizadas para que o fluxo iônico acontecesse apenas no sentido axial, deixando assim apenas a face superior das amostras exposta. O impermeabilizante adotado é de cristalização integral por pintura, aplicado em duas camadas e em quantidade de acordo com recomendação do fabricante.

Estas amostras foram mantidas em condição de imersão nas soluções de análises por 12 meses, em função do tempo disponível da pesquisa, sem renovação da solução. Optou-se por não realizar a renovação para limitar as variáveis analisadas, já que tal medida implicaria em lixiviação, que tem significativa influência

na degradação por sulfatos, sendo um fator adicional que deveria ser considerado no modelo (Chen, X. *et al.*, 2021; Fu *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2020).

As idades adotadas para monitoramento foram de 28 dias/0 mês e 12 meses, onde determinou-se a resistência à compressão e a absorção de água por imersão. Nestas idades, traçou-se também o perfil de sulfatos nas amostras, por FRX, com passos de 5 mm até atingir-se 25 mm, a partir da face não impermeabilizada, como esquematiza a Figura 33. Para tanto, foram realizados 10 furos em cada amostra, até atingir a profundidade de 5 mm. O pó obtido nos 10 furos da primeira camada foi homogeneizado, peneirado em peneira de abertura de 0,075 mm, de forma a obter cerca de 1 g de pó para esta profundidade avaliada. O procedimento foi repetido, utilizando os mesmos furos, de forma a obter-se as amostras para as demais profundidades.

Figura 33 – Esquema da determinação dos perfis de concentração de sulfatos nas amostras de difusão (imersão).



Fonte: A autora.

4.2.5 Ensaio de migração de sulfatos

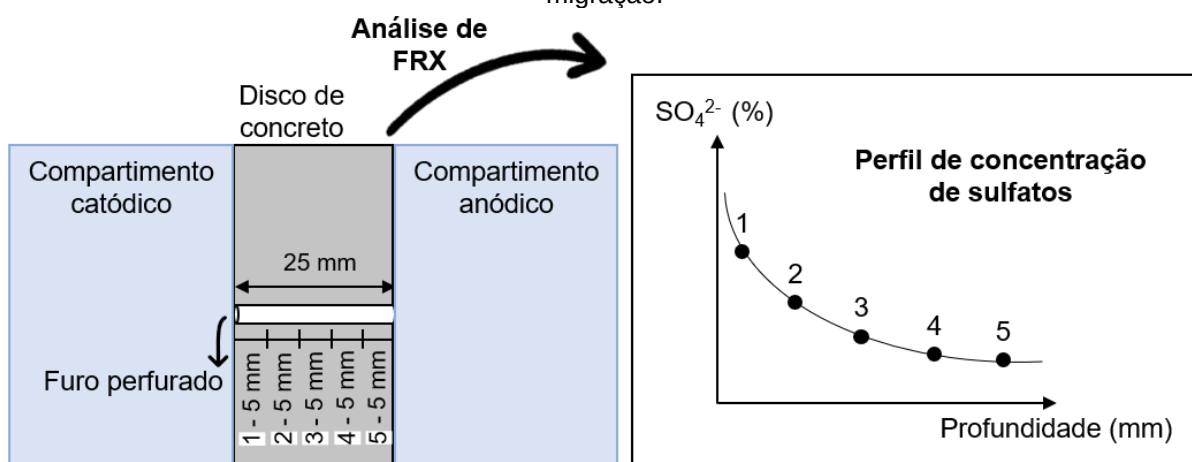
Para determinar o fator r_s , além da porosidade, é necessário determinar os coeficientes de difusão do concreto, tanto em estado estacionário quanto não estacionário. Para isso, foi realizado o ensaio de migração iônica, conforme

metodologia ajustada na etapa 1 deste trabalho (item 4.1), adotando espessura de amostra e eletrodo que levaram ao melhor ajuste.

A concentração da solução anódica foi monitorada pela condutividade elétrica, e o ensaio foi realizado por 30 dias. Neste período, monitorou-se também a tensão efetiva que atravessa a amostra, posicionando fios de cobre na face das amostras e realizando a medida com um multímetro.

Findado os 30 dias, traçou-se o perfil de sulfatos nas amostras de concreto de migração por FRX, em passos de 5 mm (Figura 34), conforme procedimento descrito no item 0 para os perfis de concentração determinados para as amostras de difusão. Com estes resultados, foi possível calcular os coeficientes de difusão de cada concreto.

Figura 34 - Esquema da determinação dos perfis de concentração de sulfatos nas amostras de migração.



Fonte: A autora.

Para o cálculo do coeficiente de difusão no estado estacionário, foi empregada a Equação (39) (Castellote; Andrade; Alonso, 2001; UNE, 2012a):

$$D_s = \frac{RTL}{zAF(\gamma C_{SO})\Delta E_{ef}} \frac{dC}{dt} \quad (39)$$

Onde:

D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário (cm²/s);

R = constante dos gases (8,31 J/molK);

T = temperatura (K);

L = espessura do disco de concreto (cm);

z = valência do íon (=2 para sulfatos);

F = constante de Faraday (96,5 kJ/Vmol);

C_{so} = concentração de sulfatos na célula catódica (mol/cm³);
 γ = coeficiente de atividade da solução da célula catódica;
 ΔE_{ef} = média da tensão efetiva que atravessa os discos durante o estado estacionário;
 A = área da seção transversal do disco de concreto (cm²);
 dC/dt = inclinação da parte linear (estado estacionário) do gráfico: concentração de sulfatos x tempo (mol/s).

Já o coeficiente de difusão no estado não estacionário foi determinado por regressão não linear com base na Equação (40) (Andrade, C. *et al.*, 1994) (já apresentada na Equação (26)):

$$C_x = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \sqrt{\frac{FzE}{RT} D_{ns} t}} \quad (40)$$

Onde:

D_{ns} = coeficiente de difusão no estado não estacionário (cm²/s);
 C_x = concentração do íon em uma profundidade x (cm) e em um tempo t (s) (% em relação à massa de cimento);
 C_s = concentração do íon na superfície do concreto (% em relação à massa de cimento);
 erfc = função erro complementar (1- $\operatorname{erf}(x)$);
 x = profundidade (cm);
 ΔE_{ef} = tensão efetiva (V).

4.2.6 Cálculo do fator de reação dos sulfatos (r_s)

De posse dos dados determinados pelo ensaio de migração e de porosidade, é possível calcular o fator de reação dos sulfatos (r_s) para os concretos analisados, conforme a Equação (41) (já apresentada na Equação (33), e aqui repetida).

$$r_s = \frac{D_s}{D_{ns} \cdot \varepsilon} \quad (41)$$

Onde:

D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário (cm²/s);
 D_{ns} = coeficiente de difusão no estado não estacionário (cm²/s);
 ε = porosidade (%).

4.2.7 Ensaio de resistividade elétrica

Para determinar o fator idade (q) é necessário monitorar a resistividade elétrica das amostras ao longo do tempo. O ensaio de resistividade elétrica superficial foi realizado de acordo com o método de Wenner, descrito em 3.1, conforme a norma espanhola UNE 83988-2 (UNE, 2012b). Os corpos de prova utilizados para as medidas de resistividade foram mantidos em imersão nas soluções de sulfato estudadas, além das amostras de referências, mantidas em imersão em água. A primeira medida foi realizada aos 28 dias (após o fim da cura dos corpos de prova), e então realizadas mensalmente, durante 12 meses.

O equipamento utilizado foi o Resipod, da marca Proceq. O equipamento tem capacidade de medidas de 1 a 1000 k Ω .m de resistividade, e é composto por 4 eletrodos alinhados, distantes 50 mm entre si. As medidas foram realizadas na face não impermeabilizada das amostras cúbicas (Figura 35). Devido à dimensão das amostras, o fator de forma aplicado é de 0,983. O fator de forma foi determinado nesta pesquisa relacionando, para um mesmo traço, a resistividade aos 28 dias de amostras prismáticas de 150 x 150 x 250 mm com a resistividade aos 28 dias de amostras cúbicas de lado 250 mm, dimensão que de acordo Gowers e Millard (1999) dispensa fator de forma. Neste caso, as amostras cúbicas apresentaram resistividade elétrica média de 6,260 k Ω .m aos 28 dias, enquanto as amostras prismáticas apresentaram o valor de 6,155, permitindo a determinação do fator de forma de 0,983.

Figura 35 - Leitura da resistividade elétrica superficial nos corpos de prova.



Fonte: A autora.

4.2.8 Cálculo do fator idade (q)

Com os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica, é possível determinar o fator idade (q) das amostras em exposição aos sulfatos, a partir da regressão não linear da Equação (42) (apresentada anteriormente na Equação (34). Nesta equação, ρ_2 é a resistividade em um tempo t_2 , ρ_0 a resistividade na primeira medição, em t_0 , que usualmente é igual a 28 dias, após a cura saturada do concreto e q é o fator idade. Para este cálculo, adotou-se a resistividade em $k\Omega.cm$ e o tempo em dias.

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \left(\frac{t_2}{t_0} \right)^q \quad (42)$$

4.2.9 Determinação do fator relativo à agressividade ambiental (k_s)

O valor k_s depende da concentração externa de agentes agressivos. Como apresentado no item 3.3, este valor para cloretos é apresentado por Andrade, C. e D'Andrea (2010) para diferentes situações de exposição, com base em análises de dados obtidos em estruturas reais de até 28 anos de idade, ou ensaios em escala mantidos em situações reais de exposição (D'andréa, 2010). Devido ao tempo desta pesquisa, a determinação do parâmetro k_s desta forma é inviabilizada. Ele foi calculado então com base na Equação de Einstein, conforme apresenta a Equação (43).

$$D_s = \frac{k_s}{\rho_{ef}} \quad (43)$$

Onde:

D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário (cm^2/s);

ρ_{ef} = resistividade efetiva do concreto saturado após 28 dias em cura ($\Omega.cm$).

4.2.10 Ajuste do modelo de Andrade (2004)

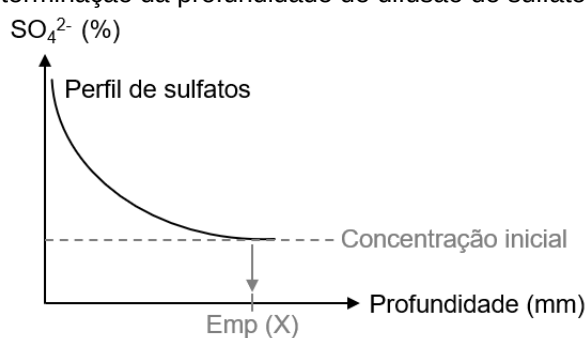
Sabe-se que íons sulfatos e cloretos comportam-se de forma diferente na matriz cimentícia. Como a proposta desta Tese é o ajuste de um modelo desenvolvido

inicialmente para cloretos, algumas adaptações precisam ser realizadas para sua aplicação em sulfatos. Assim, nesta etapa do trabalho é estabelecido um fator dano a ser considerado na modelagem, devido à degradação causada na matriz pela reação com os íons sulfatos.

Destaca-se que, mesmo que o fator dano determinado não se mostre a forma adequada de ajuste do modelo proposto, tem-se como objetivo específico desta pesquisa também correlacionar o dano da matriz com a profundidade de penetração de sulfatos, bem como com a concentração desses íons, de forma a entender qual dos dois fatores é crítico: a maior concentração ou a maior profundidade.

Para isso, determinou-se a profundidade x de difusão experimental ($Emp(X)$) que é aquela em que o perfil de sulfatos das amostras de difusão atinge a concentração inicial de sulfatos, determinada aos 28 dias, antes da exposição aos íons agressivos (Melara, 2021), como exemplifica a Figura 36.

Figura 36 – Determinação da profundidade de difusão de sulfatos experimental.



Fonte: A autora.

Com posse dos dados obtidos na etapa 2, aplicou-se a Equação (44) para determinar a profundidade teórica de sulfatos determinada pelo modelo desenvolvido ainda não ajustado ($Teo(X)$). A Equação (44) foi obtida isolando a variável de profundidade do modelo proposto por Andrade, C. (2004) (Equação (36)), e utilizando os parâmetros determinados na presente Tese para sulfatos. Em seguida, o fator dano (D) associado ao ataque por sulfatos foi obtido pela relação entre a profundidade experimental e teórica (Equação (45)).

$$Teo(X) = \sqrt{\frac{t \cdot k_s}{\rho_0 \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^q \cdot r_s}} \quad (44)$$

$$D = \frac{\text{Emp}(X)}{\text{Teo}(X)} \quad (45)$$

Onde:

t corresponde ao tempo de exposição (anos),

x a profundidade de penetração de sulfatos,

ρ_0 a resistividade na primeira medição, no tempo t_0 ,

r_s o fator de reação dos sulfatos no concreto

k_s o fator que depende da concentração externa de agentes agressivos.

Neste caso, o fator dano é adimensional, obtido por ajuste empírico. Objetiva-se também verificar se o fator dano pode ser determinado pela variação do módulo de elasticidade, determinado a partir de medidas de ultrassom. O ensaio de ultrassom foi realizado mensalmente nas amostras mantidas em imersão nas soluções de análise. Este ensaio fornece informações sobre as fissuras originadas no ataque, que está relacionado ao dano devido ao ataque (Jiang; Niu, 2016; Rehman *et al.*, 2016). Pode ainda indicar alteração na microestrutura de poros pelo seu refinamento devido a formação dos produtos das reações com sulfatos (Chen; Qian; Song, 2016).

A primeira determinação da velocidade de onda foi realizada aos 28 dias (após o fim da cura dos corpos de prova), com procedimento de leitura por transmissão direta, posicionando os transdutores em faces opostas dos corpos de prova. Para estas medidas, foi utilizado o equipamento Pundit Lab⁺, da marca Proceq, com *software* Punditlink 2.4, conforme procedimento descrito pela NBR 8802 (ABNT, 2019).

O dano foi então determinado como definem Chen, Qian e Song (2016) (Equação (46)), em função da redução do módulo de elasticidade do material, onde E corresponde ao módulo de elasticidade na idade analisada e $E_{\text{máx}}$ o maior módulo de elasticidade da amostra.

$$D = 1 - \frac{E}{E_{\text{máx}}} \quad (46)$$

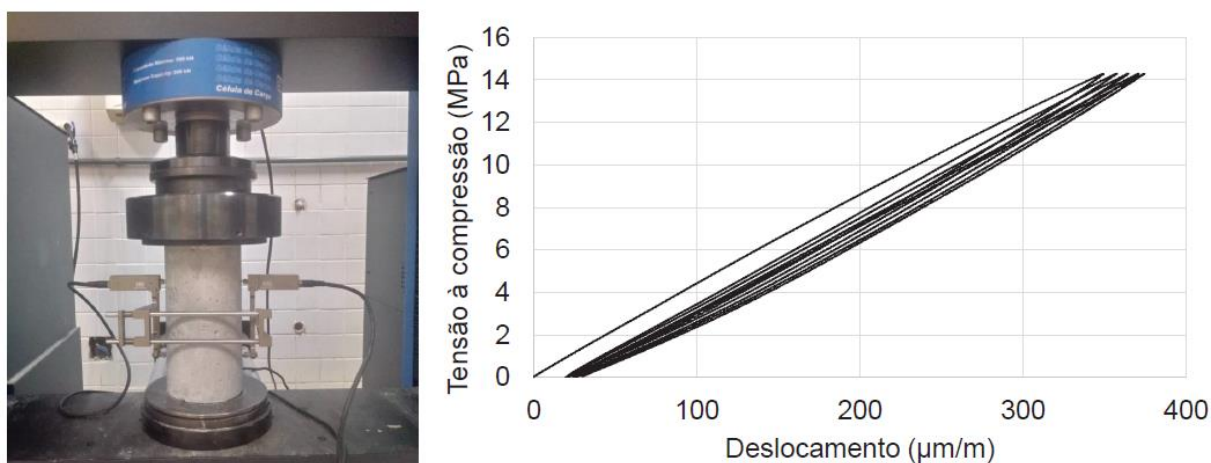
Ainda no intuito de verificar se o dano pode ser determinado de forma experimental, realizou-se o ensaio de SDT. Esse ensaio não estava programado no planejamento inicial da pesquisa, e assim, foi realizado para as amostras disponíveis, sendo duas repetições para os traços de extremidade (relação água/cimento 0,65 e

0,32) e o traço intermediário (a/c 0,50). A avaliação foi realizada para as amostras após o período de cura e após 12 meses de exposição às soluções de sulfatos.

O equipamento utilizado para o ensaio de SDT foi uma prensa com capacidade de 100 kN da marca INSTRON, instalada no laboratório de ensaios mecânicos (LEM) do departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Paraná. A carga máxima utilizada foi 40% da resistência à compressão obtida aos 28 dias, após o fim do período de cura, conforme sugere Sanchez *et al.* (2014).

O teste foi realizado com 5 ciclos de carga/descarga com uma taxa de aplicação de carga controlada de 0,10 MPa/s. São utilizados extensômetros para medir o deslocamento da amostra mediante a aplicação da carga, como pode-se ver na Figura 37. Com os dados obtidos no ensaio, gera-se uma curva de tensão x deslocamento (Figura 37), que permite determinar os índices SDI e PDI descritos no item 2.3 deste trabalho.

Figura 37 - Ensaio de SDT - corpo de prova com extensômetro e gráfico gerado.



Fonte: Langaro, 2023.

Para realizar o cálculo dos índices, foi necessário segmentar as 5 curvas de carga e as 5 de descarga. Esse processo foi realizado por um código em linguagem C, que permitiu identificar e organizar as curvas de forma adequada. Como resultado, o código gerou uma planilha em Excel com as curvas devidamente separadas, assim como fez Langaro (2023).

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

4.3.1 Variáveis de análise

Com os resultados obtidos nas etapas 1 e 2 é possível obter o modelo de Andrade, C. (2004) ajustado para sulfatos, sendo necessário então a validação do modelo desenvolvido, de forma a verificar sua aplicabilidade. Para isso, foram dosados outros 2 traços de concreto, expostos a soluções de sulfato, monitorados e cujos dados não foram aplicados no desenvolvimento do modelo, e sim posteriormente como forma de verificar o erro entre os resultados do modelo e os observados nos dados experimentais. O modelo também será aplicado aos dados de Melara *et al.* (2022) para verificação da aplicabilidade.

Nesta etapa, as variáveis independentes são:

- Tipo de solução: solução de sulfato de sódio e solução de sulfato de magnésio;
- Traços da matriz cimentícia: a/c de 0,40 a 0,55.

Como variáveis dependentes, tem-se:

- Abatimento do concreto;
- Perfil de sulfatos nas amostras;
- Resistividade elétrica superficial do concreto;
- Velocidade de onda de ultrassom.

A metodologia adotada na etapa 3 é descrita nos itens 4.3.2 a 4.3.4.

4.3.2 Caracterização dos materiais

Os materiais adotados para preparação dos corpos de prova de concreto são os mesmos descritos na etapa 2 (item 4.2.2).

4.3.3 Dosagem do concreto e moldagem dos corpos de prova

As dosagens do concreto adotadas nesta etapa também tem como base os traços sugeridos por Mendes, S. E. S. *et al.* (2018), com teor ótimo de argamassa de

52% e *slump test* mantido em (100 ± 20) mm. Neste caso, optou-se por dosagens com relações a/c e consumos de cimento que ficassem dentro dos limites adotados anteriormente, que foram relações a/c de 0,32 a 0,65, com consumos de 297 a 656 kg de cimento por metro cúbico de concreto. A Tabela 14 apresenta as dosagens adotadas nesta etapa.

Tabela 14 – Dosagens das amostras de concreto da etapa 3.

Relação a/c	Cimento CP V ARI (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Brita (kg/m ³)	SP (%)
0,40	497	198	624	1039	0,32
0,55	352	193	761	1039	0,17

Fonte: A autora.

A moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos de $\Phi 100 \times 200$ mm e prismáticos com dimensão de $150 \times 150 \times 250$ mm foram realizadas conforme já descrito para a etapa 2 (item 0). Novamente foram adotadas 3 repetições para cada situação estudada, analisando tanto sulfato de sódio, quanto de magnésio, o que resultou na quantidade de amostras apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Quantidade de corpos de prova da etapa 3.

Ensaio		Quantidade de corpos de prova	Formato dos corpos de prova
Difusão	Resistividade	12*	Prismáticos
	Ultrassom	12*	Prismáticos
	Perfis de sulfato	36	Cilíndricos

NOTA: * Os mesmos corpos de prova foram utilizados para os dois ensaios.

Fonte: A autora.

4.3.4 Ensaios de caracterização do concreto

As amostras moldadas foram mantidas em imersão em solução de sulfatos durante 12 meses. As idades adotadas para análise foram 0 (após o fim da cura dos corpos de prova), 6 e 12 meses de exposição. Nestas idades foi determinado o perfil de sulfatos nas amostras de concreto por FRX, com o objetivo de comparar a profundidade de sulfatos obtida pelo modelo ajustado com os dados obtidos para as amostras. O perfil foi traçado em passos de 5 mm a partir da face não impermeabilizada.

Com os dados obtidos, foi possível calcular o erro relativo entre a profundidade de difusão experimental ($Emp(X)$) e a profundidade teórica determinada pelo modelo desenvolvido ($Teo(X)$), conforme Equação (47).

$$ER = \frac{\sqrt{[Teo(X) - Emp(X)]^2}}{Emp(X)} \quad (47)$$

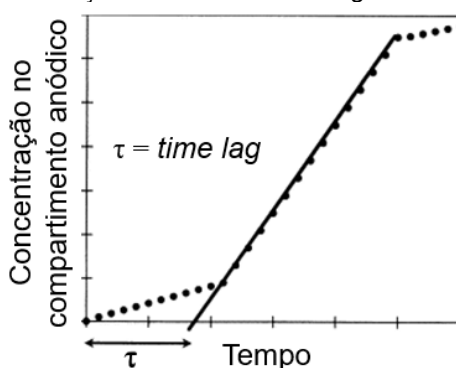
Para monitorar as amostras nesta etapa de validação e permitir a aplicação do modelo proposto, realizou-se mensalmente o ensaio de resistividade elétrica e de ultrassom, conforme metodologia descrita anteriormente (itens 0 e 4.2.10).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ETAPA 1 – AJUSTE DO ENSAIO DE MIGRAÇÃO

Com o objetivo de refinar a metodologia proposta por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a, 2023b) para o ensaio de migração no estudo de íons sulfatos, primeiramente, o ensaio foi realizado para duas espessuras de amostras: 25 mm, assim como os autores, em seguida aumentando este valor para 50 mm. O aumento da espessura foi realizado com o objetivo de retardar o aumento da concentração dos sulfatos no compartimento anódico, e com isso, permitir a determinação do tempo chamado de *time-lag*, obtido pela intersecção da linha reta do fluxo de íons característico do estado estacionário com o eixo horizontal do gráfico, como ilustra a Figura 38. Este valor permitiria o cálculo do coeficiente de difusão em estado não estacionário a partir de equações propostas por Castellote, Andrade e Alonso (2001).

Figura 38 - Determinação do valor de *time-lag* no ensaio de migração.



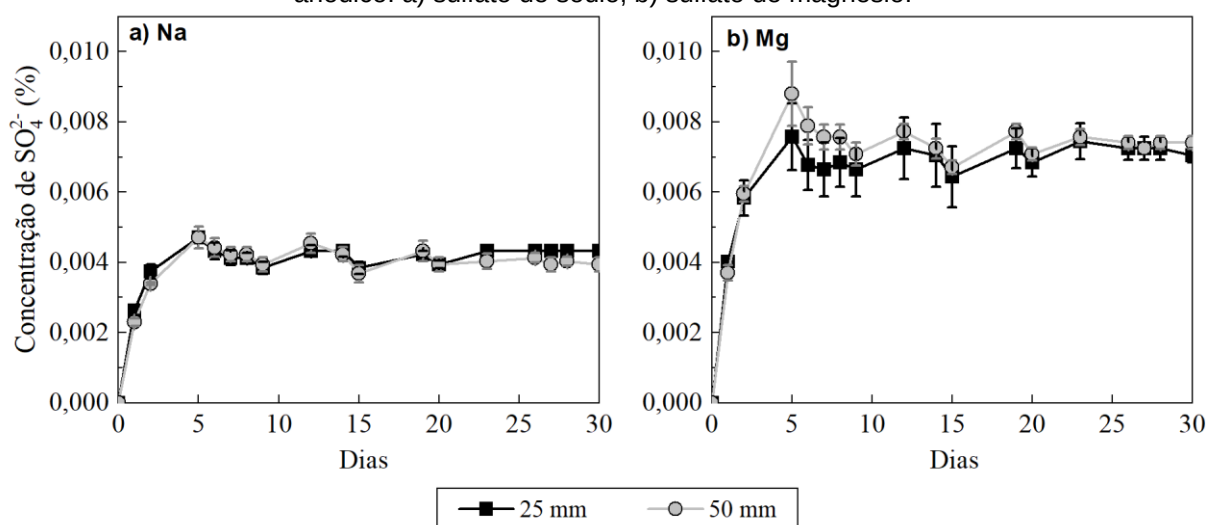
Fonte: Traduzido de: Castellote; Andrade; Alonso, 2001.

Os resultados encontrados para as duas espessuras de amostras testadas são apresentados na Figura 39. Assim como para Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a), os valores de concentração são maiores para as amostras com ensaio realizado para sulfato de magnésio que para sulfato de sódio. Os autores associam este comportamento com a maior mobilidade iônica do magnésio quando comparado ao sódio: $5,55 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ para o magnésio e de $5,19 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ para o sódio à 25°C em água (Atkins; De Paula, 2008).

Ainda, da mesma forma que para os autores, ao prolongar-se a reta do período estacionário nas amostras de 25 mm, o valor de *time-lag* determinado é negativo, não sendo possível utilizar as equações propostas por Castellote, Andrade

e Alonso (2001). Esperava-se que isso não ocorresse aumentando a espessura da amostra para 50 mm, mas, como pode-se observar na Figura 39, não houve diferença estatística nas concentrações obtidas mesmo com a variação no tamanho do disco. A concentração inicial de SO_4^{2-} nas amostras, devido ao gesso que é incorporado ao clínquer na produção de cimento, faz com que o período estacionário seja atingido já nas primeiras idades do ensaio de migração (Brekailo; Pereira; Medeiros-Junior, 2023a).

Figura 39 - Influência da espessura da amostra na concentração de sulfatos no compartimento anódico: a) sulfato de sódio; b) sulfato de magnésio.



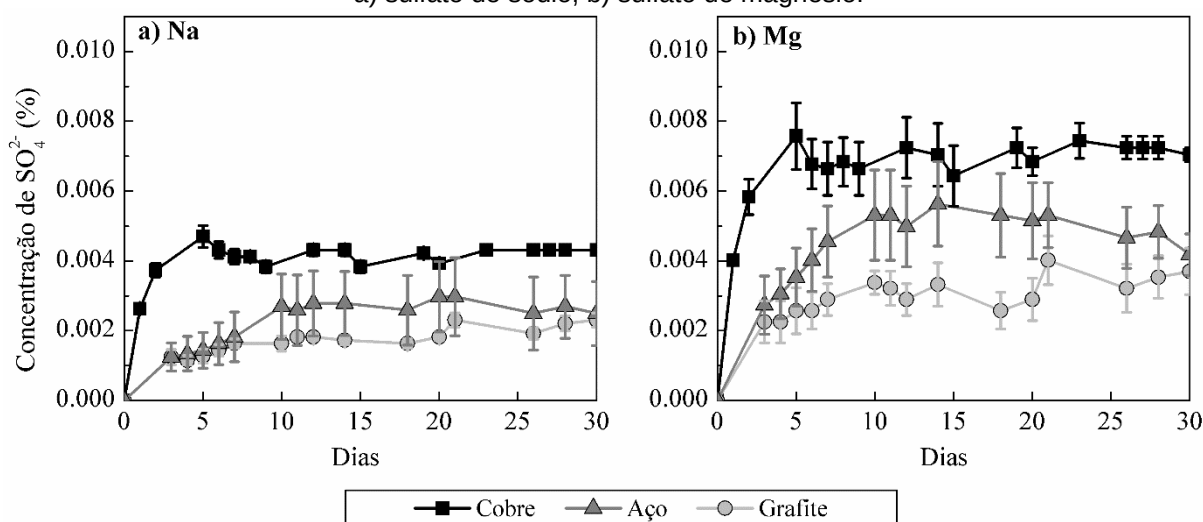
Fonte: A autora.

Assim, optou-se por manter as amostras com 25 mm para os demais ensaios de migração realizados nesta pesquisa, pela maior facilidade de encaixe nas luvas de PVC adotadas nas montagens das células de migração. Com a espessura fixada, passou-se a análise da influência do material do eletrodo empregado no ensaio. Os testes foram realizados com eletrodos de cobre (assim como adotado por Brekailo; Pereira; Medeiros-Junior, 2023a, 2023b), grafite e aço. A influência do tipo de eletrodo na concentração de sulfatos no compartimento anódico é apresentada na Figura 40.

Novamente, não foi possível determinar um valor de *time-lag* positivo. Para o ensaio com sulfato de magnésio as concentrações de sulfatos no compartimento anódico também são mais altas quando comparadas ao sulfato de sódio. Ainda, assim como esperado, a concentração aumenta nas primeiras idades e permanece praticamente constante até o fim do ensaio.

Porém, pode-se observar na Figura 40 que o tipo de eletrodo influenciou na condutividade elétrica das soluções e consequentemente na concentração determinada. As concentrações médias mais altas foram obtidas quando o cobre foi utilizado como eletrodo (e o pico de concentração máxima atingido em uma idade menor, aos 5 dias), seguido do aço e do grafite. Nota-se que além do valor da concentração, o tipo de eletrodo teve impacto na variabilidade dos dados, onde nota-se a barra de erros com maior variação no ensaio realizado com aço.

Figura 40 - Influência do tipo de eletrodo na concentração de sulfatos no compartimento anódico: a) sulfato de sódio; b) sulfato de magnésio.



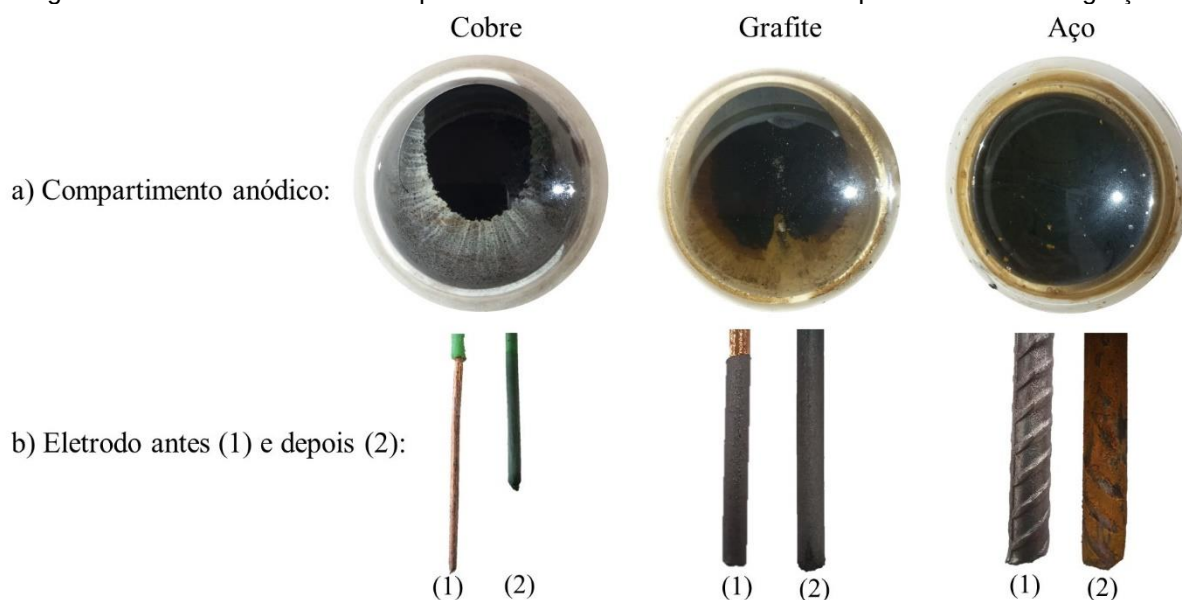
Fonte: A autora.

Para o ensaio de migração com íons cloretos, alguns autores afirmam ser benéfico a adoção barras de aço como eletrodo, pois a oxidação da barra impede a formação de gás cloro, que é um composto tóxico (Andrade, C.; D'Andrea; Rebolledo, 2014; Medeiros-Junior, 2014). Tal composto não é formado no ensaio com íons sulfatos, e neste caso, a oxidação da barra pode ter levado ao maior desvio padrão nas medidas de condutividade. Com a Figura 41 é possível avaliar visualmente a oxidação dos eletrodos antes e após o término do ensaio de migração, bem como o compartimento anódico no fim do teste.

Nota-se no compartimento anódico a presença de óxidos devido a oxidação dos eletrodos, o que também ocorreu nos testes de Brekailo (2020). As barras de aço apresentam forte corrosão e opacidade na solução, o que indica a influência dos produtos de oxidação na condutividade da solução e no desvio padrão entre as análises, demonstrados na Figura 40. Os fios de cobre foram reduzidos na parte

exposta, permanecendo apenas a região revestida do fio. Já o grafite, não apresentou mudanças significativas na barra, mas é possível notar óxidos na solução.

Figura 41 - Análise visual do compartimento anódico e dos eletrodos após o ensaio de migração.



Fonte: A autora.

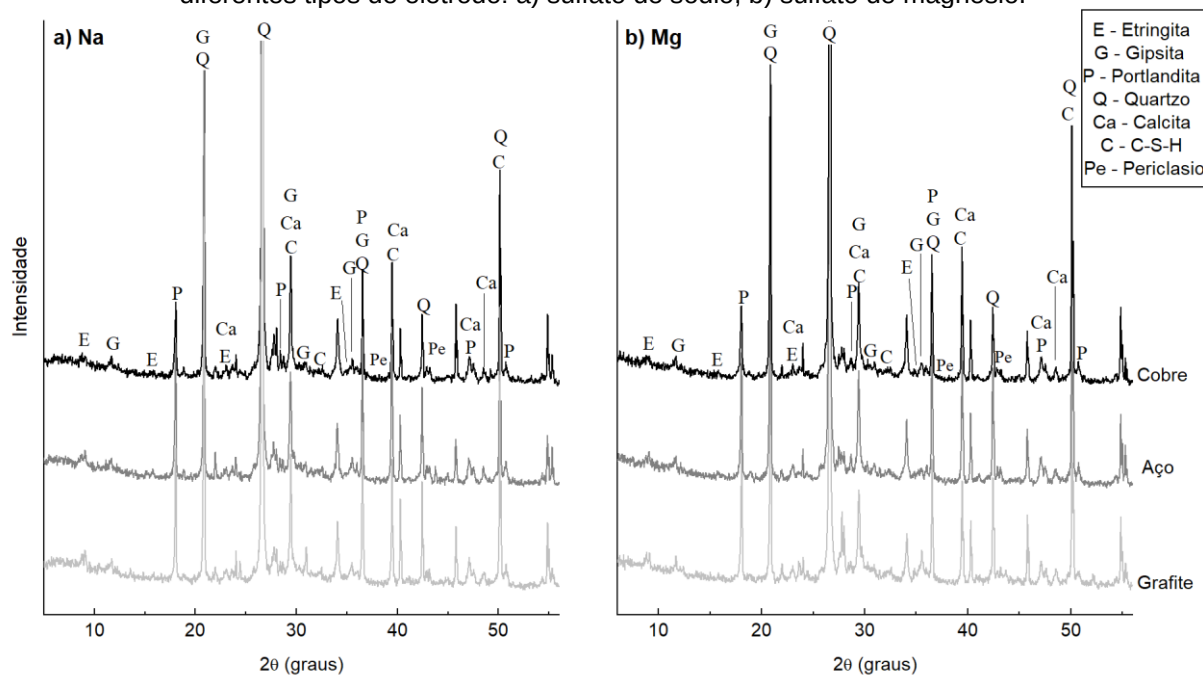
Zhang, W. M. e Ba (2012) avaliam o comportamento da corrosão dos eletrodos em ensaios de migração de cloretos. Os autores fazem análises de DRX nos eletrodos após o fim do ensaio, para eletrodos de grafite, aço inoxidável e latão. No difratograma de raios X do aço inoxidável foram identificados produtos de corrosão como o $\text{FeO}(\text{OH})$, Fe_2O_3 e $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Para o latão, foram identificados como produtos de corrosão Cu_2O , Cu_8O e CuO . O eletrodo de grafite, por sua vez, manteve a composição inicial, não apresentando produtos de corrosão. Além disso, os autores identificaram cloreto de sódio fixado nos eletrodos de aço e latão, o que impacta no coeficiente de difusão determinado para as amostras de concreto que adotam estes materiais como eletrodo.

Para esta pesquisa, foi realizada a análise de DRX nas amostras de concreto após o ensaio de migração com os diferentes eletrodos, com o objetivo de avaliar se o material do eletrodo alteraria os compostos formados na matriz pelo ataque externo por sulfatos. Os difratogramas são apresentados na Figura 42. Como pode-se observar, os compostos identificados para todas as situações foram os mesmos.

Devido aos agregados utilizados, foram identificados picos de quartzo, calcita e periclásio. A portlandita, C-S-H e etringita observados são produtos da hidratação

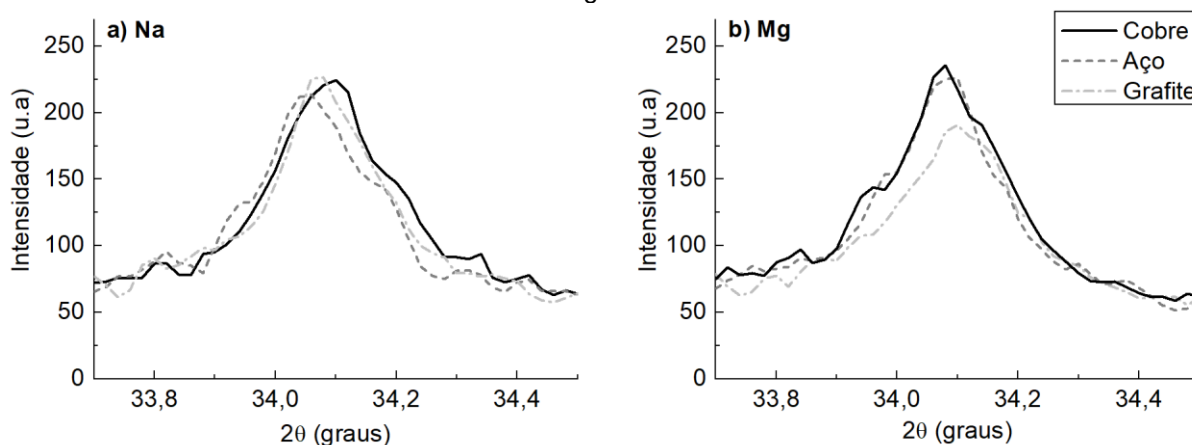
do cimento. A etringita ainda, junto a gipsita, representam os produtos formados pelo consumo de portlandita no ataque externo por sulfatos. Avaliando apenas os picos de maior intensidade da portlandita ($34^\circ 2\theta$), nota-se que não há diferença significativa para os casos analisados, o que indica que o material do eletrodo não alterou a cinética das reações, pois não houve diferença no consumo de portlandita no ESA (Figura 43).

Figura 42 - Difratoograma de raios X das amostras de concreto após o ensaio de migração com diferentes tipos de eletrodo: a) sulfato de sódio, b) sulfato de magnésio.



Fonte: A autora.

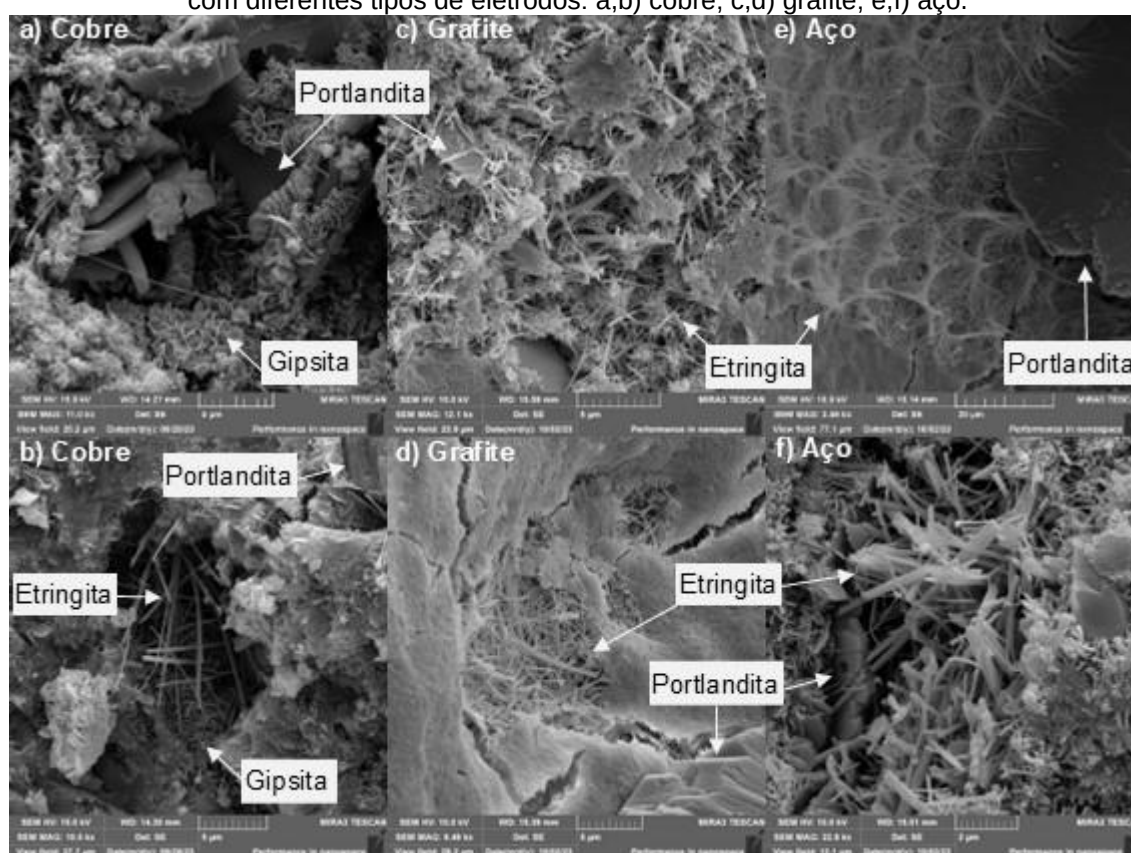
Figura 43 - Análise comparativa do pico de maior intensidade da portlandita das amostras de concreto após o ensaio de migração com diferentes tipos de eletrodo: a) sulfato de sódio, b) sulfato de magnésio.



Fonte: A autora.

Avaliando por sua vez a morfologia dos compostos, é possível notar que há influência do material do eletrodo (Figura 44 e Figura 45). Nas amostras dos ensaios com cobre e grafite, é possível identificar na região de poros da matriz a presença de cristais aciculares de etringita e gipsita na forma de rosáceas. Estes cristais encontraram-se usualmente associados à placas hexagonais de portlandita, já que a formação de etringita secundária e gipsita estão relacionadas ao consumo deste composto (Figura 44a,b,c,d e Figura 45a,b,c,d).

Figura 44 – Microestrutura das amostras de concreto após o ensaio de migração de sulfato de sódio com diferentes tipos de eletrodos: a,b) cobre; c,d) grafite; e,f) aço.



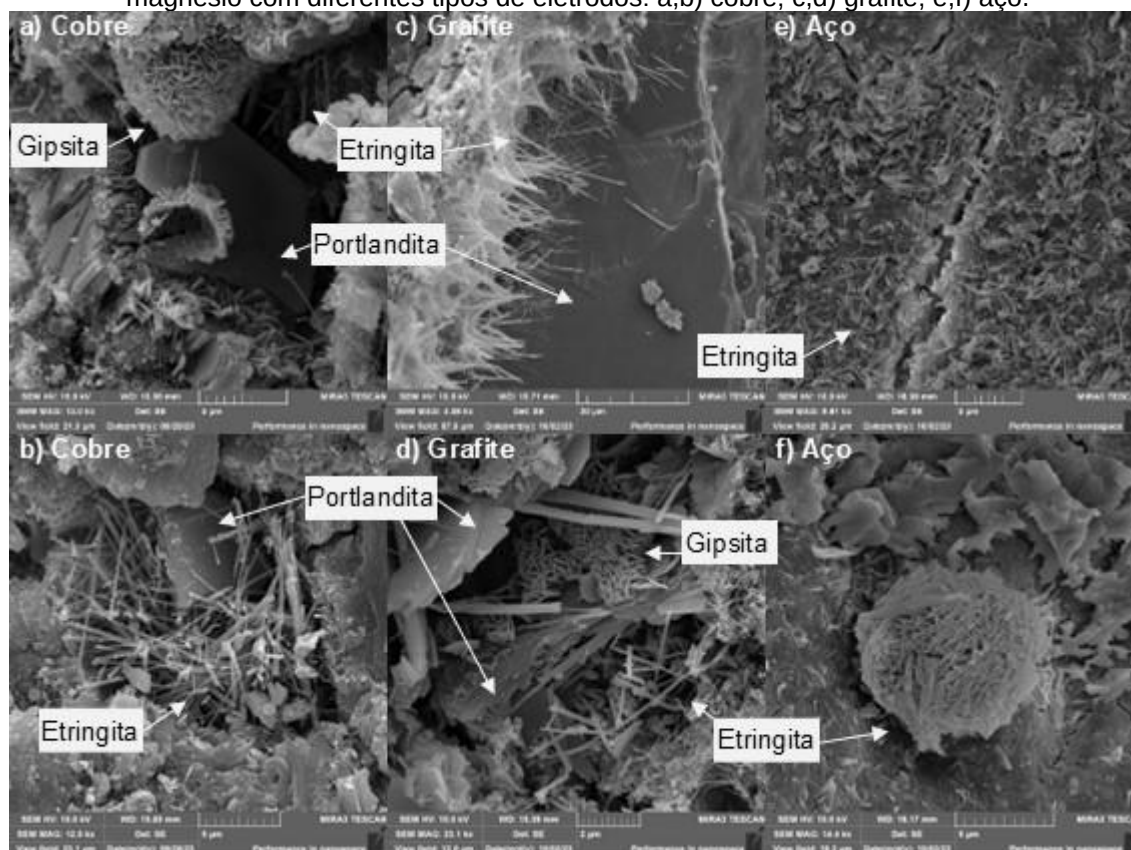
Fonte: A autora.

Esta microestrutura observada é similar a identificada por Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023a) em ensaios de difusão natural de sulfato de sódio e magnésio para o mesmo traço de concreto (Figura 46), o que indica a potencialidade do ensaio de migração com estes eletrodos ser adotado como metodologia acelerada.

Já para as amostras com ensaio em aço, é possível observar que há formação dos cristais de etringita não apenas na região dos poros junto à portlandita (Figura 44f), mas também dispersos pela matriz (Figura 44e e Figura 45e) ou na forma de aglomerados (Figura 45f). Tal característica não é similar àquela encontrada em

situações de difusão natural, evidenciando que o aço não é adequado para ser utilizado como eletrodo no ensaio de migração de sulfatos.

Figura 45 – Microestrutura das amostras de concreto após o ensaio de migração de sulfato de magnésio com diferentes tipos de eletrodos: a,b) cobre; c,d) grafite; e,f) aço.



Fonte: A autora.

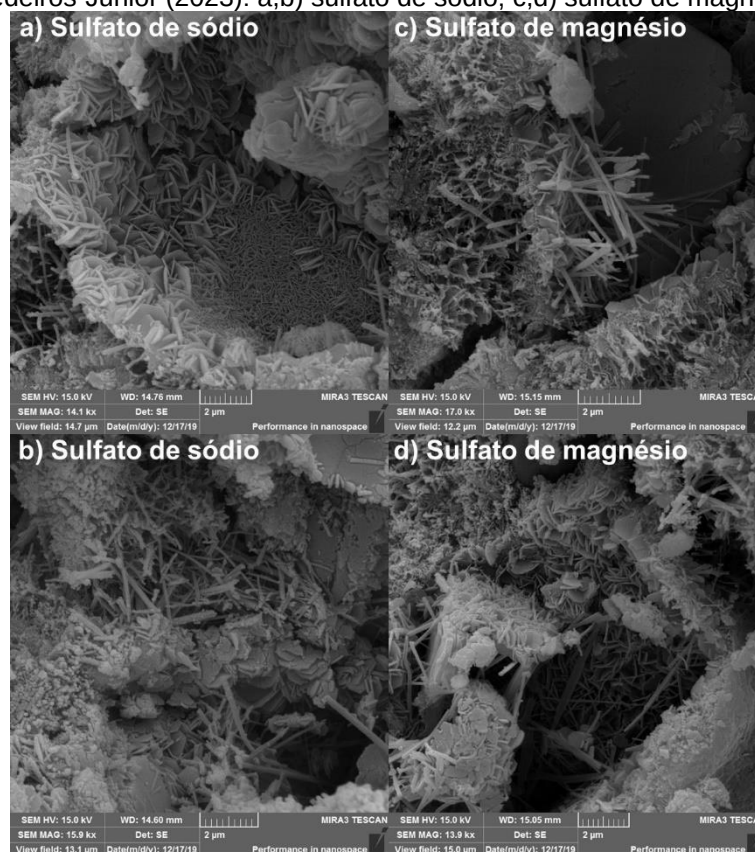
5.1.1 Discussões Finais da Etapa 1

O aumento da espessura dos discos de concreto utilizados no ensaio de migração não se mostrou efetivo no retardo desejado na chegada de íons sulfatos ao compartimento anódico. Assim, a escolha por manter as amostras com 25 mm de espessura, baseia-se na facilidade executiva do ensaio.

A variação do material do eletrodo também não permitiu a determinação de um *time-lag* positivo, porém, influenciou no valor da condutividade e consequente concentração de íons sulfatos determinada no compartimento anódico, bem como na variabilidade dos dados, devido a oxidação dos eletrodos. Os compostos formados durante o ataque foram os mesmos independente do material de eletrodo adotado, porém, se apresentaram com morfologia diferente na matriz cimentícia.

O eletrodo de aço demonstrou ser o menos adequado para o uso em ensaio de migração de sulfato, com a maior variabilidade nos dados de concentração, bem como com os compostos dispostos na matriz de uma forma que não pode ser associada ao ataque em uma situação de difusão natural, o que implica de forma negativa em seu uso como eletrodo de um ensaio acelerado.

Figura 46 – Microestrutura das amostras de concreto de difusão natural de Brekailo, Pereira e Medeiros-Junior (2023): a,b) sulfato de sódio; c,d) sulfato de magnésio.



Fonte: Adaptado de: Brekailo; Pereira; Medeiros-Junior, 2023a.

Em sua pesquisa da corrosão de eletrodos no ensaio de migração, Zhang, W. M. e Ba (2012) concluem que o grafite é o eletrodo adequado para ensaios de cloretos. Tal afirmativa também se mostra válida para o ensaio de migração de sulfatos, observando a baixa oxidação do eletrodo de grafite e a pequena variação dos dados de concentração, evidenciados pelo pequeno desvio de padrão nos dados.

Além disso, para este eletrodo, é possível definir de forma clara o período estacionário do ensaio, onde a variação da concentração é linear ao longo do tempo (Figura 40). Tanto para sulfato de sódio, como para sulfato de magnésio, isso ocorre até os 10 dias de ensaio, mantendo a proposta de ser um ensaio acelerado.

Evidenciando o comportamento adequado para sua adoção como ensaio acelerado, a microestrutura das amostras de concreto após 1 mês de migração apresentou as mesmas características de amostras de concreto de mesmo traço após 6 meses de difusão natural. Tal comportamento ocorreu também quando o cobre foi utilizado como eletrodo, porém, somado as demais análises, o uso do grafite mostrou-se mais adequado. Desta forma, os ensaios de migração realizados na etapa 2 desta pesquisa adotaram amostras com 25 ± 5 mm de espessura e barras de grafite como eletrodo.

5.2 ETAPA 2 – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

5.2.1 Caracterização das amostras de concreto

Para as discussões a respeito dos resultados obtidos na caracterização das amostras de concreto, os traços foram referidos em função da sua relação água/cimento, além dos termos *REF*, *Na* ou *Mg*, para referir-se as amostras de referência, sulfato de sódio e sulfato de magnésio, respectivamente. Por exemplo, a amostra *Na 0,50* refere-se a amostra ensaiada em sulfato de sódio de relação a/c 0,50.

Porém, é importante destacar que, conforme dosagem apresentada na Tabela 12, os traços adotados nesta etapa não variam apenas na quantidade de água em relação à cimento. O teor ótimo de argamassa foi mantido constante, bem como o abatimento, mas o consumo de cimento por traço não é o mesmo, nem a proporção de areia e brita.

Destaca-se que, à medida que se aumentou a relação água/cimento, que torna o concreto mais poroso e de menor resistência, e a princípio, mais suscetível ao ataque por sulfatos (Ikumi; Cavalaro; Segura, 2019; Mehta; Monteiro, 2014), se reduziu o consumo de cimento. Assim, o concreto possui um menor teor de C_3A , o tornando por outro lado, a princípio, mais resistente ao ataque (ACI, 2014; Hossack; Thomas, 2015).

O teor de C_3A do cimento CPV utilizado nessa etapa foi determinado tendo como base os óxidos presentes (Tabela 11) e a Equação de Bogue demonstrada na Equação (48) (ASTM, 2021), chegando-se no valor de 3,91%. Assim, a Tabela 16

apresenta o teor de C_3A e a relação água/cimento para as dosagens utilizadas na etapa 2 deste trabalho.

$$\text{Aluminato tricálcico (C}_3\text{A)} = 2,650.\text{Al}_2\text{O}_3(\%) - 1,692.\text{Fe}_2\text{O}_3(\%) \quad (48)$$

Tabela 16 – Teor de C_3A e volume de pasta das dosagens das amostras de concreto da etapa 2.

Relação a/c	Cimento CP V ARI (kg/m ³)	Cimento CP V ARI (% da mistura)	Teor de C_3A (% da mistura)	Volume de pasta (m ³ pasta/ m ³ concreto)
0,32	656	27,94	1,09	0,408
0,35	572	24,26	0,95	0,373
0,44	444	18,83	0,74	0,330
0,50	395	16,85	0,66	0,317
0,60	328	14,02	0,55	0,296
0,65	297	12,67	0,50	0,283

Fonte: A autora.

A Tabela 16 apresenta também o volume de pasta para cada uma das dosagens. Como pode-se observar, quanto menor o volume de cimento, menor é o volume de pasta em relação ao volume não reativo (agregados). Assim, a redução do aglomerante não diminui apenas a quantidade de fases reativas, diminui também o volume de pasta, que é por onde ocorre a difusão dos íons. Assim, os traços mais porosos avaliados, são aqueles com menor teor de C_3A e volume de material para reações. Como apresentado na metodologia desta Tese, o objetivo de tal escolha foi para avaliar tanto o efeito da variação de porosidade como da quantidade de fase reativa disponível.

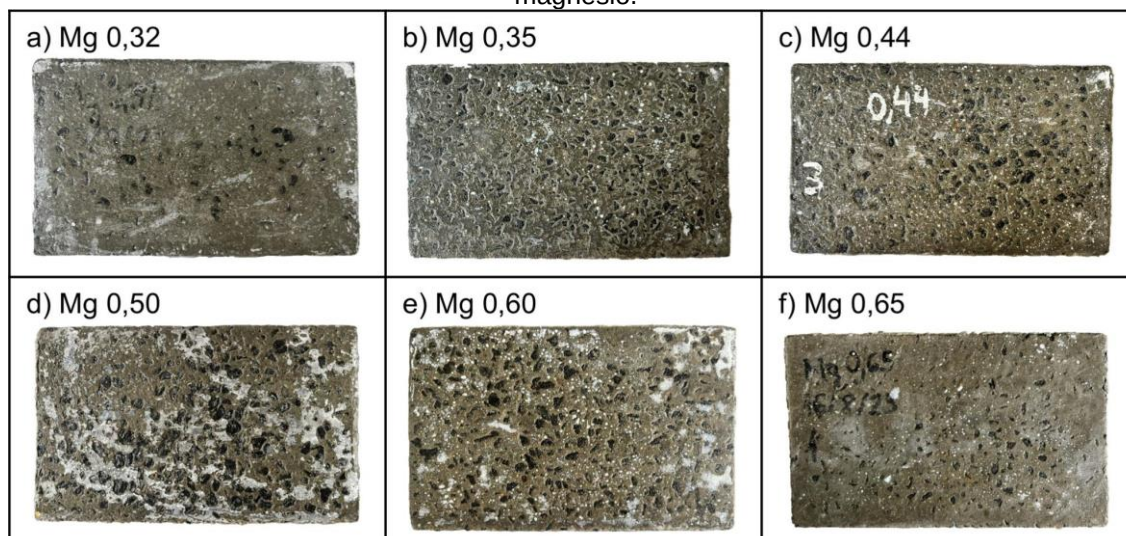
Analisando primeiramente o aspecto visual das amostras após 12 meses de difusão nas soluções analisadas (Figura 47, Figura 49 e Figura 48), pode-se notar a degradação associada. Nas amostras de referência, mantidas imersas em água, não há fissuras visíveis (Figura 47).

Figura 47 – Aspecto visual das amostras após 12 meses de ensaio: traços de referência.



Fonte: A autora.

Figura 48 - Aspecto visual das amostras após 12 meses de ensaio: traços expostos ao sulfato de magnésio.

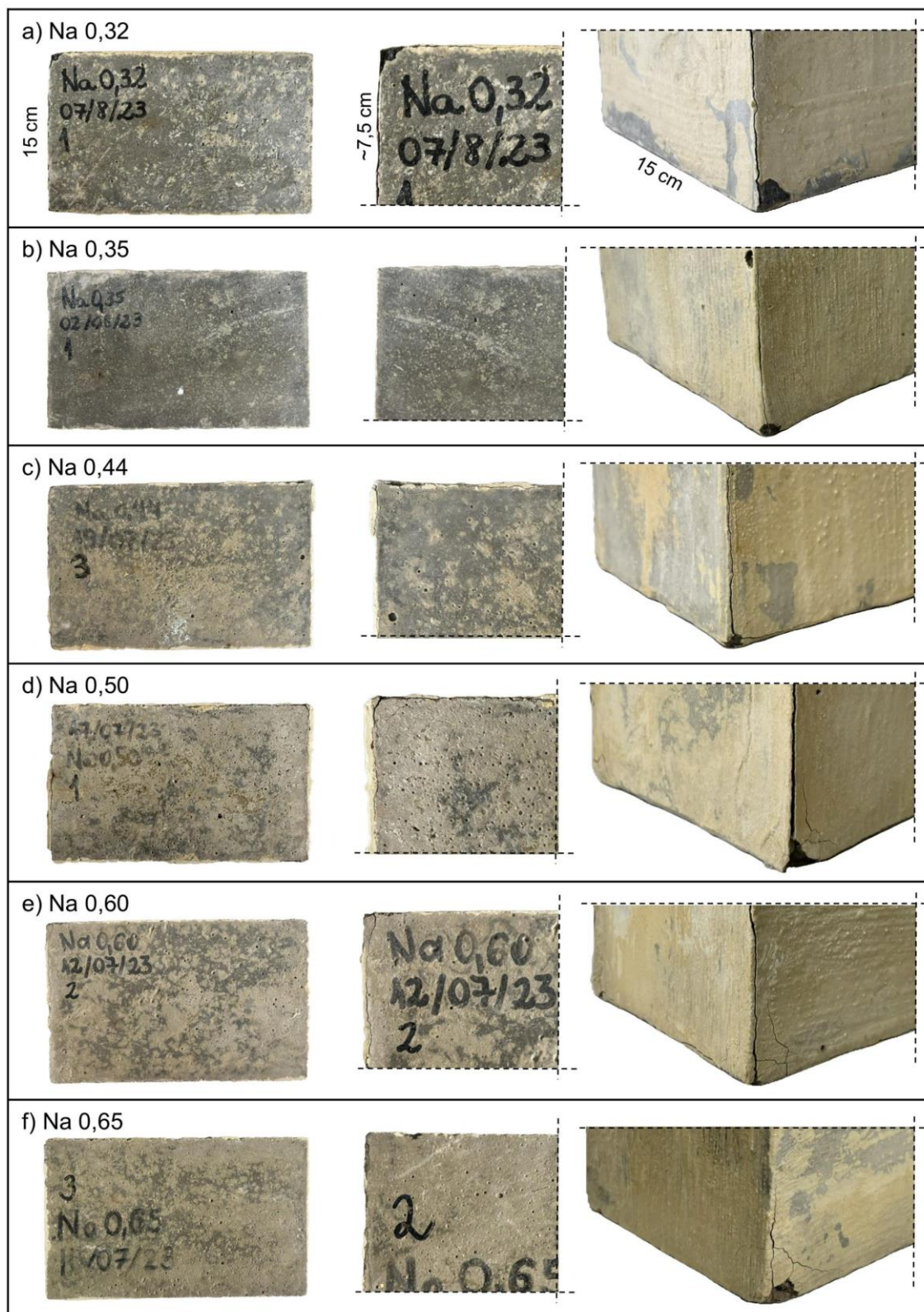


Fonte: A autora.

Já para as amostras imersas em sulfato de sódio, é possível identificar a formação de manchas amareladas na superfície, bem como a formação de fissuras nos cantos e bordas de todos os traços avaliados (Figura 49). As amostras imersas em sulfato de magnésio têm a superfície irregular, com parte do agregado graúdo exposto (Figura 48). A aparência visual das amostras é similar às ensaiadas por Jiang e Niu (2016), que também realizaram estudo de concreto exposto ao sulfato de sódio e magnésio.

As fissuras formadas nas amostras de sulfato de sódio facilitam a entrada dos íons à camadas mais internas do material se a exposição for continuada (Santhanam; Cohen; Olek, 2003). Para as amostras de sulfato de magnésio, a formação de brucita retarda o ataque, mas por outro lado, pela sua maior agressividade e capacidade de consumir o C-S-H, torna a matriz uma pasta sem coesão (Santhanam; Cohen; Olek, 2002a, 2003), o que pode ter levado a dissolução da pasta da camada superficial das amostras na solução.

Figura 49 - Aspecto visual das amostras após 12 meses de ensaio: traços expostos ao sulfato de sódio.



Fonte: A autora.

Ao comparar o índice de vazios e a absorção de água das amostras antes e depois da exposição aos íons sulfatos, nota-se que para quase todos os traços

avaliados houve redução destas propriedades (Figura 50 e Figura 51). Tal redução pode ser associada à formação dos cristais de etringita secundária e gipsita devido ao ataque externo por sulfatos, gerando em um primeiro momento do ataque um refinamento nos poros da matriz, e conseqüentemente menor absorção e índice de vazios (Ikumi *et al.*, 2014; Jiang; Niu, 2016).

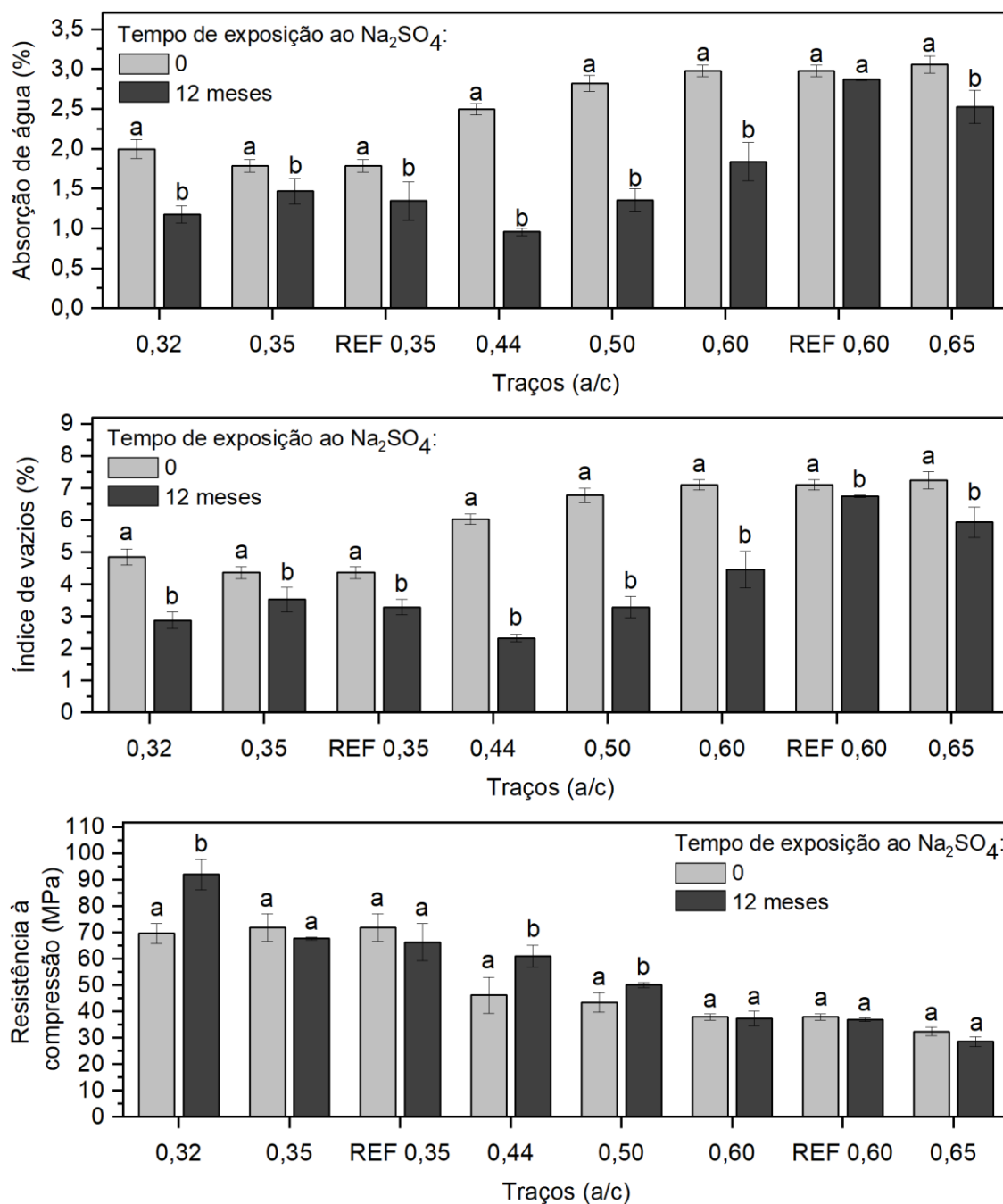
Associada a redução do índice de vazios e da absorção de água, nota-se que a resistência à compressão das amostras aumentou ou não apresentou diferença estatística após 12 meses de exposição (Figura 50 e Figura 51). Esperava-se que com o período adotado de degradação houvesse uma redução nas propriedades mecânicas da matriz. Porém, este resultado indica em que estágio se encontra o ataque nas amostras avaliadas.

O preenchimento dos poros, que leva a redução dos vazios presentes, melhora suas propriedades mecânicas, o que é observado também por outros autores. Em outras pesquisas, é possível observar que, antes das reduções de resistência à compressão, há um aumento inicial, justamente pelo refinamento da matriz. Porém, com a continuidade do ataque, os produtos formados originam tensões internas e fissuras, capazes de reduzir as propriedades mecânicas (Jiang; Niu, 2016; Lee *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2016).

Zhou *et al.* (2016) adotaram ciclos de molhagem e secagem de 12 horas, onde as amostras ficaram imersas por 9 horas em solução, eram secas ao ar por 1 hora, secas em estufa a 40 °C por 1 hora e resfriados à temperatura ambiente por mais uma hora. Os autores tiveram aumento na resistência à compressão até 30 dias do ensaio, seguindo da redução desta propriedade.

Lv *et al.* (2020) observaram aumentos de resistência até 90 ciclos de molhagem e secagem. Os ciclos adotados neste caso foram de 24 horas, onde as amostras ficaram imersas por 15 horas em solução, eram secas ao ar por 1 hora, secas em estufa a 80 °C por 6 horas e resfriados à temperatura ambiente por 2 horas. Tal efeito também foi observado por Jiang; Niu (2016).

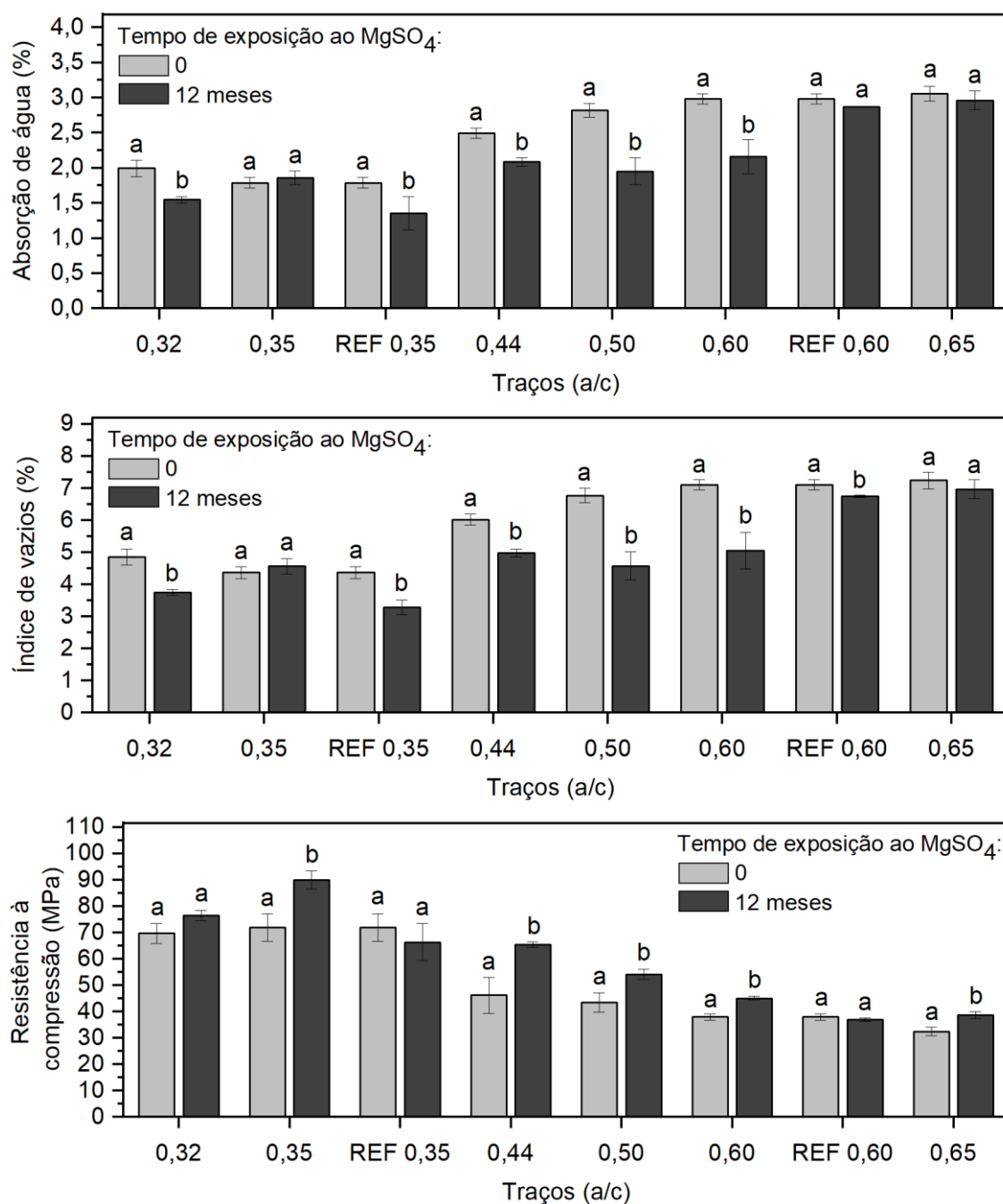
Figura 50 – Valores médios de absorção de água, índice de vazios e resistência à compressão das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio.



Notas: Barras pertencentes ao mesmo grupo seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Fonte: A autora.

Figura 51 - Valores médios de absorção de água, índice de vazios e resistência à compressão das amostras de concreto expostas ao sulfato de magnésio.



Notas: Barras pertencentes ao mesmo grupo seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Fonte: A autora.

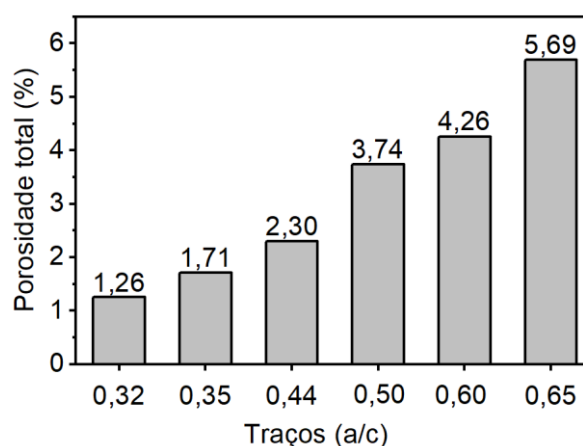
Todos os autores citados trabalharam com ciclos de molhagem e secagem, que tornam o ataque por sulfatos ainda mais agressivo e rápido, o que tornou possível nos prazos avaliados observar o ataque em estágios avançados. Na presente Tese, optou-se por não trabalhar com ciclos nem com aumento da temperatura para limitar as variáveis avaliadas, e com isso, os resultados indicam que as amostras se

encontram ainda em um estágio inicial do ataque, onde a rede de poros foi refinada. Acredita-se que com o prolongamento do tempo de exposição, também seria possível obter dano na propriedade mecânica avaliada, o que é reforçado pela análise visual das amostras apresentada anteriormente (Figura 49 e Figura 48).

Pode-se também notar a partir da Figura 50 e Figura 51 as tendências de variação das propriedades em função da variação na relação água/cimento. Pode-se identificar que a absorção de água aumenta com o aumento da relação água/cimento. Construindo uma regressão linear da a/c versus a média da absorção de água tanto para a idade zero, quanto após 12 meses de exposição aos sulfatos, obteve-se uma reta crescente com R^2 de 0,92, confirmando que quanto maior a água/cimento, maior a absorção. O mesmo houve para regressão linear realizada para a/c versus índice de vazios médio, também com R^2 de 0,92. Já para a resistência à compressão, obteve-se uma reta decrescente com R^2 de 0,98, ou seja, quanto maior a relação água/cimento, menor a resistência obtida.

Estes resultados estão coerentes, já que há um aumento da porosidade com a maior quantidade de água adicionada a mistura (Mehta; Monteiro, 2014; Neville; Brooks, 2013). Tal fato é confirmado pelo ensaio de microCT, como apresentado na Figura 52.

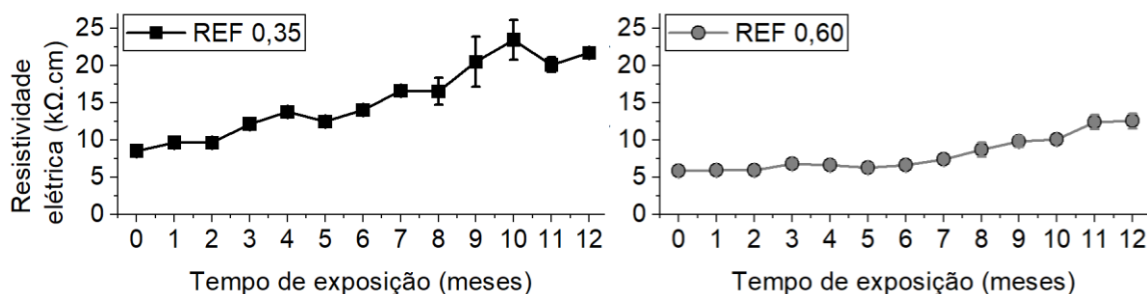
Figura 52 – Porosidade das amostras de concreto após cura em água.



Fonte: A autora.

Os traços foram avaliados também mensalmente a partir das técnicas não destrutivas de medidas de resistividade elétrica superficial (RES) e de velocidade de pulso ultrassônico (VPU). As Figura 53, Figura 54 e Figura 55 apresentam a evolução da RES ao longo dos 12 meses de difusão natural nas soluções estudadas.

Figura 53 – Evolução da resistividade elétrica das amostras de concreto de referência.



Fonte: A autora.

Como pode-se observar, para as amostras de referência (Figura 53), há uma tendência de crescimento desta propriedade. O aumento da RES ao longo do tempo em amostras de referência pode ser associado pela continuidade da hidratação do cimento e do endurecimento do concreto que tendem a aumentar a resistividade elétrica (Medeiros-Junior *et al.*, 2019), que é corroborado pela redução no índice de vazios desses traços (Figura 50). O traço *REF 0,35*, de menor porosidade que o traço *0,60* (Figura 52), apresenta valores mais altos de resistividade justamente pela diferença de porosidade. O concreto de menor porosidade possui menos caminhos contínuos para o transporte iônico, que faz com que a resistividade elétrica seja maior.

Comparando esse resultado com a RES das amostras expostas ao sulfato de sódio (Figura 54) e magnésio (Figura 55), nota-se que a resistividade medida foi menor para as soluções com sulfatos quando comparado a imersão em água, o que também foi observado por (Medeiros-Junior *et al.* (2019). Koleva *et al.* (2008) associa a redução nos valores de resistividade pela quantidade de íons na solução de poros que facilitam movimentação das cargas. Além disso, as fissuras presentes, como foi observado nas amostras de sulfato de sódio (Figura 49), também podem reduzir a resistividade.

Outro ponto que também pode-se observar é que há pequenas mudanças no valor de resistividade ao longo do tempo nas amostras expostas aos sulfatos, assim como ocorreu no estudo de Ortega *et al.* (2017) com cimento tipo CEM I (equivalente ao cimento brasileiro CP V). As amostras *Mg 0,35* e *0,32* apresentam uma redução nas primeiras idades, porém o valor apresenta poucas variações no restante do tempo do ensaio.

Figura 54 – Evolução da resistividade elétrica das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio.

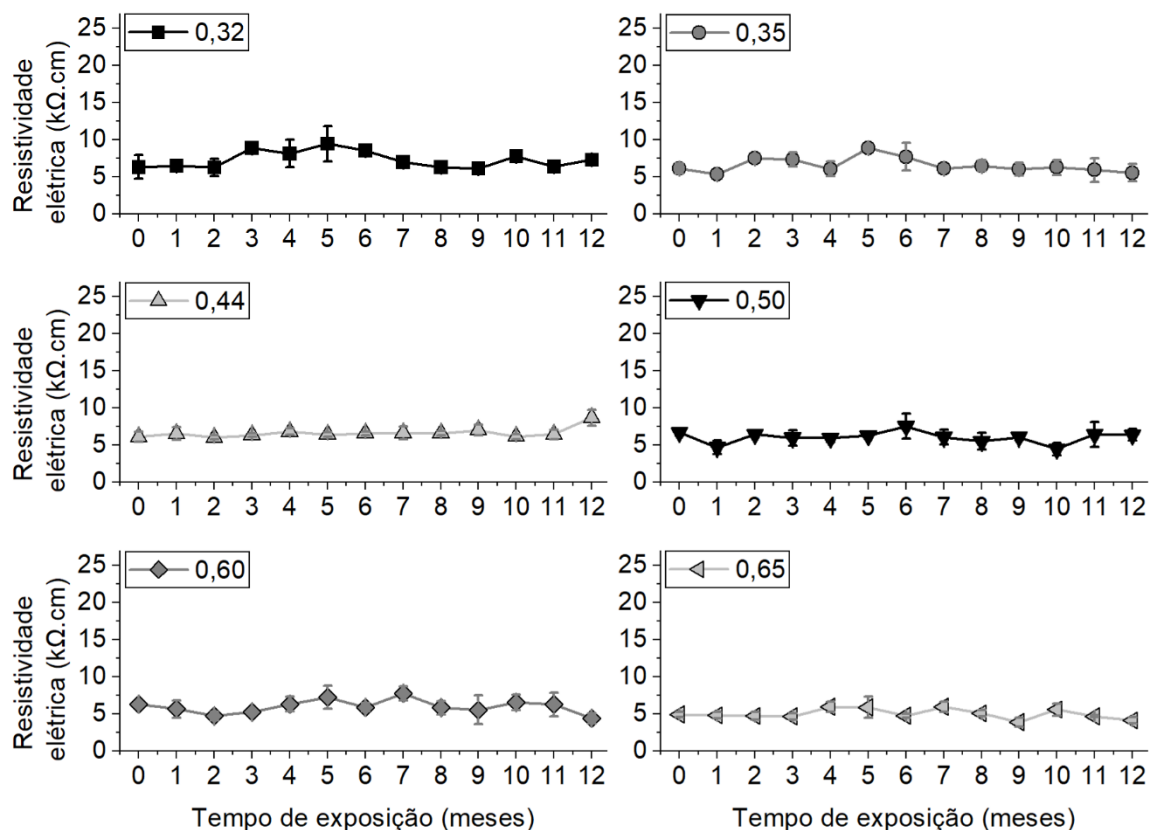
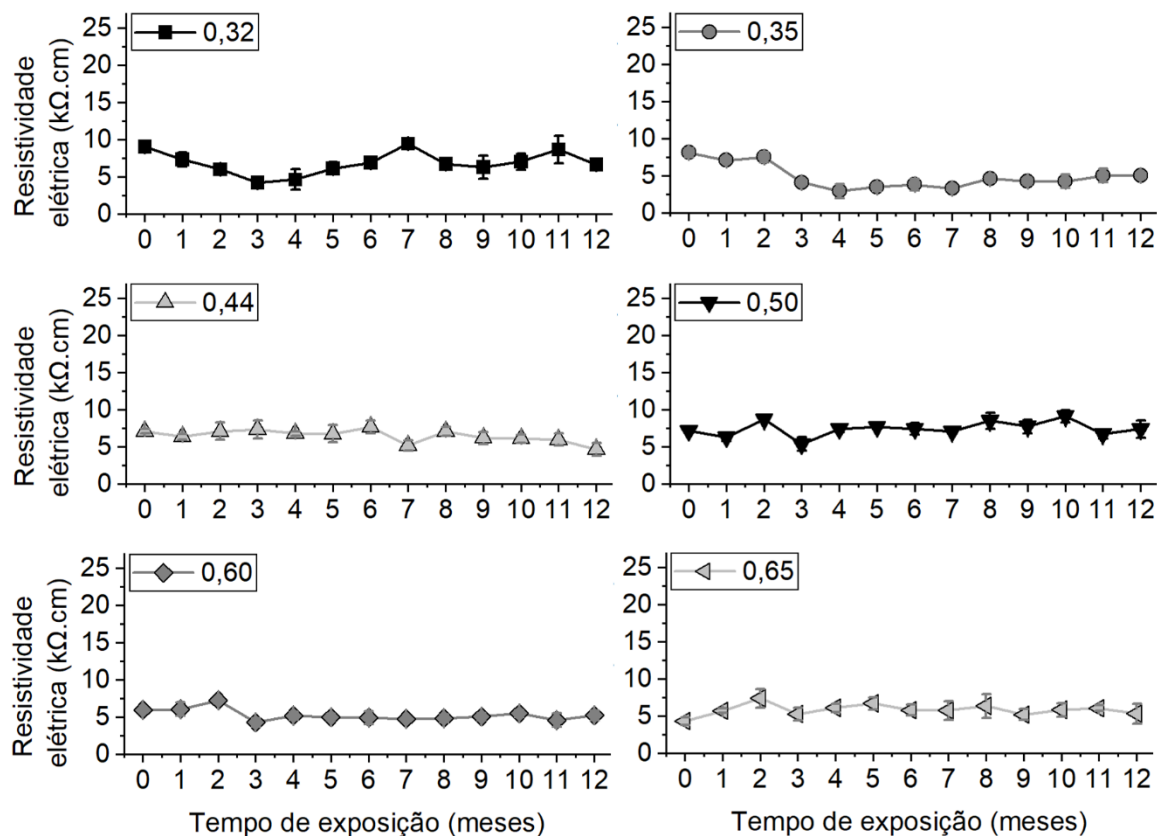


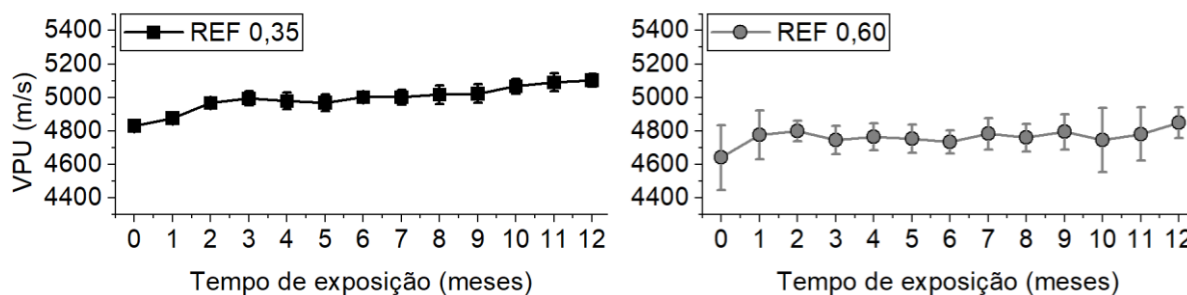
Figura 55 – Evolução da resistividade elétrica das amostras de concreto expostas ao sulfato de magnésio.



Fonte: A autora.

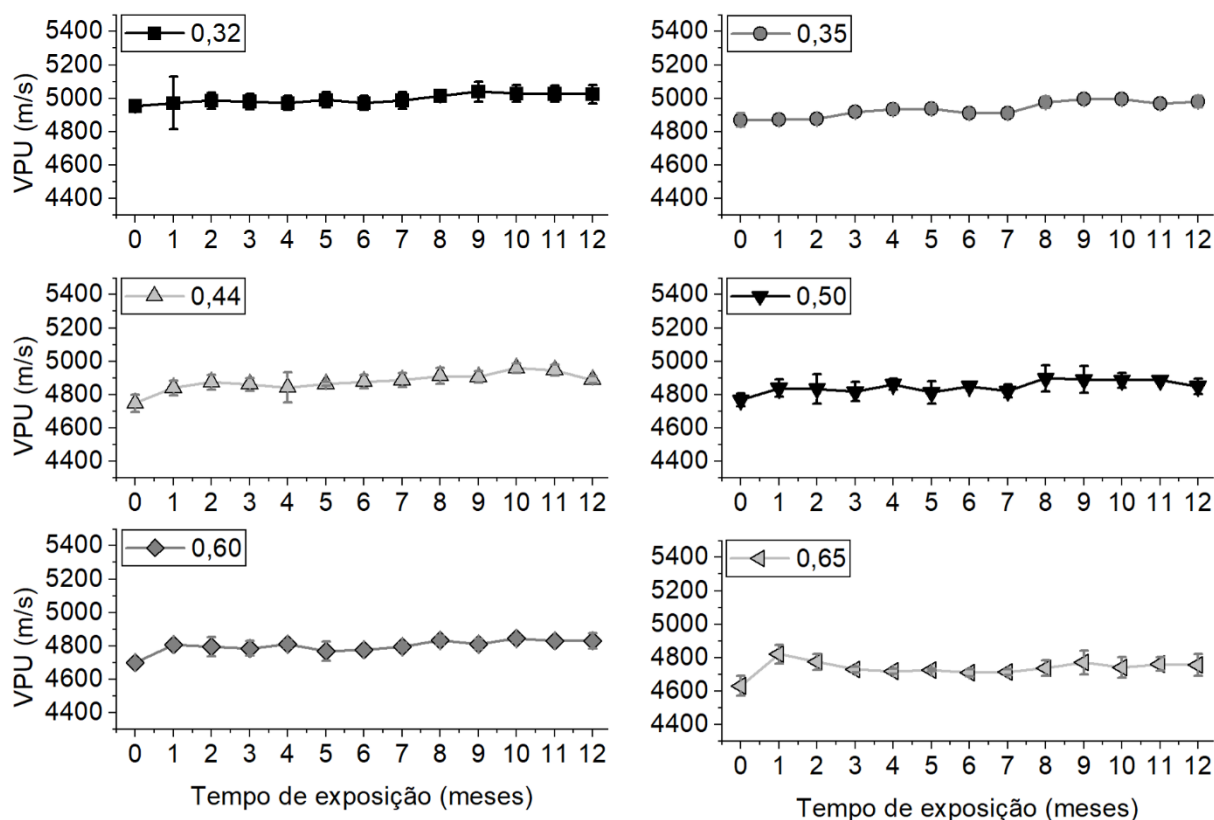
Nos resultados da velocidade do pulso ultrassônico, as amostras de referência, bem como as expostas aos íons sulfatos, também apresentam pouca variação ao longo do tempo, como pode-se ver na Figura 56, Figura 57 e Figura 58. Todos os valores encontrados permitem uma classificação da qualidade do concreto como “Excelente”, de acordo com os valores apresentados na Tabela 17.

Figura 56 – Evolução da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto de referência.



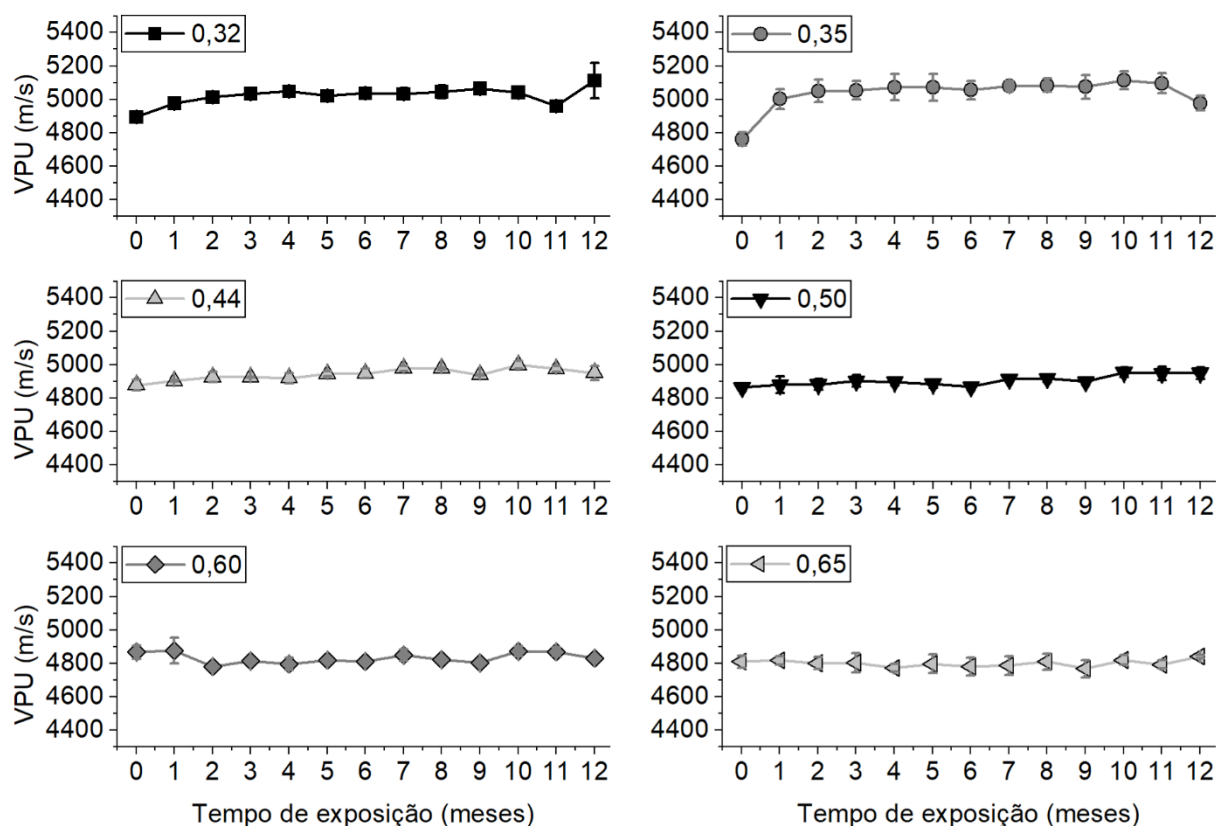
Fonte: A autora.

Figura 57 – Evolução da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio.



Fonte: A autora.

Figura 58 – Evolução da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto expostas ao sulfato de magnésio.



Fonte: A autora.

Tabela 17 - Classificação da qualidade de concretos em função da VPU.

Velocidade da onda ultrassônica VPU (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4500$	Excelente
$3500 < V < 4500$	Ótimo
$3000 < V < 3500$	Bom
$2000 < V < 3000$	Regular
$V < 2000$	Ruim

Fonte: WHITEHURT (1966) *apud* FIGUEIREDO (2005).

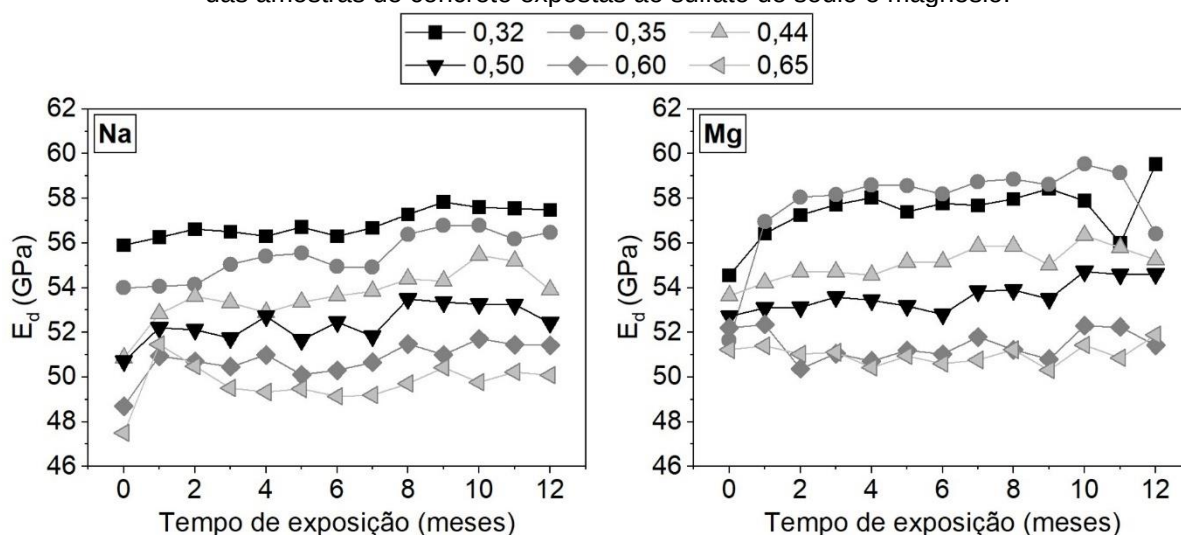
Tinha-se como objetivo determinar a VPU para poder determinar a evolução do dano na amostra pela redução no módulo de elasticidade dinâmico, como propõe Chen, Qian e Song (2016). Os autores, bem como Yang e Luo (2012), observam uma primeira etapa, de aumento nesta propriedade devido ao preenchimento dos poros pelos cristais formados durante o ataque, seguida pela segunda etapa onde módulo diminui, e onde aplica-se a relação de dano. Jiang *et al.* (2014) afirmam ainda que há uma etapa intermediária, de um período de estabilidade no módulo de elasticidade.

Para Chen, Qian e Song (2016), o módulo de elasticidade passa a reduzir a até 100 dias depois do início da imersão. Para Yang e Luo (2012), isso ocorre de 200 a 300 dias após o início do teste, dependendo da relação água/cimento do traço e da

concentração da solução. Os resultados da presente Tese quanto ao módulo de elasticidade dinâmico (Figura 59) confirmam as discussões realizadas de que o ataque se encontra ainda no estágio inicial, pois ainda não foi possível atingir a etapa de uma clara redução no módulo, e consequentemente, não foi possível determinar o dano a partir destes resultados.

Em ambos os tipos de sulfato mostrados na Figura 59, quanto menor a relação água/cimento e maior o consumo de cimento, maior o valor do módulo de elasticidade, pois mais densa é a matriz. Esse resultado também foi observado para soluções de sulfato de sódio e magnésio na pesquisa de (Tanyildizi, 2023).

Figura 59 – Módulo de elasticidade dinâmico determinado a partir da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio e magnésio.



Fonte: A autora.

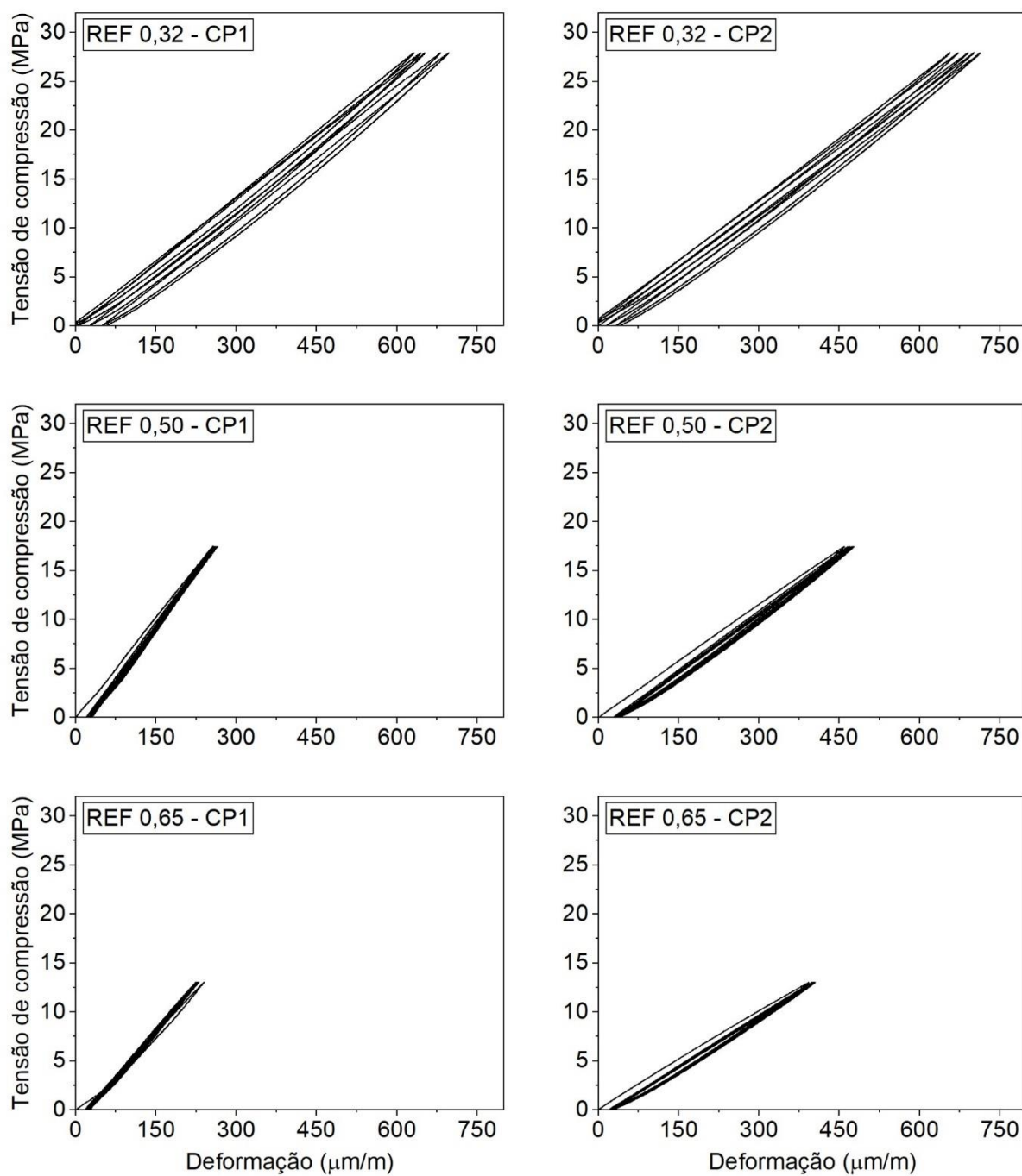
Como alternativa para avaliação de dano, realizou-se também o Teste de Dano da Rigidez (SDT). O ensaio foi realizado aplicando 5 ciclos de carga e descarga com uma tensão de compressão correspondente à 40% da sua resistência aos 28 dias. Os valores utilizados são apresentados na Tabela 18. As curvas de tensão-deformação obtidas para as amostras de referência constam na Figura 60, para sulfato de sódio na Figura 61 e magnésio na Figura 62.

Tabela 18 – Tensão de compressão aplicada nos corpos de prova no ensaio de SDT.

Traço (a/c)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Tensão de compressão aplicada no ensaio de SDT (MPa)
0,32	69,70	27,88
0,50	43,57	17,43
0,65	32,46	12,99

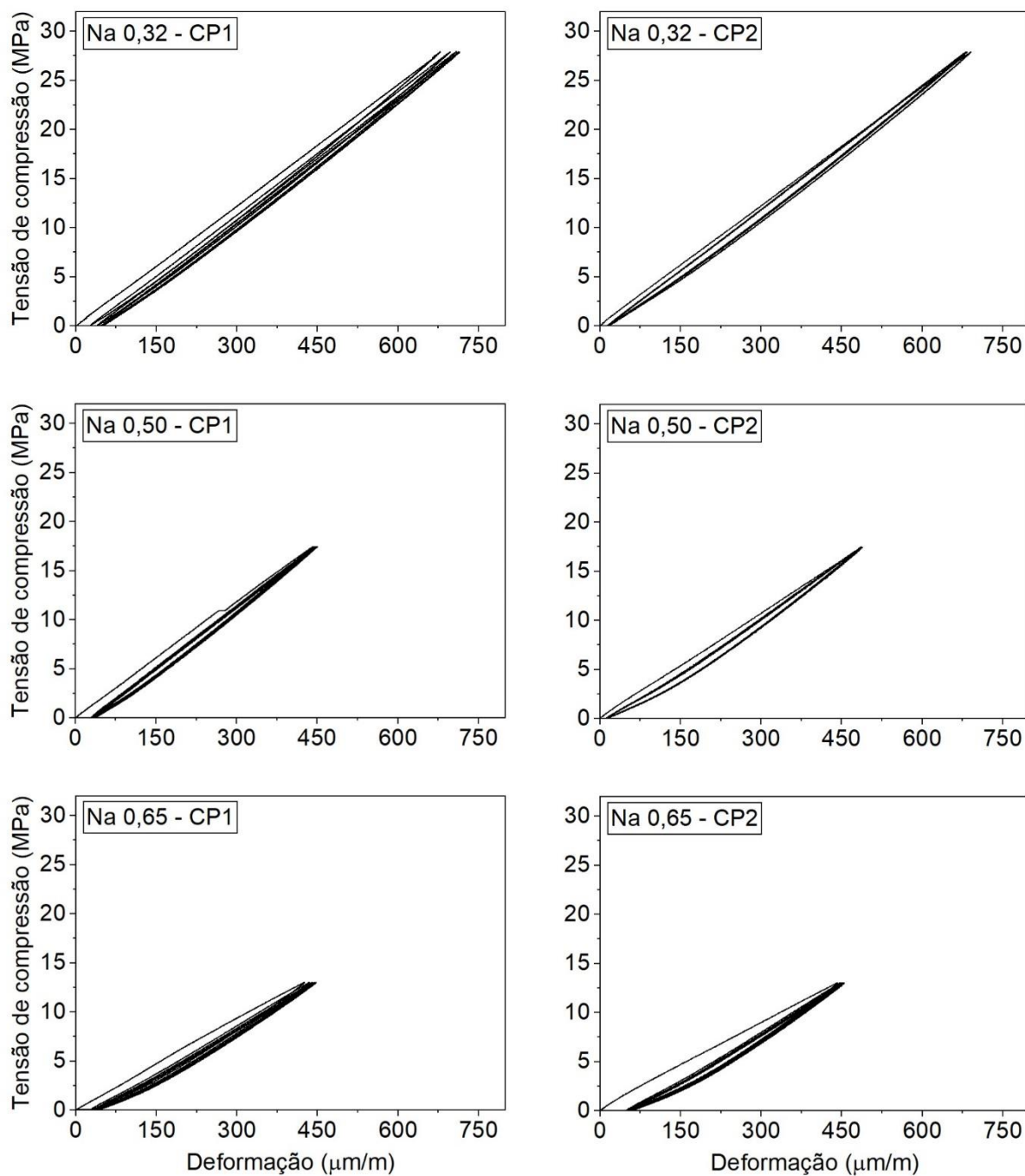
Fonte: A autora.

Figura 60 - Resultados de tensão-deformação obtidos no ensaio de SDT para os corpos de prova de referência.



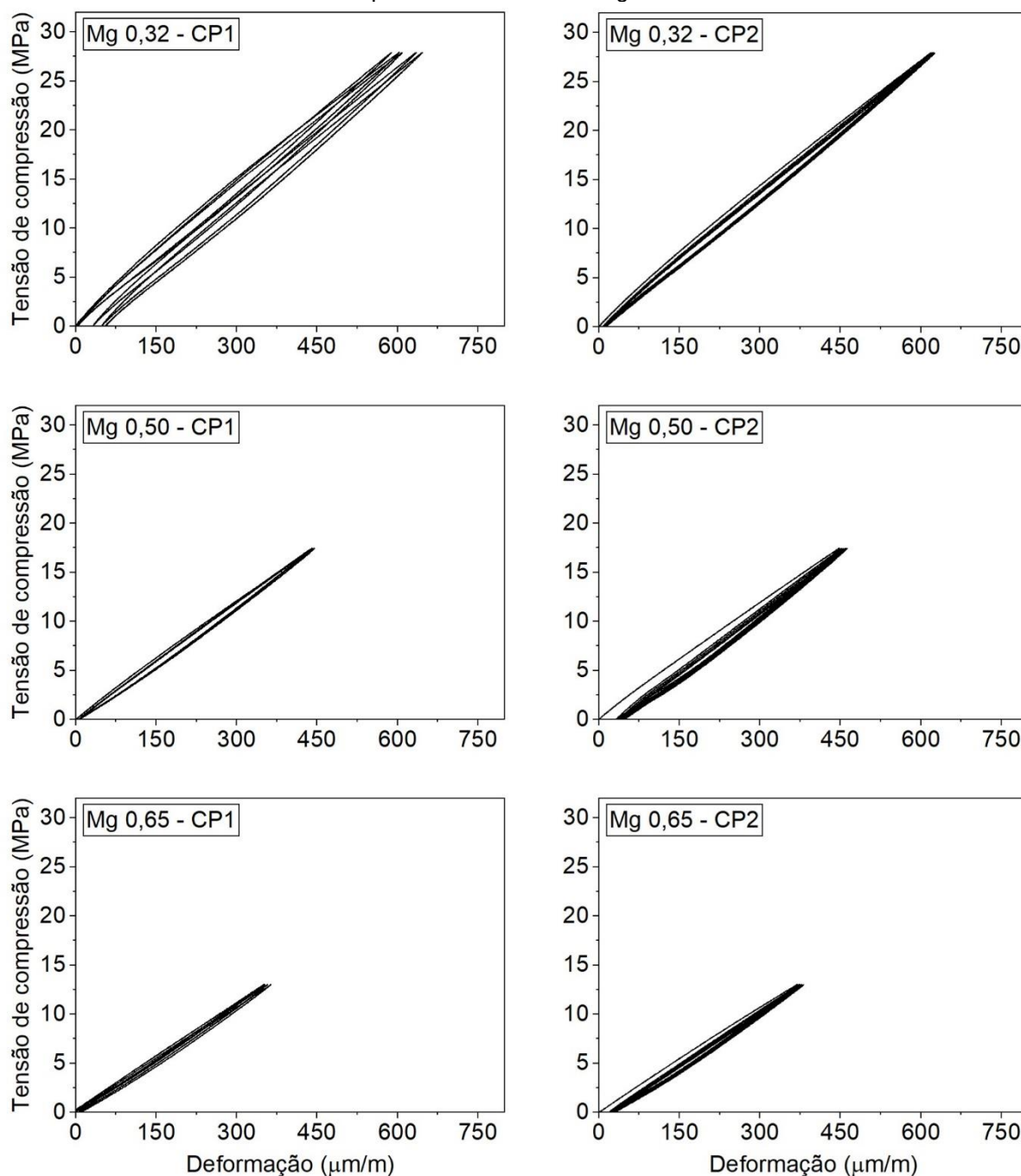
Fonte: A autora.

Figura 61 – Resultados de tensão-deformação obtidos no ensaio de SDT para os corpos de prova expostos ao sulfato de sódio.



Fonte: A autora.

Figura 62 - Resultados de tensão-deformação obtidos no ensaio de SDT para os corpos de prova expostos ao sulfato de magnésio.



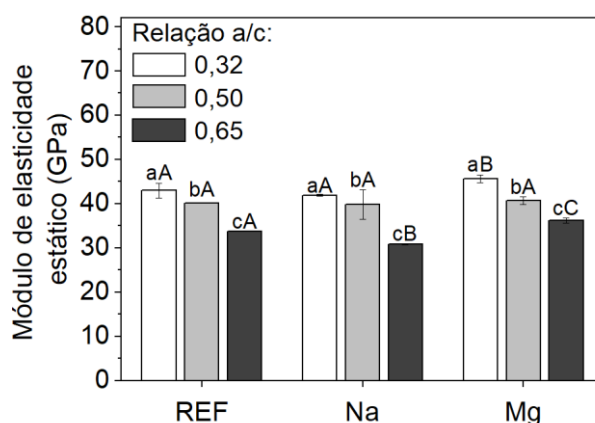
Fonte: A autora.

Os resultados do corpo de prova 1 (CP 1) para o traço *REF 0,50* e *REF 0,65* não foram consideradas nas médias dos valores dos parâmetros avaliados, por apresentarem resultados incoerentes com os demais obtidos. Pode-se observar na que as curvas apresentadas para essas amostras são mais íngremes, trazendo como resultado módulos de elasticidade estáticos elevados de 75 GPa e 61 GPa, respectivamente para os traços citados. Esse fato não ocorreu para as amostras de

sulfato de sódio e magnésio avaliadas, cujos resultados são apresentados na Figura 61 e Figura 62.

Com base nas curvas tensão-deformação, foram determinados os parâmetros de PDI (Índice de Deformação Plástica), SDI (Índice de Dano da Rigidez) e módulo de elasticidade estático, cujos resultados são apresentados na Figura 63 e Figura 64. Quanto ao módulo de elasticidade, nota-se que para os três casos (referência, sulfato de sódio e sulfato de magnésio), quanto maior a relação água/cimento, menor o módulo, o que está coerente com os resultados apresentados anteriormente de resistência à compressão, porosidade e módulo de elasticidade dinâmico. Os traços *Mg 0,32* e *0,65* apresentaram módulo maior que para a mesma água/cimento nas outras situações de exposição, que pode estar associado a densificação causada pela camada de brucita nessas amostras.

Figura 63 – Módulo de elasticidade estático dos corpos de prova de concreto para as diferentes soluções de exposição avaliadas.



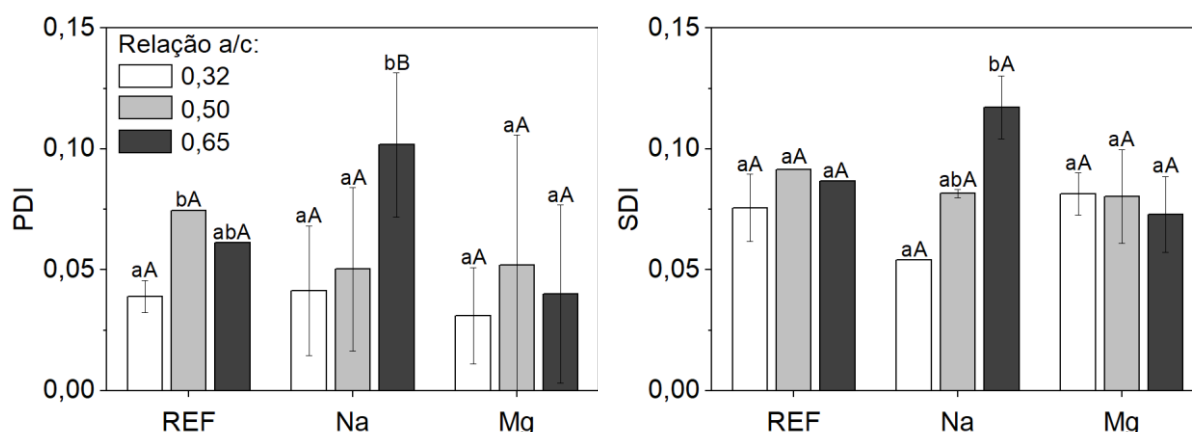
Notas: Barras pertencentes ao mesmo grupo de solução seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Barras pertencentes ao mesmo grupo de relação água/cimento seguidas de mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Fonte: A autora.

Já quanto ao índice de deformação plástica, destaca-se que a variação entre os resultados das duas amostras avaliadas foi grande, o que fica evidente pelas barras de erro apresentadas na Figura 64. Ressalta-se que esse ensaio não estava programado no planejamento inicial da pesquisa, e assim, foi realizado para as amostras disponíveis, tendo assim um número limitado de traços e repetições.

Figura 64 – Índices PDI (Índice de Deformação Plástica) e SDI (Índice de Dano da Rigidez) dos corpos de prova de concreto para as diferentes soluções de exposição avaliadas.



Notas: Barras pertencentes ao mesmo grupo de solução seguidas de mesma letra minúscula não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Barras pertencentes ao mesmo grupo de relação água/cimento seguidas de mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente no Teste de Tukey a um nível de significância de 5%.

Fonte: A autora.

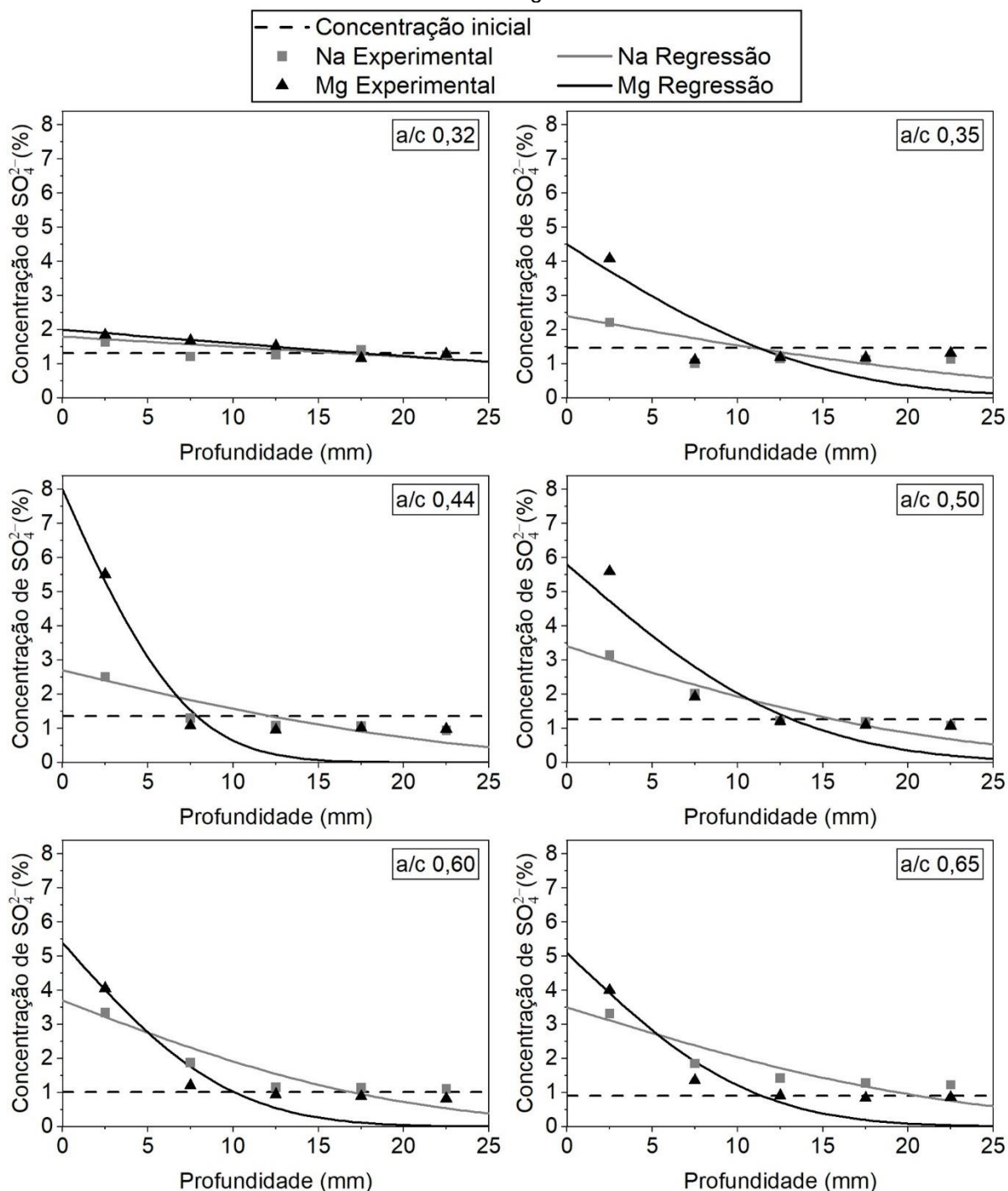
Por outro lado, o índice de dano SDI apresentou um resultado coerente. As amostras de magnésio tiveram um resultado estatisticamente igual às de referência, o que corrobora com o estágio do ataque em que se encontram os corpos de prova. Para as amostras expostas ao sulfato de sódio, é possível observar o aumento do dano com o aumento da relação água/cimento. Essas amostras apresentaram fissuras na análise visual, que tendem a se fechar na carga de compressão e o concreto perde sua capacidade de retornar à forma original, aumentando assim o dano determinado (Giannini *et al.*, 2018; Sanchez *et al.*, 2014). Pesquisas futuras devem ser realizadas com um maior número de amostras e variáveis para validar os resultados obtidos, mas acredita-se que o ensaio se mostrou promissor na avaliação de dano gerado pelo ataque por sulfatos, em especiais o índice de SDI.

Esta pesquisa objetiva também correlacionar o dano da matriz com a profundidade de penetração de sulfatos, bem como com a concentração desses íons, que é apresentado no item 5.2.2 deste trabalho. Além disso, para definição do modelo a ser proposto, é necessário determinar a profundidade atingida pelos íons. Assim, para determinação da profundidade atingida (aquela em que C_x atinge a concentração inicial), bem como da concentração na superfície, realizou-se o ajuste da segunda lei de Fick (Equação (49) apresentada por Crank (1975)) para perfis de sulfato obtidos nos ensaios de FRX das amostras que permaneceram imersas nas soluções de estudo, assim como fez Melara (2021). A Figura 65 apresenta os perfis de sulfato

determinados nos ensaios de FRX, e a Tabela 19 apresenta as profundidades x e concentrações máximas C_s na superfície determinadas a partir da Equação (49).

$$C_x = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ns}t}} \right) \right] \quad (49)$$

Figura 65 – Perfis de sulfato nas amostras de concreto após 12 meses de exposição ao sulfato de sódio e magnésio.



Fonte: A autora.

Tabela 19 – Profundidade de difusão e concentração na superfície dos íons sulfatos.

Tipo de sulfato	Traço (a/c)	x (mm)	C _s (% de SO ₄ ²⁻)
Sulfato de sódio	0,32	16,432	1,8
	0,35	11,074	2,4
	0,44	12,249	2,7
	0,50	16,188	3,4
	0,60	17,722	3,7
	0,65	21,558	3,5
Sulfato de magnésio	0,32	17,902	2,0
	0,35	11,651	4,5
	0,44	8,395	8,0
	0,50	13,937	5,8
	0,60	10,734	5,4
	0,65	12,184	5,1

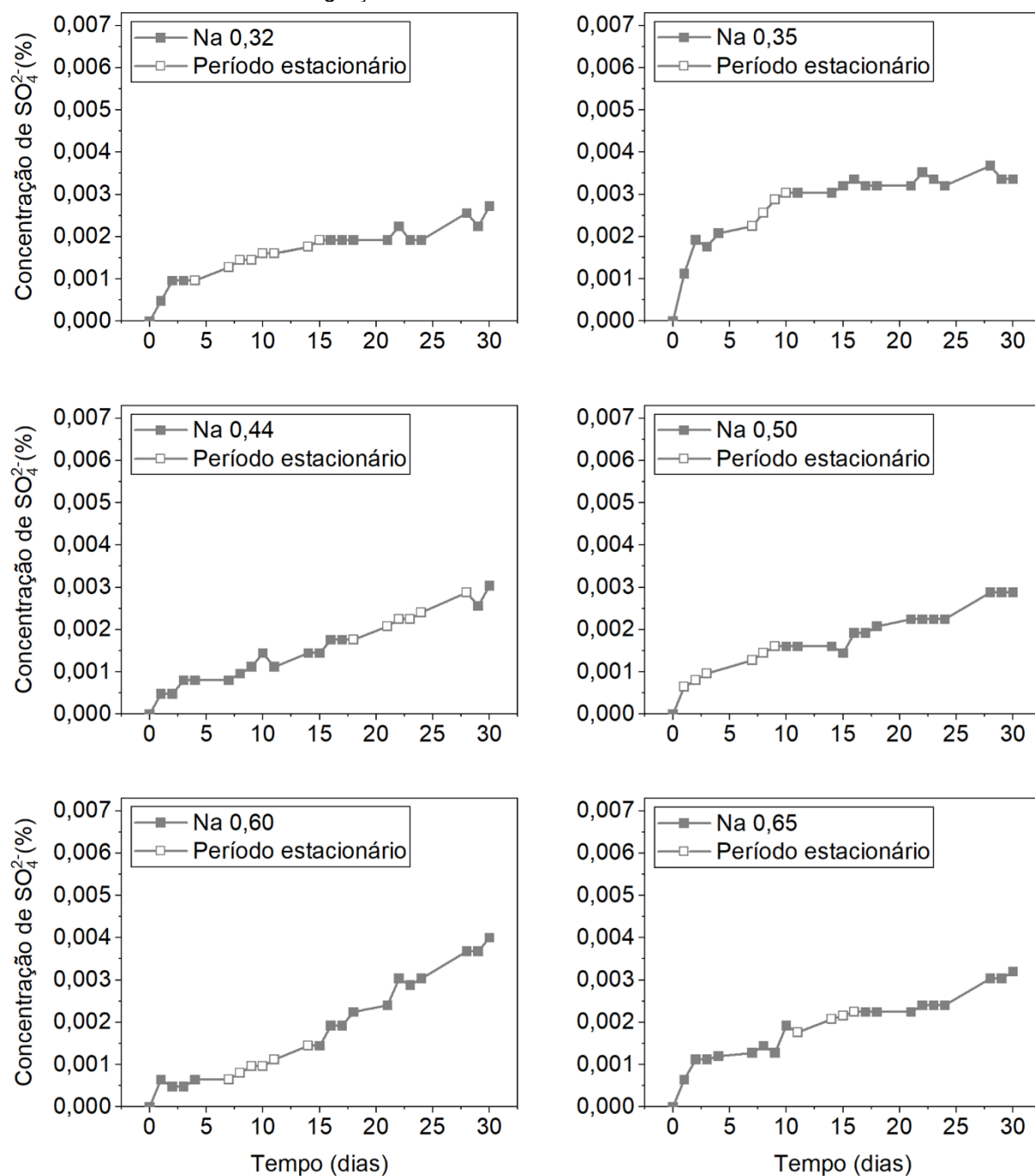
Fonte: A autora.

Com base nos resultados obtidos, pode-se notar que a concentração nas camadas superficiais é maior para as amostras de sulfato de magnésio, porém a profundidade atingida é menor. Tal fato é justificado pela formação de brucita no ataque por sulfato de magnésio, que retarda o ingresso destes íons, fazendo com que fiquem concentrados nas camadas superiores. Já para o sulfato de sódio, além de não ter a formação de brucita, foram identificadas fissuras, que permitem que os íons cheguem a camadas mais internas da matriz.

Para as amostras de sulfato de sódio, é possível notar também que quanto maior a relação água/cimento, maior a concentração de íons na superfície. Associando esse resultado ao ensaio de SDT, nota-se que quanto maior a concentração de íons, maior o dano determinado pelo índice SDI.

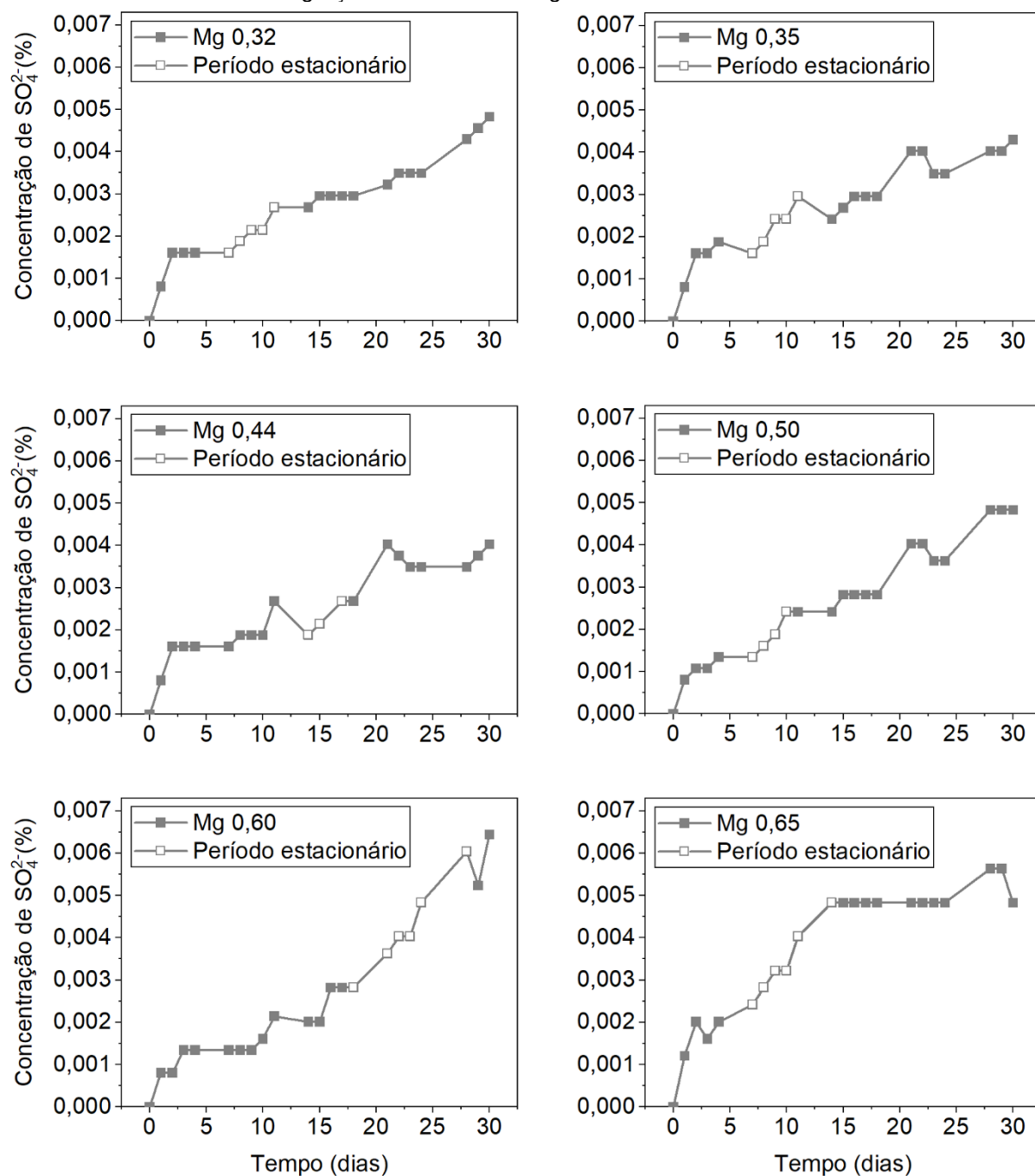
Para avaliação da difusão dos íons sulfatos, é necessário determinar os coeficientes de difusão dos traços de concreto avaliados. Para tanto, realizou-se o ensaio de migração iônica, cujo resultado de variação de íons no compartimento anódico ao longo do tempo é apresentado na Figura 66 e na Figura 67. As Figuras destacam o período estacionário determinado, necessário para o cálculo do coeficiente de difusão estacionário, e a Figura 68 apresenta os perfis de sulfato nas amostras de concreto após ensaio de migração, necessário para determinação do coeficiente de difusão não estacionário. Os resultados dos coeficientes de difusão determinados constam na Tabela 20.

Figura 66 - Evolução da concentração de sulfatos no compartimento anódico em função do tempo, no ensaio de migração de sulfato de sódio em amostras de concreto.



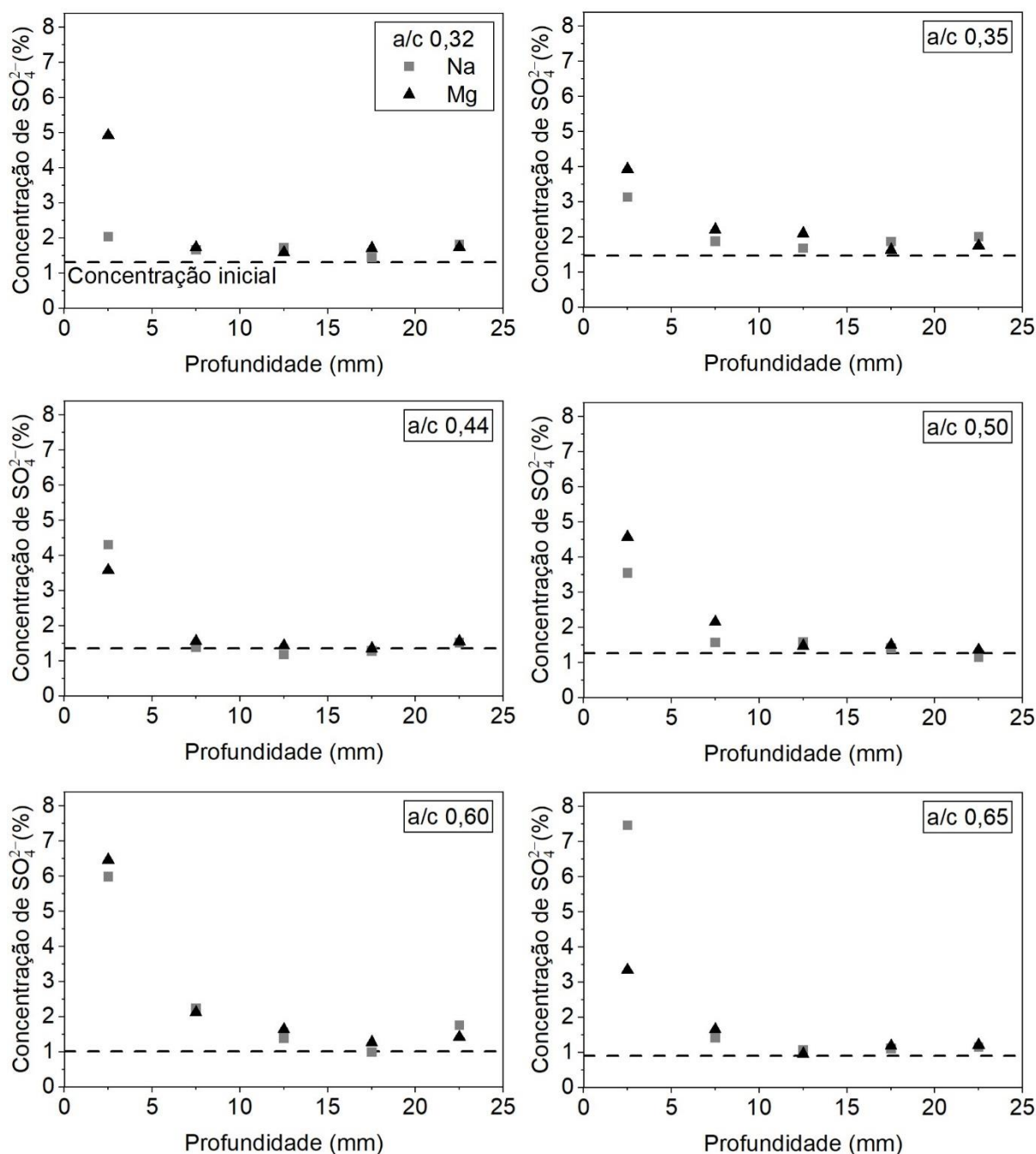
Fonte: A autora.

Figura 67 - Evolução da concentração de sulfatos no compartimento anódico em função do tempo, no ensaio de migração de sulfato de magnésio em amostras de concreto.



Fonte: A autora.

Figura 68 - Perfis de sulfato nas amostras de concreto após ensaio de migração de sulfato de sódio e magnésio.



Fonte: A autora.

Nota-se que os coeficientes de difusão para sulfato de magnésio são maiores que para sulfato de sódio, o que é esperado pelas maiores concentrações obtidas para este sulfato no compartimento anódico, pela sua maior mobilidade iônica, como justificado no item 5.1. De posse destes resultados, é possível determinar os parâmetros para o modelo proposto pela presente Tese, que são apresentados no item 5.2.2 a seguir.

Tabela 20 – Coeficientes de difusão calculados para o ensaio de migração.

Tipo de sulfato	Traço (a/c)	Estacionário (Equação (39))	Não estacionário (Equação (40))
		D_s (m ² /s)	D_{ns} (m ² /s)
Sulfato de sódio	0,32	3,40E-10	12,39E-13
	0,35	14,08E-10	4,81E-13
	0,44	3,09E-10	1,51E-13
	0,50	6,61E-10	2,19E-13
	0,60	6,81E-10	0,72E-13
	0,65	3,42E-10	1,73E-13
Sulfato de magnésio	0,32	3,36E-9	1,62E-13
	0,35	5,53E-9	4,95E-13
	0,44	3,97E-9	3,53E-13
	0,50	5,58E-9	2,25E-13
	0,60	3,03E-9	0,86E-13
	0,65	7,17E-9	0,43E-13

Fonte: A autora.

5.2.2 Parâmetros do modelo

- Fator idade (q)

O fator idade representa a variação da resistividade elétrica superficial ao longo do tempo. Para determinação do fator idade q , realizou-se uma regressão não linear do tipo $y=a.x^b$ da Equação (42) onde y representa os três valores medidos de resistividade na idade t_2 , a foi fixado como resistividade média inicial após 28 dias de cura ρ_0 (também chamada de resistividade efetiva), x é a razão entre o tempo t_2 e t_0 , em dias, e b representa o fator idade determinado na regressão. Para este cálculo, o tempo t_0 foi considerado igual a 28 dias. O valor médio das resistividades nas idades avaliadas ρ_2 podem ser vistos na Figura 54 e na Figura 55. A Tabela 21 apresenta os valores da resistividade inicial utilizada em cada regressão, bem como o valor do fator idade q determinado para as diferentes situações analisadas.

Com base nesses dados, é possível elaborar a Equação (42) para cada traço avaliado, como exemplifica a Equação (50) para o traço Na 0,32. A Figura 69 e Figura 70 mostram os pontos experimentais e as regressões determinadas para os diferentes traços avaliados, ressaltando a tendência quase linear na evolução da resistividade elétrica, o que era esperado já que, como discutido anteriormente, quase não houve variação da RES ao longo do tempo para os traços expostos aos sulfatos, possivelmente devido ao tipo de cimento utilizado (CP V).

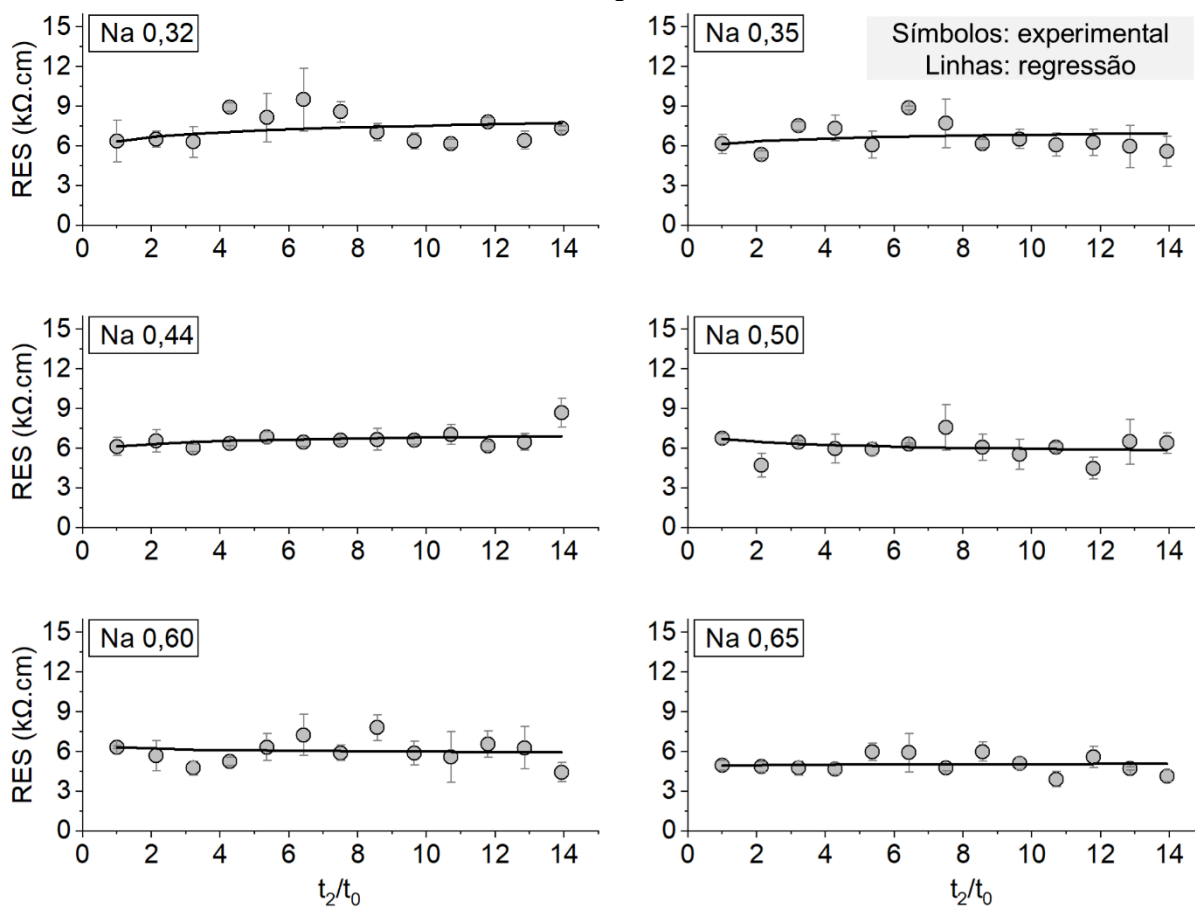
Tabela 21 – Valores da resistividade inicial e do fator idade para os diferentes traços testados.

Tipo de sulfato	Traço (a/c)	RES inicial ρ_0 (k Ω .cm)	Fator idade q	Erro padrão S
Sulfato de sódio	0,32	6,3567	0,0742	1,49
	0,35	6,1492	0,0474	1,23
	0,44	6,1383	0,0455	0,79
	0,50	6,7390	-0,0522	1,14
	0,60	6,3349	-0,0241	1,28
	0,65	4,9478	0,0090	0,86
Sulfato de magnésio	0,32	9,0873	-0,1401	1,81
	0,35	8,1371	-0,1530	1,47
	0,44	7,1104	-0,0526	1,03
	0,50	7,1868	0,0247	1,13
	0,60	5,9854	-0,0725	0,81
	0,65	4,3689	0,1405	1,16

Fonte: A autora.

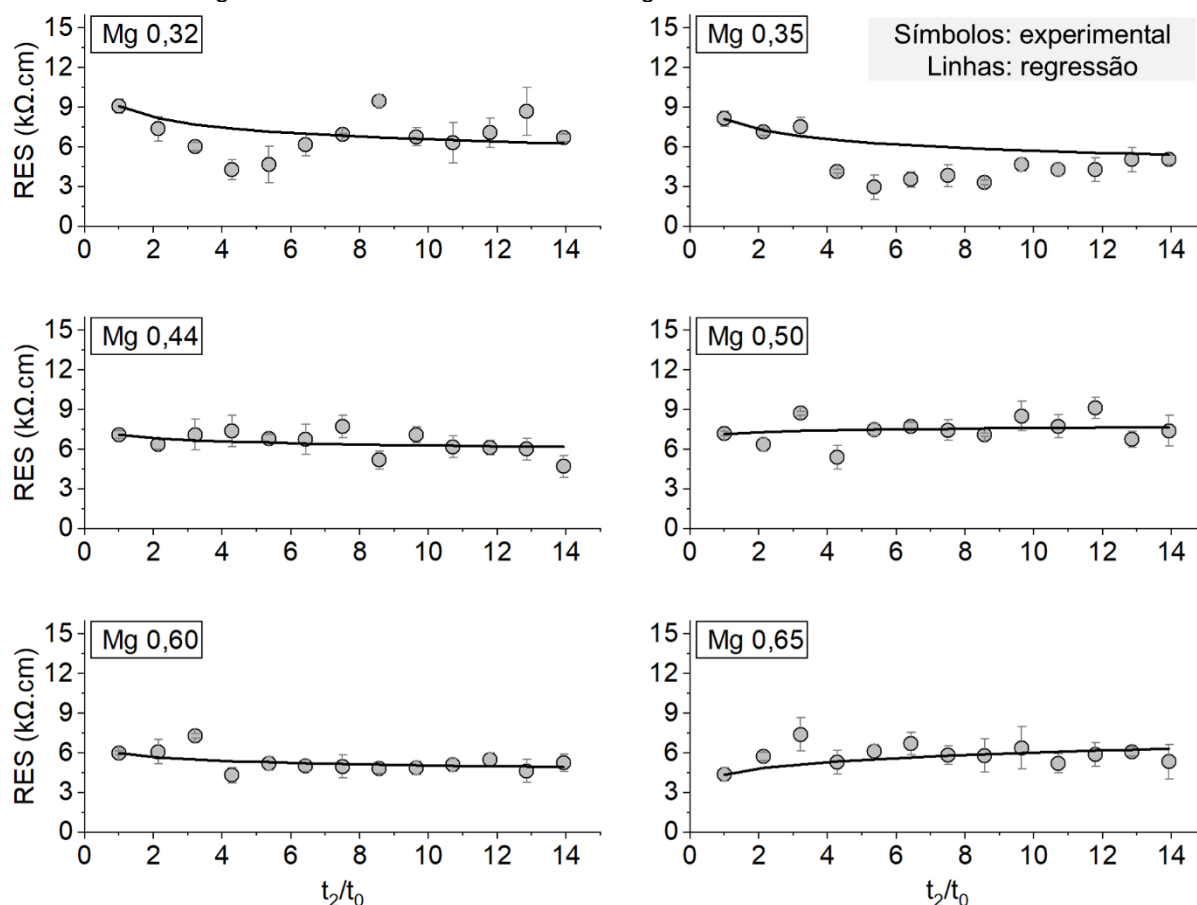
$$\rho_2 = 6,3567 \cdot \left(\frac{t_2}{t_0}\right)^{0,0742} \quad (50)$$

Figura 69 - Evolução da resistividade elétrica para as amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio determinada com base na regressão não linear do fator idade.



Fonte: A autora.

Figura 70 - Evolução da resistividade elétrica para as amostras de concreto expostas ao sulfato de magnésio determinada com base na regressão não linear do fator idade.



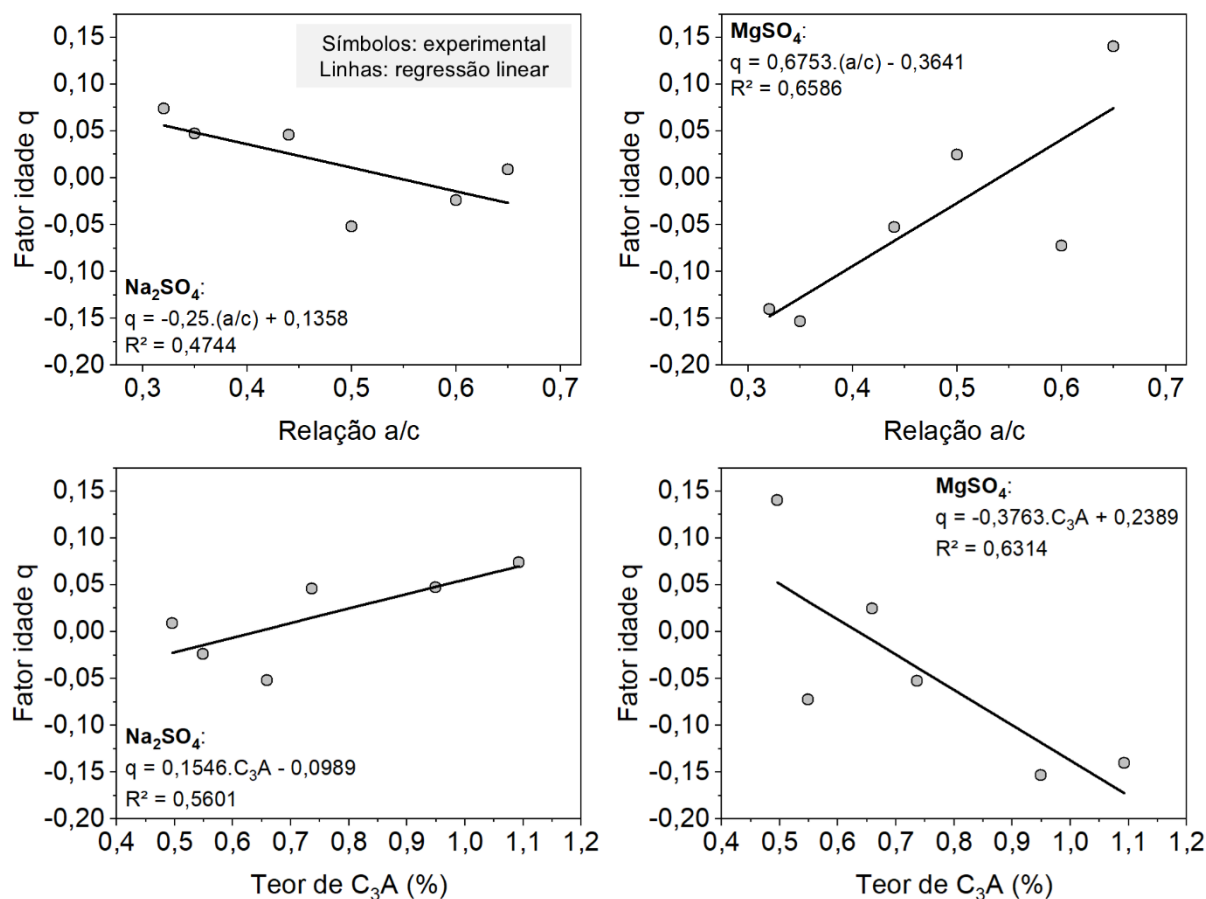
Fonte: A autora.

Os valores dos fatores idades obtidos, apresentados na Tabela 21, foram então correlacionados com a respectiva relação água/cimento e teor de C_3A de cada traço, para entender como as propriedades da mistura influenciaram no fator que explica a variação da RES ao longo do tempo em situações de sulfatos. A Figura 71 apresenta as correlações, bem como as regressões lineares do tipo $y=a.x+b$ que descrevem a relação entre os valores.

Como a relação a/c e o teor de C_3A dos traços são inversamente proporcionais (Tabela 16), as regressões obtidas seguem essa mesma tendência. Os valores dos R^2 obtidos variaram de 0,4744 a 0,6586. No caso do sulfato de sódio, quanto maior a a/c , menor o fator idade. Isso demonstra que, quanto maior a quantidade de água e menor o conteúdo de aluminatos, menor foi a variação da RES ao longo do tempo. Já para o sulfato de magnésio, o comportamento foi o inverso, mostrando que o cátion associado tem impacto nas relações obtidas. Para o sulfato de magnésio, a relação água/cimento apresentou uma relação diretamente proporcional ao fator idade, ou

seja, quanto maior a quantidade de água e menor o conteúdo de aluminatos, maior foi a variação da RES ao longo do tempo.

Figura 71 – Correlação linear obtida entre o fator idade e a relação água/cimento e teor de C_3A .



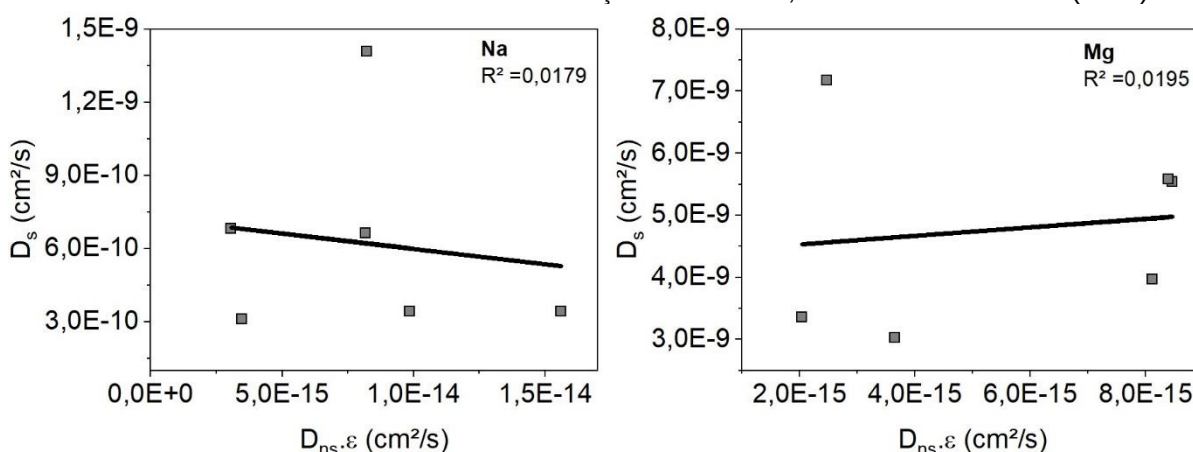
Fonte: A autora.

Outro ponto que se pode observar na Figura 71 é que, para o sulfato de magnésio, há uma amplitude maior nos valores do fator idade, indicando maior variação na resistividade ao longo do tempo que para o sulfato de sódio. Tal fator pode estar associado ao fato das medidas de RES serem realizadas na camada superior, que densificada ao longo do tempo pela presença de brucita, leva a um maior valor de resistividade. Já no sulfato de sódio, apesar dos compostos formados no ataque refinarem os poros, identificou-se a presença de fissuras, que podem ter contribuído ao fato da RES ter uma pequena variação com o tempo.

- Fator de reação dos sulfatos (r_s)

De acordo com Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014), o fator de reação corresponde à uma relação linear obtida pelo quociente entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente das amostras. Para homogeneizar as unidades dos coeficientes, as autoras multiplicam o denominador (o coeficiente de difusão aparente) pela porosidade ε (%) da matriz. Seguindo então a proposta de Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014), a Figura 72 apresenta a relação entre o coeficiente $D_s \times D_{ns} \cdot \varepsilon$, e a Tabela 22 apresenta os valores dos fatores reação determinados. Como pode-se observar, não foi possível estabelecer uma relação linear entre os dados.

Figura 72 – Correlação entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente para os diferentes traços testados determinados de acordo com a relação de Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014).



Fonte: A autora.

Tabela 22 – Valores do fator de reação de sulfatos para os diferentes traços testados determinados de acordo com a relação de Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014) e com a nova relação proposta.

Tipo de sulfato	Traço (a/c)	Fator r_s	Fator r_s
		Equação (41) Andrade, D'Andrea e Rebolledo	Equação (51) Nova proposta
Sulfato de sódio	0,32	2,18E+04	3,5
	0,35	1,71E+05	50,1
	0,44	8,90E+04	47,1
	0,50	8,08E+04	113,0
	0,60	2,23E+05	403,9
	0,65	3,47E+04	112,4
Sulfato de magnésio	0,32	1,65E+06	261,4
	0,35	6,54E+05	191,2
	0,44	4,89E+05	258,5
	0,50	6,65E+05	929,7
	0,60	8,30E+05	1506,0
	0,65	2,90E+06	9393,7

Fonte: A autora.

Para as autoras, os coeficientes de difusão estavam em ordens de grandeza diferentes, sendo os coeficientes de difusão aparentes maiores que os efetivos, como pode-se ver na Tabela 23. Já no presente trabalho, os coeficientes também estão em ordem de grandezas diferentes, porém, os coeficientes de difusão efetivos é que são maiores (Tabela 20), sendo assim, eles é que deveriam ter sua unidade homogeneizada, multiplicando seu valor pela porosidade da matriz. Destaca-se que é coerente que os dados do coeficiente de difusão efetivo sejam maiores, já que ele não considera a fixação dos íons, como acontece no coeficiente de difusão aparente, que considera que gradiente de concentração varia com o tempo, por um acúmulo ou esgotamento da substância que está se difundindo (Callister JR; Rethwish, 2012).

Tabela 23 – Valores dos coeficientes de difusão para o cimento tipo I dos traços avaliados por Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014).

Denominação do traço	D_s x E-08 (cm²/s)	D_{ns} x E-08 (cm²/s)
I-02	1,53	8,73
I-03	2,22	4,82
I-05	2,98	43,38
I-06	1,30	17,87
I-07	0,97	11,45
I-10	1,30	10,10
I-11	1,62	21,00
I-13	1,73	6,24
I-17	1,05	9,49
I-19	0,87	9,00

Fonte: Adaptado de: Andrade; D'Andrea; Rebolledo, 2014.

Desta forma, uma nova proposta é feita para determinação do fator de reação de sulfatos, apresentada na Equação (51). A Figura 73 apresenta a relação entre o coeficiente $D_s \cdot \varepsilon$ x D_{ns} , que agora segue uma relação linear. Destaca-se que para o cimento tipo CEM I, o R² obtido nessa relação para Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014) foi de 0,55 (Figura 74).

$$r_s = \frac{D_s \cdot \varepsilon}{D_{ns}} \quad (51)$$

Onde:

D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário (cm²/s);

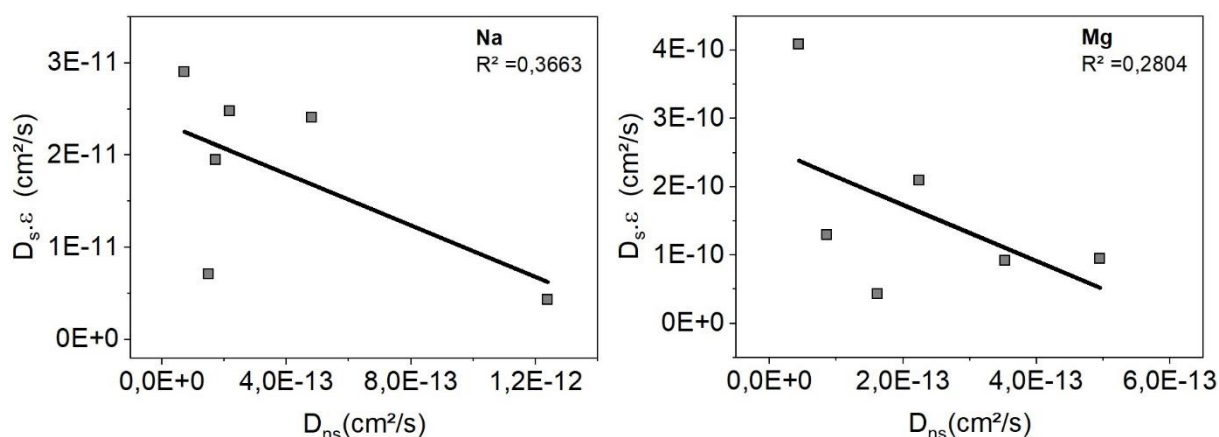
D_{ns} = coeficiente de difusão no estado não estacionário (cm²/s);

ε = porosidade (%).

Os fatores de reação foram então correlacionados com diferentes propriedades dos traços, como a relação a/c, o teor de C₃A e a resistividade elétrica

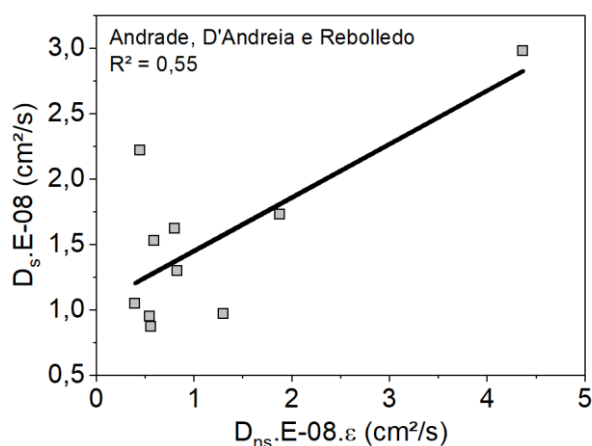
efetiva. A relação foi realizada tanto para os fatores r_s determinados conforme a relação de Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014) (Figura 75), quanto para os fatores r_s determinados conforme a proposta dessa Tese (Figura 76).

Figura 73 - Correlação entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente para os diferentes traços testados determinados de acordo com a nova relação proposta.



Fonte: A autora.

Figura 74 - Correlação entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente para os diferentes traços testados do cimento tipo I avaliados por Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014).



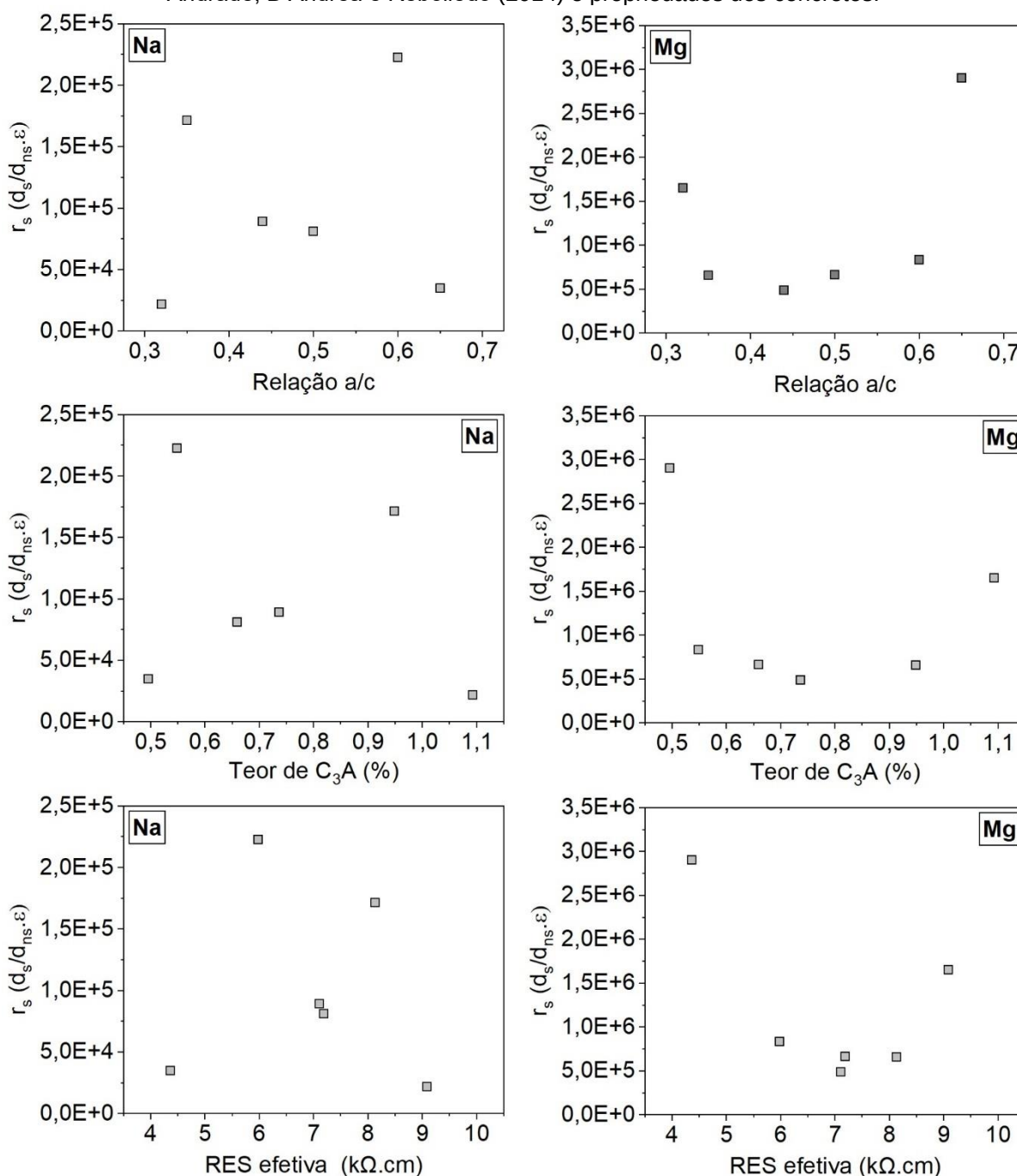
Fonte: Elaborado com os dados de: Andrade; D'Andrea; Rebolledo, 2014.

Novamente, seguindo a proposta original, não foi possível correlacionar as propriedades da matriz com os valores do fator de reação. Medeiros-Junior (2014) obteve uma boa correlação do fator de reação de cloretos com a relação água/cimento bem como com a resistividade elétrica (Figura 77 e Figura 78, respectivamente). Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014) afirmam que esse valor para cloretos está relacionado com a relação a/c e o teor de aluminados.

Assim, relacionando as propriedades da matriz com os valores de fatores reação de sulfatos obtidos pela relação proposta na Equação (51), foi possível obter

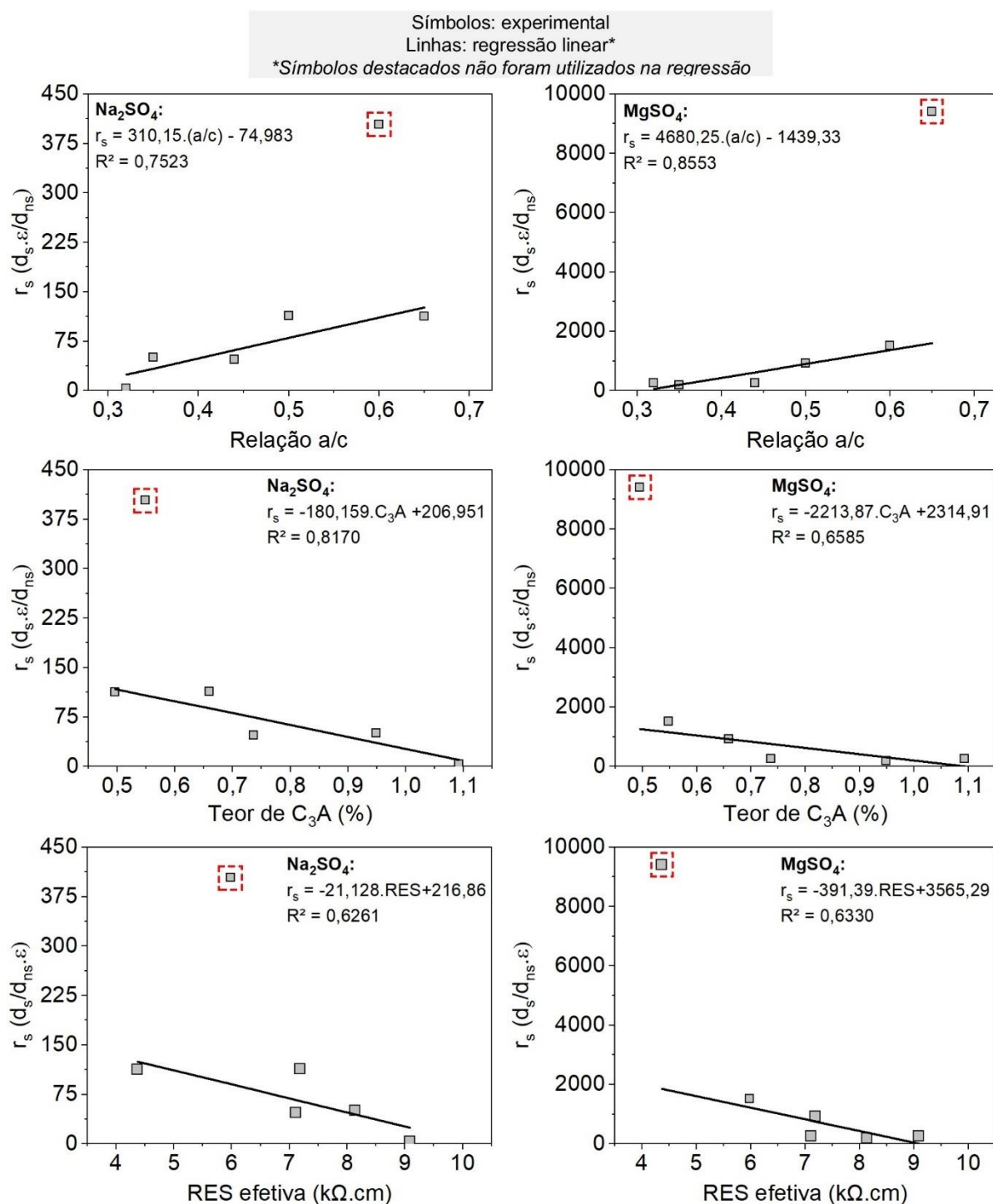
uma relação linear entre o fator r_s e a relação a/c, teor de C₃A e RES efetiva, com valores de R^2 variando entre 0,62 e 0,86. Esses valores reforçam que a relação proposta para determinação do fator de reação representa melhor esse parâmetro para íons sulfatos. Porém, como pode-se notar na Figura 76, os valores para os traços Na 0,60 e Mg 0,65 não foram considerados nas regressões (valores destacados na Tabela 22), por terem sido considerados espúrios dentro dessa análise.

Figura 75 – Correlação entre o fator de reação de sulfatos determinado de acordo com a relação de Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014) e propriedades dos concretos.



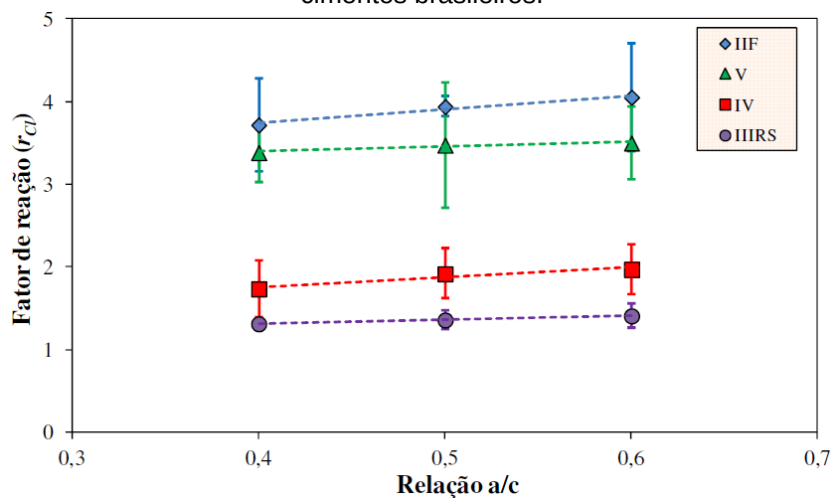
Fonte: A autora.

Figura 76 – Correlação entre o fator de reação de sulfatos determinado de acordo com a nova relação proposta e propriedades do concreto.



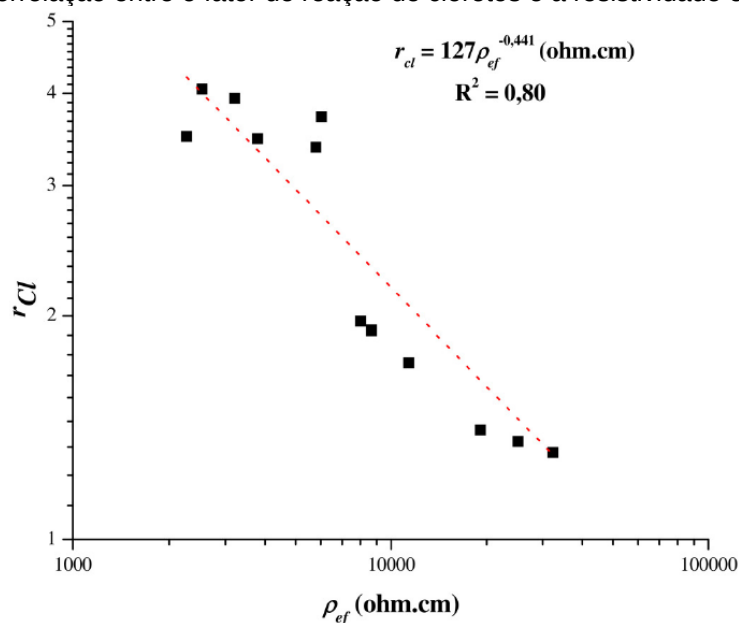
Fonte: A autora.

Figura 77 – Correlação entre o fator de reação de cloretos e a relação a/c para diferentes tipos de cimentos brasileiros.



Fonte: Medeiros-Junior, 2014.

Figura 78 - Correlação entre o fator de reação de cloretos e a resistividade elétrica efetiva.



Fonte: Medeiros-Junior, 2014.

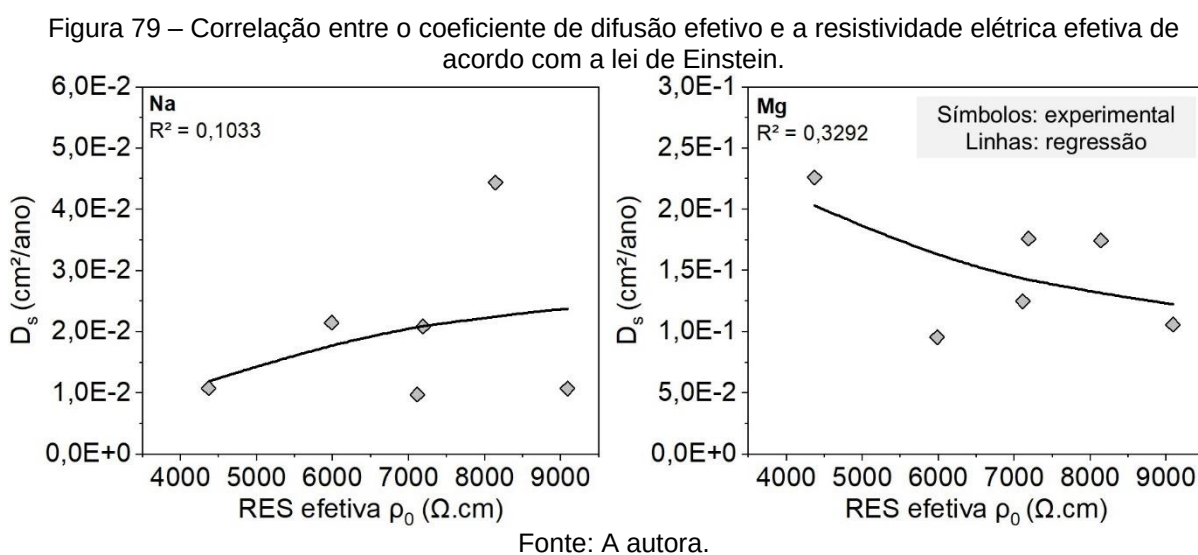
De acordo com Medeiros-Junior (2014), o fator de reação é uma medida relativa relacionada a disponibilidade de fluxo de íons que penetra o concreto. Assim, os valores do fator de reação obtidos pela nova proposta seguem o comportamento esperado, já que o fator diminui com o aumento da resistividade, que representa a menor facilidade de passagem de fluxo. No mesmo sentido, quanto maior a relação água/cimento, maior o fluxo, e assim, maior deve ser o fator de reação.

Também pela discussão apresentada por Medeiros-Junior (2014), quanto maior o teor de C_3A , maior o fator de reação, já que maior é a capacidade de fixação dos íons cloretos. O autor obteve fatores reações maiores para o cimento CP V e CP

II (que possui cerca de 10% de fíler calcário) que para os cimentos com maiores quantidades de adições, como o CP III RS e o CP IV (Figura 77). Já para essa pesquisa, o aumento do teor de C_3A dos traços é associado a redução da relação água/cimento, que reduz o fluxo de sulfatos, e consequentemente, o fator de reação. Assim, para os traços adotados nesta pesquisa, a relação água/cimento do traço apresenta então uma correlação mais coerente com o fator de reação que o teor de aluminatos.

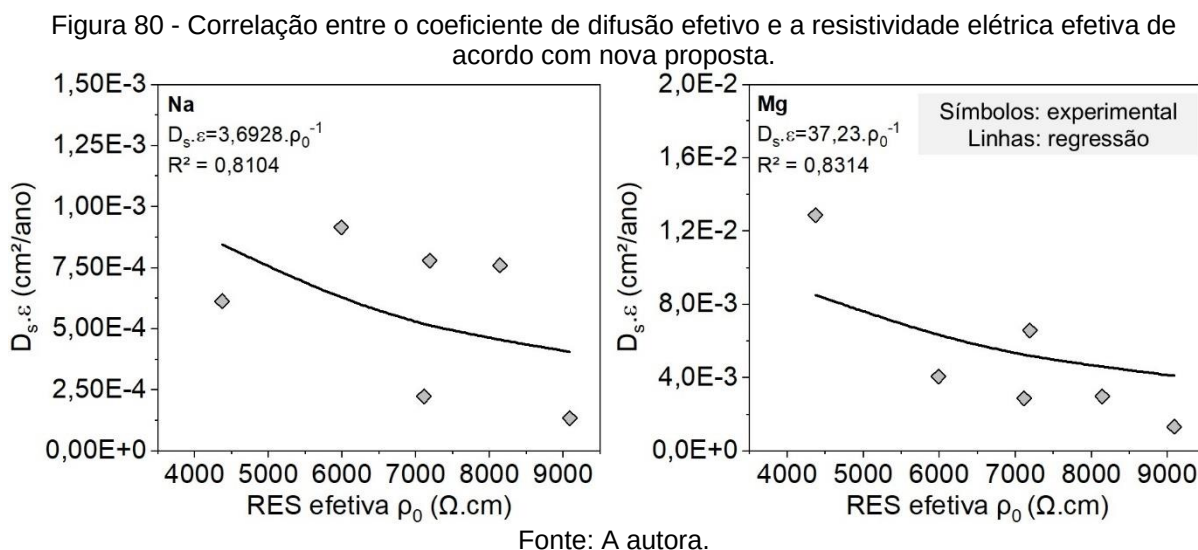
- Fator relativo à agressividade ambiental (k_s)

Para aplicação do modelo proposto, é necessário definir também o fator relativo à agressividade ambiental (k_s), que depende da concentração externa de agentes agressivos. Andrade, C. (2004) afirma que a resistividade elétrica está relacionada ao coeficiente de difusão efetivo da matriz de acordo com o que descreve a lei de Einstein em sua forma simplificada para concretos. Assim, realizou-se uma regressão do tipo $y=a.x^{-1}$ da Equação (43) onde y representa o coeficiente de difusão efetivo, a é a constante k_s , e x a resistividade elétrica efetiva, e o resultado obtido é apresentado na Figura 79.



As regressões realizadas apresentaram valores de R^2 de 0,1033 e 0,3292. Melara *et al.* (2022) também não obtiveram um bom ajuste dos dados experimentais com a lei de Einstein, com um R^2 de 0,34 em seu estudo de sulfatos, e Andrade, D'Andrea e Rebolledo (2014) obtiveram um coeficiente de correlação de 0,38 em

pesquisa de cloretos. Buscando melhorar a correlação obtida, a proposta feita na determinação no fator de reação, de homogeneizar a unidade do coeficiente de difusão efetivo multiplicando esse valor pela porosidade da matriz, foi também aplicada na regressão $y=a.x^{-1}$ realizada, onde agora y representa o produto $D_s.\varepsilon$. O resultado obtido é mostrado na Figura 80.



Como pode-se observar, apesar ainda da dispersão dos dados, foi possível dessa forma se determinar uma correlação entre as propriedades com ajustes de 0,8104 e 0,8314, indicando uma forte correlação entre os dados da forma proposta, e reforçando a proposição da presente Tese em trabalhar com produto obtido entre coeficiente de difusão efetivo e porosidade.

Melara *et al.* (2022) obtém o valor de k_s de 106161,5 cm³.Ω/ano no ajuste da lei de Einstein da curva de coeficiente de difusão versus resistividade elétrica (

Figura 22). A condição de exposição adotada foram ciclos de molhagem em solução de sulfato de sódio com concentração de 10% (2 dias) e secagem (5 dias) à 40°C. Porém, os valores dos coeficientes de difusão utilizados na regressão dos autores referem-se ao coeficiente aparente, e não efetivo, como sugere Andrade, C. (2004).

D'Andréa (2010) determina o valor do fator k_{cl} para estruturas reais de até 28 anos de idade, ou ensaios em escala mantidos em situações reais de exposição, definindo o valor deste parâmetro para diferentes situações de exposição. Para tanto, a autora aplica o modelo de Andrade, C. (2004) para os valores obtidos, e isola da equação o valor de k_{cl} . Para ensaios laboratoriais em uma concentração de 1 M de

cloretos, um valor de $12 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \Omega/\text{ano}$ é considerado (Andrade; D'Andrea; Rebolledo, 2014).

Como o fator é relativo à agressividade ambiental, o mesmo valor de k_s deve representar a agressividade de cada tipo de sulfato, já que todos os traços foram submetidos à mesma concentração de solução. Assim, não é possível fazer a determinação como D'Andréa (2010), que tinha dados para diferentes condições de agressividade. Os valores determinados para essa pesquisa são de $3,6928 \text{ cm}^3 \cdot \Omega/\text{ano}$ para sulfato de sódio, e $37,23 \text{ cm}^3 \cdot \Omega/\text{ano}$ para sulfato de magnésio, lembrando que as concentrações utilizadas foram de 10% de Na_2SO_4 e de 17,35% de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (onde ambas correspondem a 6,763% de SO_4^{2-}).

- Fator dano (D)

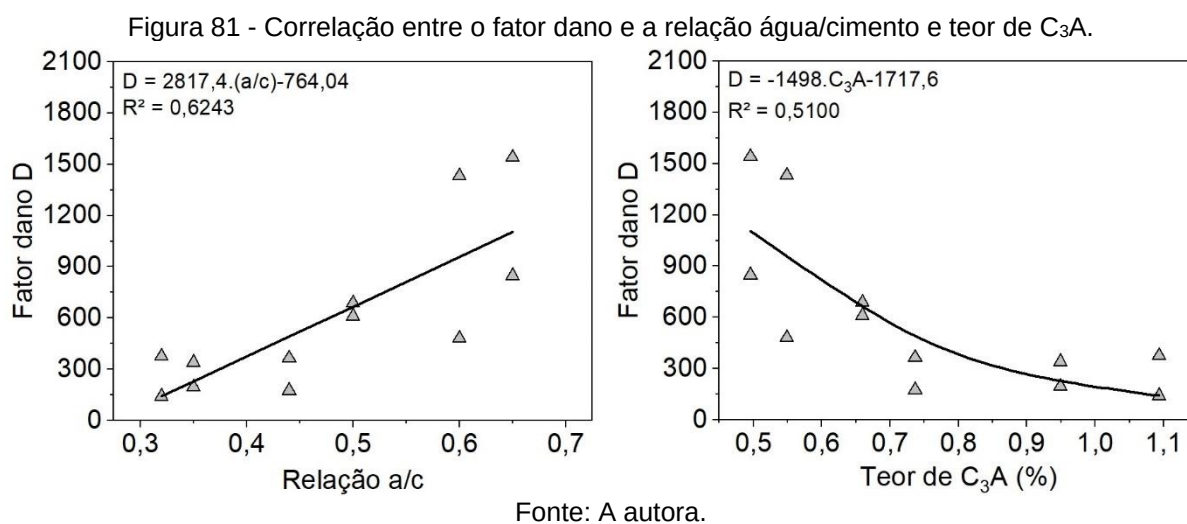
Com os fatores q , r_s e k_s definidos aplicou-se a Equação (44) para determinar a profundidade teórica de sulfatos determinada pelo modelo ainda não ajustado ($\text{Teo}(X)$). Esse valor foi comparado com a profundidade de penetração de sulfatos determinada experimentalmente. Como não foi possível determinar o dano a partir dos valores obtidos no ensaio de ultrassom e SDT, o fator dano (D) associado ao ataque por sulfatos foi obtido de forma empírica pela relação entre a profundidade experimental e teórica para permitir o ajuste do modelo proposto. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Determinação da profundidade de difusão teórica e do fator dano.

Tipo de sulfato	Traço (a/c)	Emp (x) (mm)	Teo (x) (mm)	$D = \frac{\text{Emp (x)}}{\text{Teo (x)}}$
Sulfato de sódio	0,32	16,432	0,1214	139,94
	0,35	11,074	0,0336	340,45
	0,44	12,249	0,0348	363,97
	0,50	16,188	0,0244	686,64
	0,60	17,722	0,0128	1429,53
	0,65	21,558	0,0263	846,82
Sulfato de magnésio	0,32	17,902	0,0492	375,96
	0,35	11,651	0,0619	194,69
	0,44	8,395	0,0499	174,06
	0,50	13,937	0,0236	609,90
	0,60	10,734	0,0231	480,05
	0,65	12,184	0,0082	1539,27

Fonte: A autora.

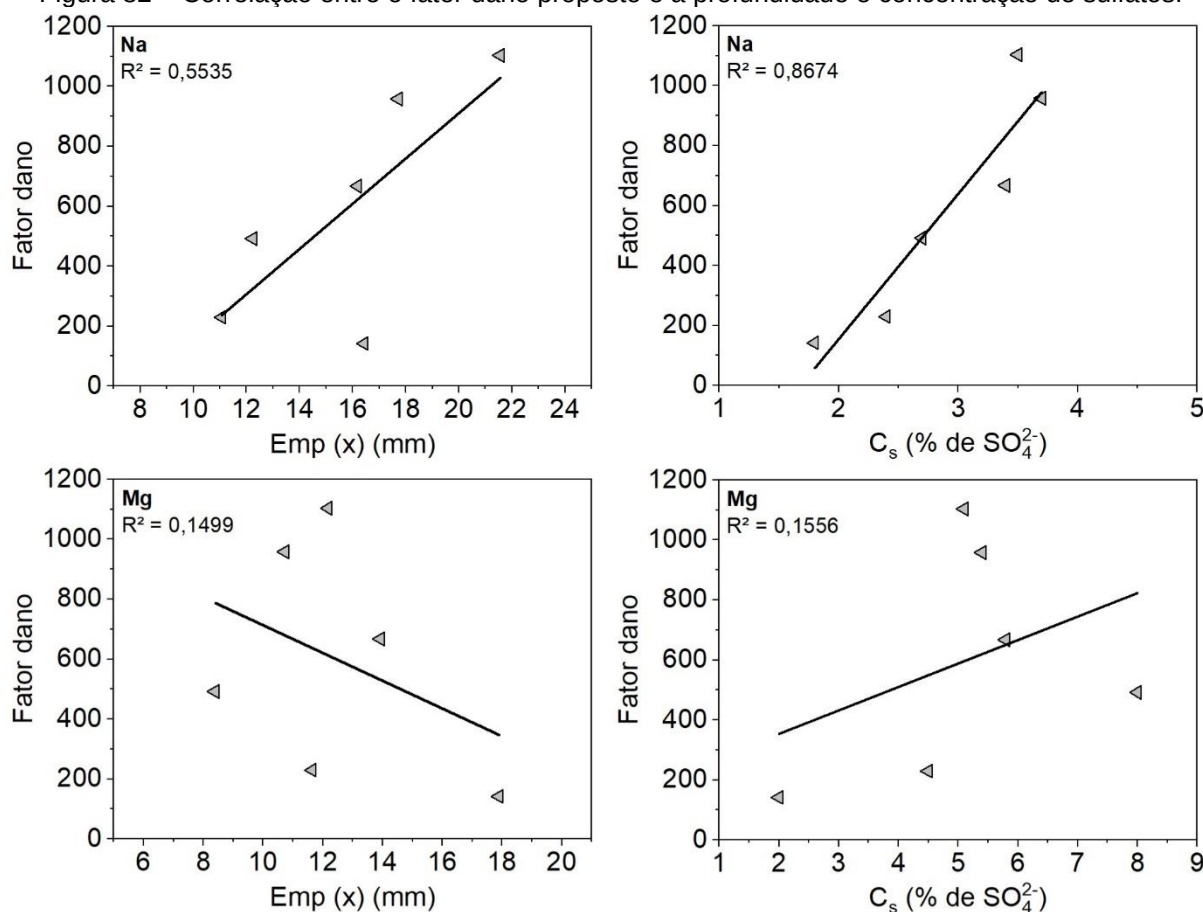
Em seguida, os valores de dano obtidos foram correlacionados com as propriedades da matriz, como consta na Figura 81. Como pode-se observar, o aumento da relação água/cimento correspondeu ao aumento do fator dano, como era esperado, já que as maiores relações a/c corresponderam a maior porosidade da matriz, e consequentemente, maiores taxas de degradação. Por outro lado, o aumento no teor de C_3A representou uma redução no dano. Novamente, os resultados indicam que para os traços adotados nesta pesquisa, a relação água/cimento do traço apresenta então uma correlação mais coerente com os resultados que o teor de aluminatos.



Para compreender a relação do dano com a concentração de íons e a profundidade de penetração atingida, o fator dano determinado foi também relacionado aos valores de profundidade de difusão empírica e concentração de íons sulfatos na superfície, conforme mostra a Figura 82. Fica evidente que para o sulfato de magnésio, não foi possível estabelecer uma relação adequada. Porém, para o sulfato de sódio, o dano determinado foi diretamente proporcional tanto a profundidade de penetração quanto a concentração de íons.

A literatura ainda não é clara sobre o que é mais nocivo no ataque entre a concentração e a profundidade da penetração do sulfato, pois ambas podem influenciar a durabilidade a longo prazo. Entender a interação entre esses fatores é essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação eficazes, porém os resultados obtidos ainda não permitem uma discussão assertiva, em especial para o sulfato de magnésio.

Figura 82 – Correlação entre o fator dano proposto e a profundidade e concentração de sulfatos.



Fonte: A autora.

Acredita-se que o prolongamento do tempo de exposição e monitoramento da velocidade de pulso ultrassônico bem como realizações de ensaio de SDT para idades avançadas, de forma a obter valores de dano experimentais, pode permitir estabelecer essa relação entre dano, concentração e profundidade dos íons. Acredita-se que dessa forma seja possível ainda estabelecer uma concentração e/ou profundidade crítica de sulfatos.

Para Qin *et al.* (2024) a concentração crítica de íons sulfato é aquela correspondente ao ponto onde a deformação de expansão gerada pelos componentes oriundos do ataque externo ultrapassa a resistência à tração do concreto, atingido assim a falha da matriz. Os autores propõem que a profundidade onde isso ocorre corresponde a espessura de falha, e que esse parâmetro pode ser utilizado como indicador de durabilidade para situações de ataque externo por sulfatos.

Além disso, as região da matriz onde as concentrações de sulfato são mais altas correspondem a profundidade de dissolução de portlandita (Yu; Zhang; Khennane, 2015). O consumo de portlandita pode levar a redução do pH da matriz,

que pode ainda gerar outro tipo de dano além do apresentado neste trabalho, associado a armadura no caso de estruturas armadas.

Neste caso, dependendo da concentração, os íons sulfatos são capazes de desestabilizar o filme passivo formado ao redor da armadura (Liu *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2019). De acordo Liu *et al.* 2016 e 2018, se o teor de SO_4^{2-} na superfície do aço exceder 0,02 ou 0,03 mol/L, a corrosão das armaduras de aço será acelerada. Dessa forma, com o prolongamento do tempo dos testes e proposição de uma relação entre a profundidade e concentração de sulfatos será possível também se determinar uma relação com o dano da armadura.

5.2.3 Proposição de modelo

Com base nos resultados obtidos, este trabalho propõe um novo modelo de penetração de íons sulfato em concreto. A Equação (52), que representa o modelo proposto, é baseada em Andrade, C. (2004), porém diferencia-se pela aplicação do fator dano que é associado ao ataque externo por sulfatos.

$$x = D \sqrt{\frac{t \cdot k_s}{\rho_0 \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^q \cdot r_s}} \quad (52)$$

O modelo tem como parâmetros, além do fator dano D , um fator idade q para considerar a variação na resistividade elétrica superficial ao longo do tempo, um fator de reação r_s que considera a fixação dos íons sulfatos na matriz, bem como um fator k_s relativo à agressividade do ambiente.

A Tabela 25 apresenta as equações necessárias para determinação das variáveis do modelo. Destaca-se que as relações propostas são apresentadas em função da relação água/cimento do traço, que representaram as melhores ou mais coerentes correlações nas determinações dos parâmetros apresentadas no item 5.2.2 deste trabalho.

Para utilizar o modelo, é necessário conhecer a relação água/cimento do traço e a resistividade efetiva do concreto saturado na sua primeira medição, determinado após 28 dias de cura em água. Com isso, é possível estimar a profundidade de penetração de íons para diferentes tempos de exposição aos sulfatos. Destaca-se que

de acordo com os dados obtidos, o ataque encontra-se em sua fase inicial, e para idades superiores a 12 meses, as equações como são propostas pode deixar de ser válidas.

Tabela 25 – Determinação dos parâmetros do modelo proposto de penetração de íons sulfatos.

Variável	Tipo de sulfato	Equação
D	Ambos	$D = 2817,4 \cdot (a/c) - 764,04$ (53)
q	Sulfato de sódio	$q = -0,25 \cdot (a/c) + 0,1358$ (54)
	Sulfato de magnésio	$q = 0,6753 \cdot (a/c) + 0,3641$ (55)
r_s	Sulfato de sódio	$r_s = 310,15 \cdot (a/c) - 74,98$ (56)
	Sulfato de magnésio	$r_s = 4680,25 \cdot (a/c) - 1439,33$ (57)
k_s	Sulfato de sódio	$k_s = 3,69$ (58)
	Sulfato de magnésio	$k_s = 37,23$ (59)

Fonte: A autora.

Onde as variáveis e suas respectivas unidades são:

x = profundidade de penetração de íons sulfatos (cm);

t = idade em que se deseja determinar a profundidade de sulfatos (anos);

t_0 = idade da primeira medição de resistividade elétrica – utilizado 28 dias que representa o tempo de cura em água (anos);

ρ_0 = resistividade efetiva do concreto saturado na sua primeira medição - determinado após 28 dias de cura em água ($\Omega \cdot \text{cm}$);

D = fator dano (adimensional);

r_s = fator de reação dos sulfatos (adimensional);

k_s = fator relativo à agressividade ambiental ($\text{cm}^3 \cdot \Omega / \text{ano}$).

5.2.4 Discussões finais da Etapa 2

Para os diferentes traços avaliados em situação de exposição ao sulfato de sódio e magnésio, as caracterizações das amostras e avaliações das propriedades foram apresentadas. Os resultados de resistência à compressão e velocidade de pulso ultrassônico indicam que ataque por sulfatos se encontra, em todos os traços, em estágio inicial, após 12 meses de exposição em condições naturais. O Índice de Dano da Rigidez (SDI) determinado no ensaio de SDT também indica esse comportamento, porém, é necessário avaliar uma maior quantidade de amostras para corroborar as discussões.

Melara *et al.* (2022) verifica o potencial do uso do modelo de Andrade, C. (2004) para sulfatos, porém, os autores avaliam apenas duas dosagens de concreto e para um curto período de análise. Com a expansão na quantidade de matrizes estudadas e a determinação dos parâmetros realizados na etapa 2 deste trabalho,

buscou-se aumentar o campo de aplicabilidade do modelo, bem como deixá-lo possível de ser determinado a partir de propriedades da matriz, como a relação água/cimento.

Sabe-se que, ainda assim, o modelo foi proposto inicialmente para concretos de cimento CP V com abatimentos de 100 ± 20 mm, e que os agregados adotados podem ter influência (Mendes *et al.*, 2018). Porém, a metodologia desenvolvida permite a criação de modelos para cada situação prática estudada.

Além disso, pela teoria do aumento de volume de sólidos, os compostos expansivos formados no ataque externo por sulfatos dão origem a fissuras, e os cristais passam então a se formar dentro destas fissuras. Apesar dos resultados observados nas medidas de resistividade, com o prolongamento do tempo de exposição, pode-se observar oscilações na resistividade em função da variação de porosidade, o que pode limitar as fases do ataque onde o fator idade proposto é válido.

Ainda neste sentido, o fator de dano determinado, como foi obtido por ajuste empírico, seria considerado constante no tempo, variando apenas com a quantidade de água em relação ao cimento da mistura, o que não ocorre na realidade. Acredita-se que com a continuidade da exposição aos íons e monitoramento das medidas de ultrassom, o dano possa ser corrigido em função do tempo e consequente fissuração da matriz. Além disso, o maior tempo dos testes pode permitir uma determinação de uma profundidade ou concentração limite de íons sulfatos.

5.3 ETAPA 3 – VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

5.3.1 Caracterização das amostras de concreto

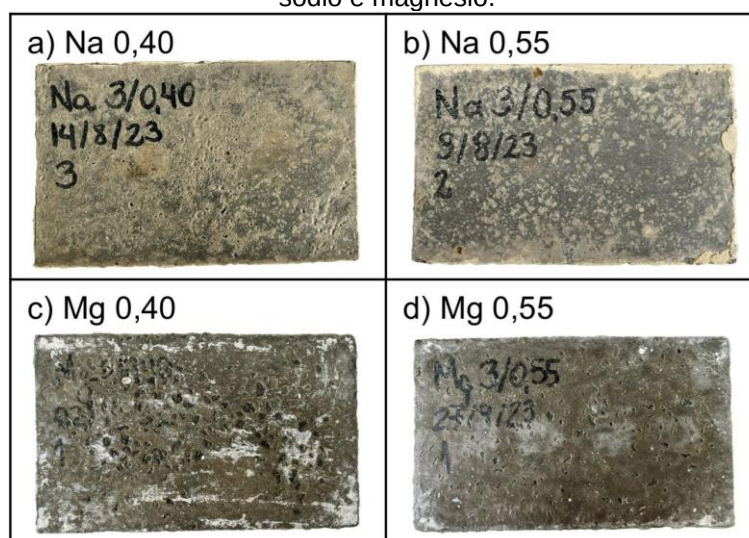
Os traços avaliados na etapa 3, assim como na etapa 2, variaram quanto a relação água/cimento e teor de C_3A (assim como de volume de pasta), de forma inversamente proporcional. A Tabela 26 apresenta os valores adotados. Os resultados encontrados para a caracterização das amostras nesta etapa são coerentes com os da etapa anterior. Após 12 meses de exposição aos sulfatos, o aspecto visual das amostras também foi similar, onde para as amostras ensaiadas com sulfato de sódio é possível notar manchas amareladas, e o agregado miúdo aparente nas amostras de sulfato de magnésio (Figura 83).

Tabela 26 – Teor de C_3A das dosagens das amostras de concreto da etapa 3.

Relação a/c	Cimento CP V ARI (kg/m^3)	Cimento CP V ARI (% da mistura)	Teor de C_3A (% da mistura)
0,40	497	21,07	0,82
0,55	352	15,01	0,59

Fonte: A autora.

Figura 83 - Aspecto visual das amostras após 12 meses de ensaio: traços expostos ao sulfato de sódio e magnésio.

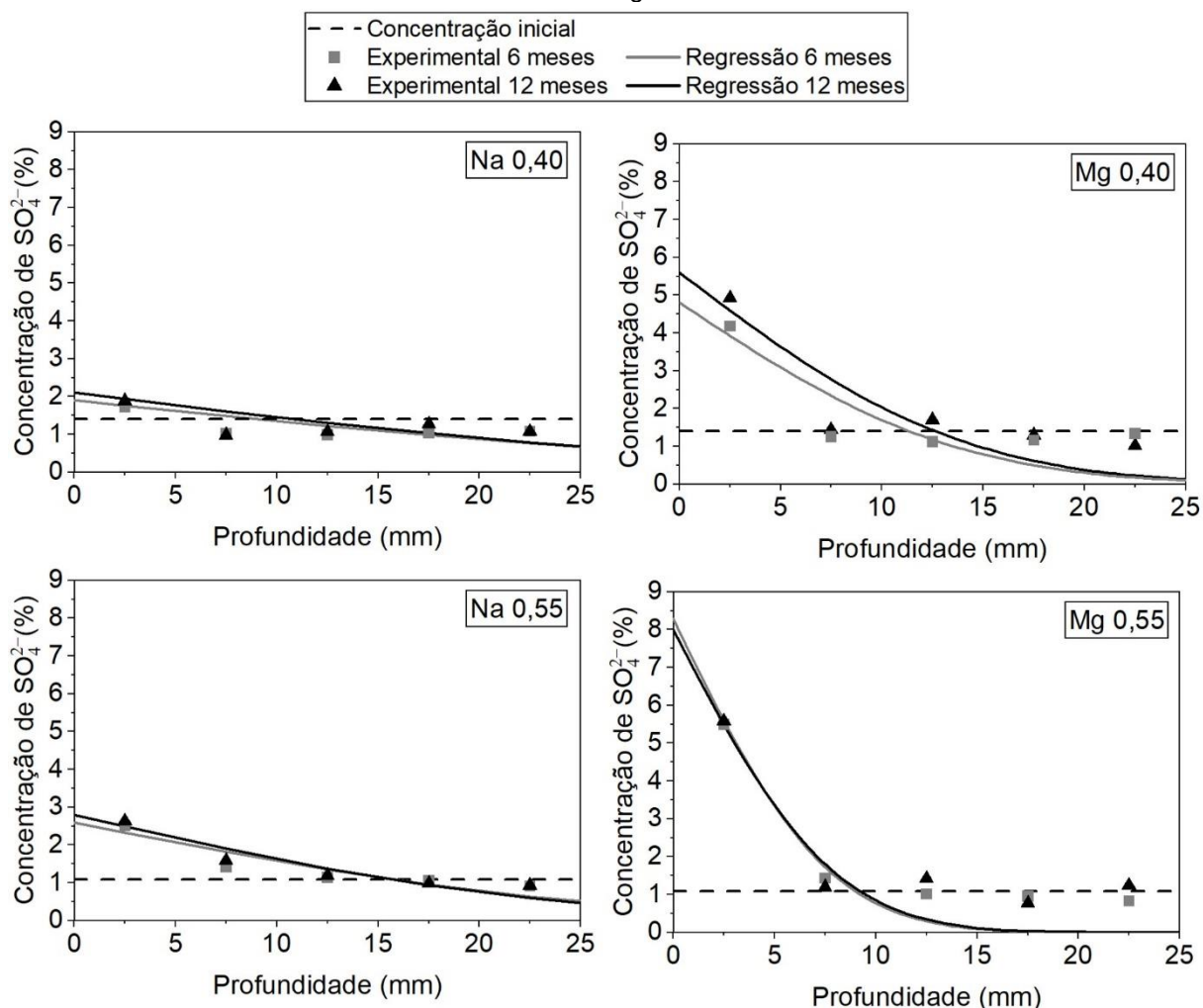


Fonte: A autora.

Avaliando os perfis de sulfatos das amostras, novamente as concentrações superficiais são mais altas para o sulfato de magnésio, enquanto a profundidade de penetração é maior para o sulfato de sódio (Figura 84 e Tabela 27). Como pode-se ver, os traços de maior água/cimento (0,55) também apresentam maiores concentrações superficiais que os traços de menor água/cimento (0,40) para a mesma solução avaliada.

Destaca-se que nessa etapa, a determinação dos perfis de sulfato foi realizada após 6 e 12 meses de exposição. Porém, apesar do maior tempo de exposição, a diferença entre as profundidades de sulfato atingidas foi pequena, indo de 8,992 mm para 10,938 mm no caso do traço Na 0,40, por exemplo. Tal resultado indica novamente que em condições de exposição natural, sem ciclos de molhagem e secagem ou variações de temperatura, o ataque por sulfatos ocorre de forma mais lenta, conforme discutido nos resultados da Etapa 2.

Figura 84 - Perfis de sulfato nas amostras de concreto após 6 e 12 meses de exposição ao sulfato de sódio e magnésio.



Fonte: A autora.

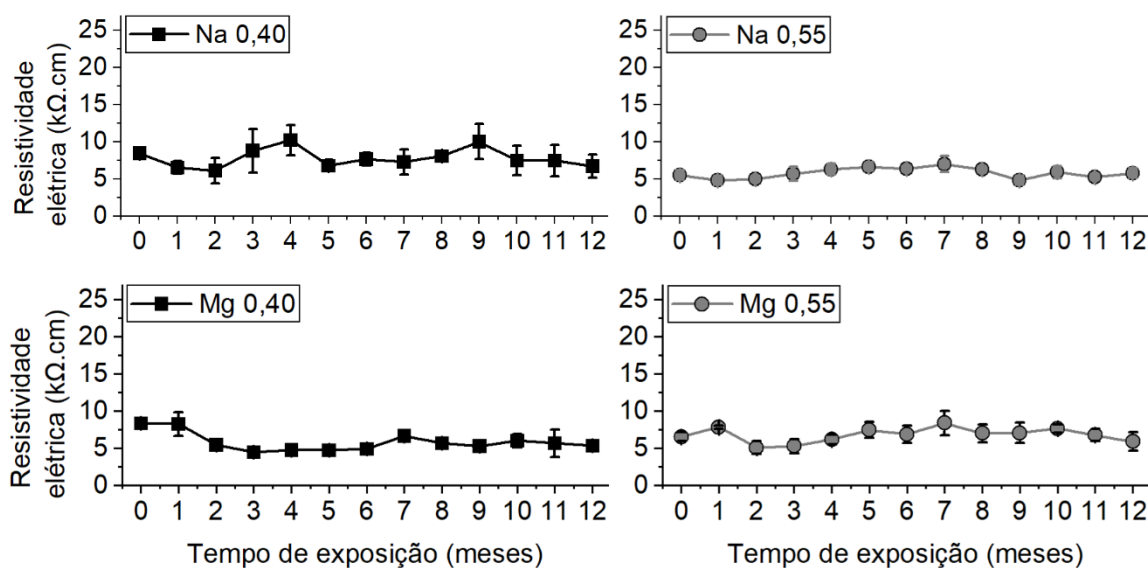
Tabela 27 – Profundidade de difusão e concentração na superfície dos íons sulfatos para as amostras da Etapa 3.

Tipo de sulfato	Traço (a/c)	Tempo de exposição	Emp (x) (mm)	C _s (% de SO ₄ ²⁻)
Sulfato de sódio	0,40	6 meses	8,992	1,9
	0,40	12 meses	10,938	2,1
	0,55	6 meses	16,177	2,6
	0,55	12 meses	16,214	2,8
Sulfato de magnésio	0,40	6 meses	11,819	4,8
	0,40	12 meses	13,229	5,6
	0,55	6 meses	9,746	8,3
	0,55	12 meses	9,982	8,0

Fonte: A autora.

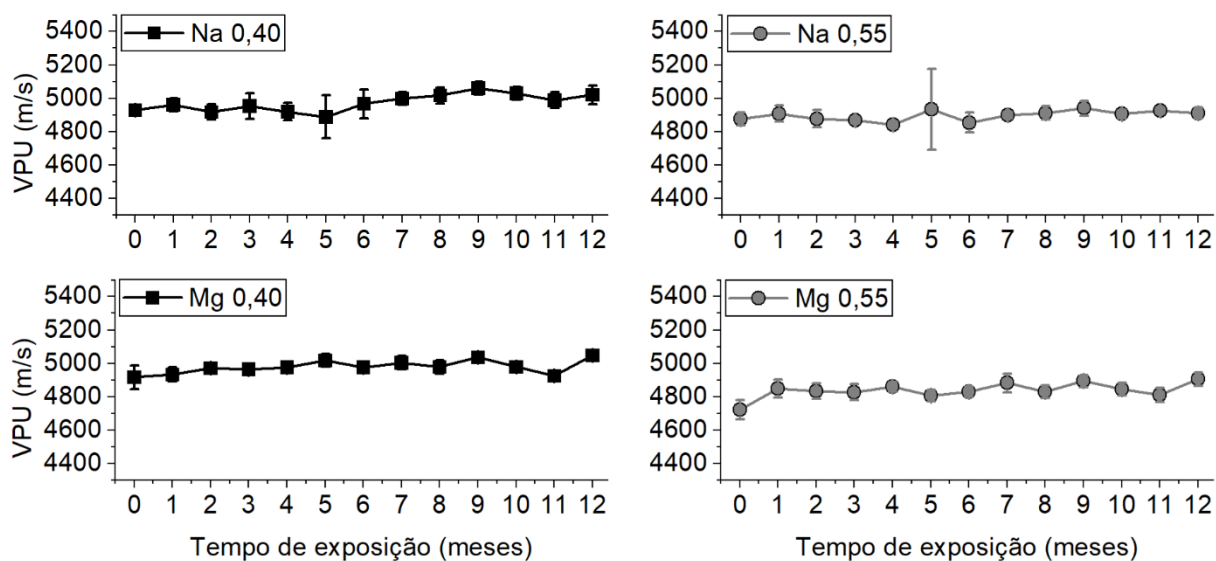
A resistividade elétrica superficial apresenta poucas variações ao longo do tempo (Figura 85), bem como a velocidade do pulso ultrassônico (Figura 86), onde os valores obtidos também permitem classificar os traços como de qualidade excelente de acordo com a VPU (Tabela 17).

Figura 85 – Evolução da resistividade elétrica das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio e magnésio.



Fonte: A autora.

Figura 86 – Evolução da velocidade do pulso ultrassônico das amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio e magnésio.



Fonte: A autora.

5.3.2 Aplicação do modelo proposto

O modelo proposto no item 5.2.3 foi aplicado para os traços da etapa 3. Os parâmetros foram calculados conforme relações apresentadas na Tabela 25, e os resultados obtidos constam na Tabela 28. A resistividade inicial corresponde à média da primeira medida de resistividade realizada, após período de cura (valor correspondente ao tempo 0 da Figura 85).

Tabela 28 – Parâmetros obtidos para os traços da etapa 3 conforme modelo proposto.

Tipo de sulfato	Traço (a/c)	Tempo de exposição	ρ_0 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	q	r_s	k_s ($\text{cm}^3 \cdot \Omega / \text{ano}$)	D
Sulfato de sódio	0,40	6 meses	8486,57	0,0358	49,077	3,69	3,63E+02
	0,40	12 meses	8486,57	0,0358	49,077	3,69	3,63E+02
	0,55	6 meses	5581,26	-0,0017	95,5995	3,69	7,86E+02
	0,55	12 meses	5581,26	-0,0017	95,5995	3,69	7,86E+02
Sulfato de magnésio	0,40	6 meses	8366,42	-0,09398	432,77	37,23	3,63E+02
	0,40	12 meses	8366,42	-0,09398	432,77	37,23	3,63E+02
	0,55	6 meses	6575,18	0,007315	1134,808	37,23	7,86E+02
	0,55	12 meses	6575,18	0,007315	1134,808	37,23	7,86E+02

Fonte: A autora.

A Figura 87 apresenta a regressão obtida da evolução da resistividade elétrica considerando a aplicação do fator idade obtido. Para cada idade, calculou-se o erro relativo entre o valor da resistividade determinada experimentalmente e o valor determinado a partir da regressão, e enfim, feito uma média do erro obtido para as 12 determinações. Para os traços *Na 0,40* e *Na 0,50* os erros médios foram de 18,10% e 12,12%, respectivamente. Para os traços de magnésio *Mg 0,40* e *0,50* os erros foram, respectivamente, 20,44% e 12,38%.

É possível notar na Figura 87 que a regressão obtida descreve melhor o comportamento experimental para os traços de maior relação água/cimento (0,55), o que é comprovado pelos valores dos erros. Acredita-se que o melhor resultado foi obtido para essas amostras por apresentarem uma menor variação de RES ao longo do tempo, em concordância com a tendência quase linear na evolução da resistividade elétrica obtida na determinação do fator idade.

Os parâmetros foram então aplicados no modelo proposto na Equação (52). O valor experimental ($\text{Emp}(x)$), o resultado da profundidade de penetração de sulfatos determinado pelo modelo ($\text{Teo}(x)$), bem como a relação entre ambos e o respectivo erro relativo constam na Tabela 29.

Como mostra a Tabela 29, os erros obtidos variaram de 2,58% a 79,95% para as situações avaliadas. Os erros encontrados nos valores determinados para sulfato de magnésio foram maiores, com uma média de 34,08% versus uma média de 12,41% no sulfato de sódio. Destaca-se que a maior diferença é de aproximadamente 8 mm, e para uma camada de cobertura, esse valor pode ser significativo, sendo importante a continuidade do tempo de exposição com o intuito de diminuir os erros.

Figura 87 - Evolução da resistividade elétrica para as amostras de concreto expostas ao sulfato de sódio e magnésio determinada com base no fator idade proposto.

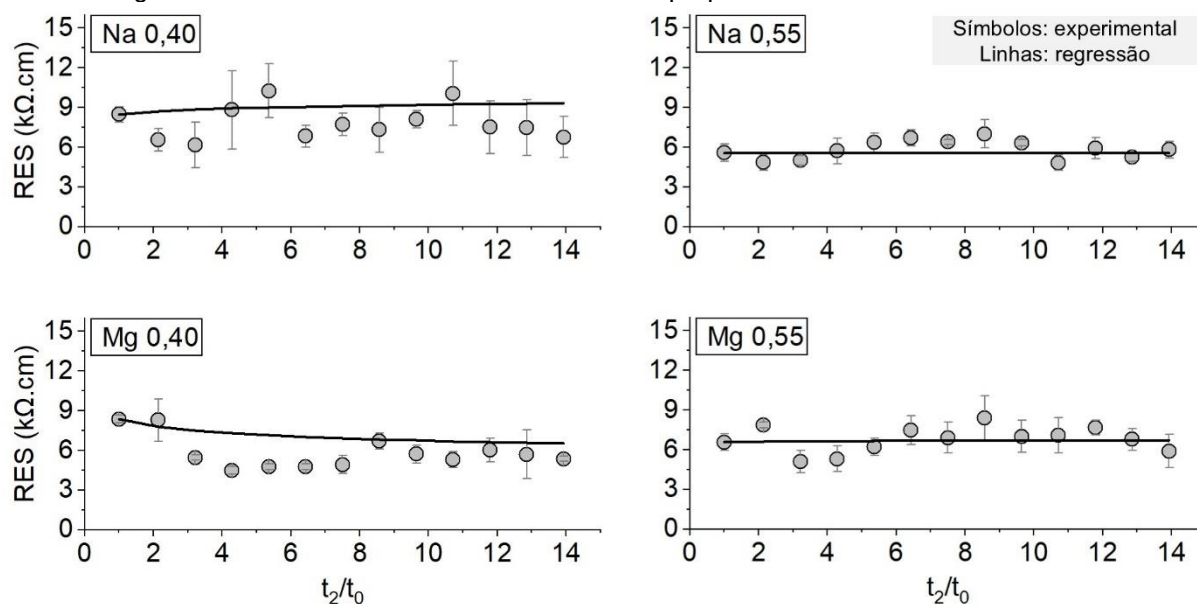


Tabela 29 – Determinação da profundidade de difusão pelo modelo proposto e erro relativo obtido para os traços da etapa 3.

Tipo de sulfato	Traço (a/c)	Tempo de exposição	Emp (x) (mm)	Teo (x) (mm)	$\frac{\text{Emp (x)}}{\text{Teo (x)}}$	Erro relativo (%)
Sulfato de sódio	0,40	6 meses	8,992	7,91	1,14	12,08
	0,40	12 meses	10,938	10,66	1,03	2,58
	0,55	6 meses	16,177	15,70	1,03	2,94
	0,55	12 meses	16,214	21,41	0,76	32,04
Sulfato de magnésio	0,40	6 meses	13,229	9,70	1,22	17,90
	0,40	12 meses	11,819	13,61	0,97	2,91
	0,55	6 meses	9,746	13,21	0,74	35,56
	0,55	12 meses	9,982	17,96	0,56	79,95

Fonte: A autora.

No estudo de Melara *et al.* (2022), a média nos erros relativos foi de 8,7%, com erro mínimo de 0,7% e erro máximo de 16,3%. Ressalta-se que, além dos ajustes e pequena quantidade de dosagens, as profundidades de difusão determinadas pelos autores foram até a idade de 168 dias, em solução de exposição de sulfato de sódio. Comparando com as amostras de idade similar (6 meses) expostas ao sulfato de sódio dessa pesquisa, nota-se que os erros obtidos estão na mesma ordem de grandeza.

Avaliando a relação entre os valores empíricos e teóricos, nota-se que para o sódio os valores determinados pelo modelo proposto foram ligeiramente menores que os experimentais. Já para o magnésio, os valores calculados foram maiores que os determinados nos ensaios. Como a cinética das reações é diferente para os diferentes

tipos de sulfato, pode ser necessário considerar no modelo um retardo no ingresso de íons para o caso do sulfato de magnésio devido a presença da brucita.

Além dos traços moldados na etapa 3, o modelo proposto foi também aplicado para os dados de Melara *et al.* (2022). Os autores avaliaram dois traços, identificados por traço A e B, de relação água/cimento 0,60 e 0,45, respectivamente, cujos dados da resistividade inicial determinadas por eles são utilizados na aplicação do modelo. Para estes valores de a/c, aplicam-se as equações determinadas para sulfato de sódio dispostas na Tabela 25, e os resultados encontrados para os parâmetros do modelo de penetração são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Parâmetros obtidos para os traços de Melara *et al.* (2022), conforme modelo proposto.

Traço	Relação a/c	Tempo de exposição	ρ_0 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	q	r_s	k_s ($\text{cm}^3 \cdot \Omega / \text{ano}$)	D
Traço A	0,60	4 ciclos	8200	-0,0142	111,107	3,69	9,26E+02
	0,60	8 ciclos	8200	-0,0142	111,107	3,69	9,26E+02
	0,60	16 ciclos	8200	-0,0142	111,107	3,69	9,26E+02
	0,60	20 ciclos	8200	-0,0142	111,107	3,69	9,26E+02
Traço B	0,45	4 ciclos	15200	0,0233	64,5845	3,69	5,04E+02
	0,45	8 ciclos	15200	0,0233	64,5845	3,69	5,04E+02
	0,45	16 ciclos	15200	0,0233	64,5845	3,69	5,04E+02
	0,45	20 ciclos	15200	0,0233	64,5845	3,69	5,04E+02

Fonte: A autora.

As amostras de Melara *et al.* (2022) foram expostas a ciclos de molhagem e secagem em solução com 10% de sulfato de sódio. Os autores adotam ciclos de 2 dias de molhagem a 40°C seguidos de 5 dias de secagem em temperatura ambiente. Os resultados da profundidade de penetração de íons são determinados pelos autores para 4, 8, 16 e 20 ciclos, que correspondem ao valor de Emp (x) apresentados na Tabela 31. Tais valores são comparados aos obtidos aplicando o modelo proposto, dados na coluna de Teo (x) da Tabela 31.

Tabela 31 – Determinação da profundidade de difusão pelo modelo proposto e erro relativo obtido para os traços de Melara *et al.* (2022).

Traço	Relação a/c	Tempo de exposição	Emp (x) (mm)	Teo (x) (mm)	$\frac{\text{Emp (x)}}{\text{Teo (x)}}$	Erro relativo (%)
Traço A	0,60	4 ciclos	17,20	7,34	2,34	57,32
	0,60	8 ciclos	20,20	9,02	2,24	55,36
	0,60	16 ciclos	20,90	11,68	1,79	44,10
	0,60	20 ciclos	21,10	18,97	1,11	10,11
Traço B	0,45	4 ciclos	17,90	3,80	4,71	78,79
	0,45	8 ciclos	20,60	4,63	4,45	77,53
	0,45	16 ciclos	21,80	5,94	3,67	72,76
	0,45	20 ciclos	22,60	9,61	2,35	57,48

Fonte: A autora.

Neste caso, todos os valores determinados pelo modelo foram menores que os valores experimentais dos autores, e os erros relativos variaram de 10,11 a 78,79%, sendo que a maior diferença foi de cerca de 14 mm. Pode-se notar também dos resultados obtidos na aplicação do modelo foi que, quanto maior a idade de exposição, menores foram os erros. Melara *et al.* (2022) obtém valores altos de penetração já após 28 dias de ensaio, justamente pela maior agressividade em ensaios de molhagem e secagem em relação a difusão natural como foi realizado neste trabalho, o que justifica o maior erro para os dados nas idades menores.

Por sua vez, os valores de $\text{Emp}(x)$ variaram pouco com a continuidade do tempo de exposição, com os valores se aproximando cada vez mais dos valores determinados pelo modelo. Acredita-se que se o ensaio fosse prolongado, seria possível reduzir ainda mais o erro relativo entre os dados, por se aproximar mais da idade utilizada nesta Tese para determinação dos parâmetros do modelo.

O fator de dano determinado pelo modelo varia apenas em função da relação água/cimento, sendo considerado neste caso constante no tempo, como evidencia a Tabela 30. Com o prolongamento nos testes para determinação do parâmetro dano de forma que ele possa ser corrigido em função do tempo e consequente fissuração da matriz, acredita-se ser possível reduzir os erros obtidos. Pode-se ainda considerar na determinação do fator dano a realização ou não de ciclos de molhagem e secagem, já que afetam diretamente na agressividade do ataque.

5.3.3 Discussões finais da Etapa 3

O modelo proposto foi aplicado para outras duas dosagens e avaliado em dois diferentes tempos de exposição aos íons sulfatos. Os resultados obtidos quando a caracterização e avaliação das matrizes cimentícias apresentaram comportamentos coerentes com àqueles obtidos para as dosagens da etapa 2, porém, houve uma grande variação entre os valores dos erros relativos determinados na aplicação do modelo.

Para os dois tipos de sulfatos avaliados, os menores erros foram calculados para a amostra 0,40 após 12 meses de ensaio. Os maiores erros aconteceram na amostra de relação água/cimento 0,55 após 12 meses de exposição. Eliminando essa amostra, o erro médio cai para 5,86% para o sulfato de sódio e 18,79% para o sulfato de magnésio.

Na determinação do fator de reação na etapa 2 dessa pesquisa, as amostras de relação água/cimento mais altas apresentaram valores inconsistentes, e assim, é possível que essa variável precise ser ajustada para casos de misturas com maiores quantidades de água. A aplicação do modelo nos dados de Melara *et al.* (2022) reforça também a necessidade de considerar o tempo no valor do fator dano. Além disso, os valores obtidos indicam a necessidade de se considerar o retardo do ingresso de íons sulfatos gerado pela brucita no ataque por sulfato de magnésio.

Caso esses ajustes sejam realizados, o modelo poderá ser utilizado também no auxílio da dosagem de concretos, e não somente na determinação da penetração de sulfatos. É possível determinar a resistividade mínima necessária aos 28 dias limitando a profundidade de sulfatos, e com esse dado, realizar a dosagem da matriz.

6 CONCLUSÕES

Considerando os objetivos desta pesquisa e resultados obtidos, destacam-se as principais conclusões:

- A metodologia do ensaio de migração para íons sulfatos foi refinada, e definiu-se a partir dos resultados a sua aplicação para amostras com 25 mm de espessura e utilizando eletrodos de grafite. O eletrodo de aço demonstrou ser o menos adequado para o uso em ensaio de migração de sulfato.
- Visualmente, foi possível identificar dano nas amostras após 12 meses de exposição ao sulfato de sódio de magnésio, com a presença de manchas e fissuras para o sódio e superfície irregular com parte do agregado graúdo exposto para o magnésio. Apesar disso, as propriedades mecânicas indicam que o ataque se encontra ainda em um estágio inicial.
- Não foi possível determinar dano a partir da avaliação da resistência à compressão das amostras e das medidas de velocidade de pulso ultrassônico. A variação no índice de vazios e na absorção de água indicam que houve um refinamento dos poros devido à formação dos cristais de etringita secundária e gipsita oriundos do ataque externo por sulfatos.
- O ensaio de *Stiffness Damage Test* (SDT) se mostrou promissor na avaliação de dano gerado pelo ataque por sulfatos, em especiais o índice de SDI, onde foi possível observar o aumento do dano com o aumento da relação água/cimento para as amostras expostas ao sulfato de sódio. Um maior grupo experimental deve ser avaliado para corroborar as discussões.
- A concentração de íons sulfatos nas camadas superficiais é maior para as amostras de sulfato de magnésio devido a formação de brucita neste tipo de ataque. Já no sulfato de sódio, as profundidades de penetração atingidas foram maiores, devido às fissuras que foram observadas e por não haver brucita associada às reações.
- Os parâmetros necessários para aplicação do modelo foram determinados, sendo eles o fator idade, fator de reação dos sulfatos, fator relativo à agressividade do ambiente e fator dano. Foram propostas relações para determinar o valor de cada fator em função da relação água/cimento do traço

ao qual será aplicado o modelo, com exceção do fator relativo à agressividade que é constante para as situações apresentadas.

- O fator idade definido representou a tendência quase linear na evolução da resistividade elétrica, pois quase não houve variação da RES ao longo do tempo para os traços expostos aos sulfatos. Houve uma amplitude maior nos valores do fator idade determinados para o sulfato de magnésio, justificado pela maior variação da RES ao longo do tempo neste tipo de sulfato em relação ao sódio.
- Para determinação do fator de reação, uma nova proposta foi apresentada, onde a unidade do coeficiente de difusão efetivo do concreto deve ser homogeneizada sendo multiplicada pela porosidade da matriz. Dessa forma, foi possível melhorar a correlação entre os coeficientes de difusão efetivo e aparente, bem como entre os fatores de reação determinados e as propriedades da matriz, como a relação água/cimento, teor de C_3A e valor da resistividade elétrica efetiva. Na determinação do fator relativo à agressividade do ambiente, essa mesma correção foi realizada, permitindo obter valores de R^2 de 0,8104 e 0,8314 na lei de Einstein ajustada conforme a nova proposta. As amostras de relação água/cimento mais altas apresentaram valores inconsistentes nessa determinação e não foram consideradas.
- Como não foi possível determinar o dano a partir dos valores obtidos no ensaio de ultrassom e SDT, o fator dano foi obtido de forma empírica de forma a ajustar a profundidade de penetração determinada de forma teórica à profundidade experimental. O fator dano proposto apresentou uma relação diretamente proporcional ao aumento da relação água/cimento, o que se mostra um resultado adequado, já que as maiores relações a/c corresponderam a maior porosidade da matriz, e consequentemente, maiores taxas de degradação. Além disso, o dano determinado foi diretamente proporcional tanto a profundidade de penetração quanto a concentração de íons para o sulfato de sódio. Para o sulfato de magnésio não foi possível estabelecer uma relação adequada.
- O modelo proposto foi aplicado a outras duas dosagens e para dois tempos diferentes de exposição, buscando sua validação. O erro relativo entre o valor da resistividade determinada experimentalmente e o valor determinado a

partir da regressão do fator idade variação de 12,12 a 20,44%. Já o erro obtido entre o valor da profundidade de penetração determinado experimentalmente e o valor determinado pelo modelo proposto variou entre de 2,58% a 79,95%. A maior diferença encontrada é aproximadamente de 8 mm.

- Os maiores erros obtidos entre a profundidade de penetração experimental e teórica aconteceram para as amostras de maior relação água/cimento, o que pode estar relacionado a necessidade de ajustar o fator de reação para misturas com maiores quantidades de água. Eliminando essa amostra, o erro médio cai para 5,86% para o sulfato de sódio e 18,79% para o sulfato de magnésio.
- Os valores determinados pelo modelo proposto foram maiores que os experimentais no caso do sulfato de magnésio, o que pode representar a necessidade de se considerar o retardo do ingresso de íons sulfatos devido a presença da brucita neste tipo de ataque.
- A aplicação do modelo proposto para dados da literatura de amostras de concreto expostas a ciclos de molhagem e secagem teve como erro relativo valores entre 10,11 e 78,79%. Neste caso, a maior diferença foi de cerca de 14 mm. A aplicação do modelo nestes dados evidenciou a necessidade de se considerar o tempo na determinação do valor do fato dano.

Apesar dos valores de erro obtidos de determinação da penetração de íons sulfatos, foi possível obter boas correlações entre os parâmetros propostos. Estes parâmetros podem ser estudados individualmente de forma aprofundada, em maiores tempos de exposição e para uma maior variedade de amostras, de forma a permitir um melhor ajuste no modelo.

Além disso, é importante avaliar também dados de estruturas reais, para validar a aplicabilidade da proposta realizada para situações de campo, tendo em vista que o modelo proposto utiliza testes que podem ser realizados também fora do laboratório.

O estudo se mostrou relevante, permitindo obter parâmetros que ainda não haviam sido determinados no estudo do ataque externo e que podem ser utilizados para quantificar e compreender o fenômeno com base em uma metodologia simplificada.

Com o objetivo de dar continuidade na linha de pesquisa e ampliar o conhecimento acerca do assunto, sugere-se para trabalhos futuros:

- Monitoramento com ensaios não destrutivos de amostras expostas a sulfatos em tempos maiores que 12 meses, para completa avaliação do dano;
- Realização do ensaio de SDT para amostras expostas a sulfatos como alternativa para avaliação de dano;
- Aplicação do modelo proposto para outras composições de concreto;
- Monitorar matrizes expostas a sulfatos em campo e verificar se os fatores de reação e fator de idade determinados em condições de laboratório são aplicáveis;
- Determinar o fator relativo à agressividade ambiental para diferentes condições ambientes em situações de campo.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 - Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro: 2014b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro: 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro: 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13583: Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio.** Rio de Janeiro: 2014a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: 2021d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro: 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**. Montevideo: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: 1998.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **ACI 318 - 14 - Building Code Requirements for Structural Concrete**. Farmington Hills, Michigan: 2014.

AGUAYO, F. M.; DRIMALAS, T.; FOLLIARD, K. J. An accelerated test method to evaluate cementitious mixtures subjected to chemical sulfate attack. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 8, n. 1, p. 190–206, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/ACEM20180099>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724–742, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3). Acesso em: 16 abr. 2025.

ANDRADE, C. *et al.* Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments, in non steady-state conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 7, p. 1214–1228, 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90106-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90106-6). Acesso em: 16 abr. 2025.

ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity. **In: International Symposium on Advances in Concrete through Science and Eng**. Illinois, USA: RILEM Symposium, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/2912143586.003>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. Electrical resistivity as microstructural parameter for the modelling of service life of reinforced concrete structures. **2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure**, October, p. 379–388, 2010.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. **Alconpat**, v.1, n. 1, p. 41–51, 2011.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R.; REBOLLEDO, N. Chloride ion penetration in concrete: The reaction factor in the electrical resistivity model. **Cement and Concrete Composites**, v. 47, p. 41–46, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.022>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ANDRADE, J. J. de O. *et al.* Previsão da vida útil de estruturas de concreto atacadas pela corrosão das armaduras: panorama atual e perspectivas futuras. 51º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Outubro. Curitiba, 2009.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1012 - Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution**. Pensilvânia, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C1012>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. Pensilvânia, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C1202-19.2>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C150 - Standard Specification for Portland Cement**. Pensilvânia, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C0150>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ATKINS, P. W.; DE PAULA, J. **Físico-química**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BALESTRA, C. E. T. *et al.* Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: Proposal of parameters based on field structures. **Ocean Engineering**, v. 187, p. 106167, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2019.106167>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BARY, B. *et al.* Coupled chemo-transport-mechanical modelling and numerical simulation of external sulfate attack in mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 49, p. 70–83, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.010>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BAUR, I. *et al.* Dissolution-precipitation behaviour of ettringite, monosulfate, and calcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 341–348, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.016>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BREKAILO, F. **Aplicação dos ensaios de migração e de difusão natural para cálculo do coeficiente de difusão de íons sulfatos no estado estacionário e não estacionário no concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2020.

BREKAILO, F. *et al.* Red ceramic and concrete waste as replacement of portland cement: Microstructure aspect of eco-mortar in external sulfate attack. **Cleaner Materials**, v. 3, December 2021, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100034>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BREKAILO, F.; PEREIRA, E.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Calculation of Sulfate Diffusion Coefficients of Concrete Based on Migration Test. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 11, p. 1–10, 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16160>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BREKAILO, F.; PEREIRA, E.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Migration test as an accelerated methodology in concrete for evaluating sulfate attack by Na₂SO₄ and MgSO₄. **Construction and Building Materials**, v. 388, n. March, p. 131681, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131681>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BREKAILO, F.; PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. Visão sistêmica sobre publicações relacionadas aos modelos de previsão do ataque por sulfatos em matrizes cimentícias. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 3, p. 225–243, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000300684>. Acesso em: 16 abr. 2025.

BROWN, P. W. Thaumasite formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, n. 1, p. 1–7, 2002. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/13403348>. Acesso em: 16 abr. 2025.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. John Wiley & Sons, 2012.

CASANOVA, I.; AGUADO, A.; AGULLÓ, L. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation - II. Physico-chemical modeling of sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 11, p. 1627–1632, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00148-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00148-8). Acesso em: 16 abr. 2025.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1411–1420, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00562-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00562-2). Acesso em: 16 abr. 2025.

Comité Euro-International du Béton - CEB. **Durable Concrete Structures: Design Guide**. 2a Edição. Londres: 1992.

CEFIS, N.; COMI, C. Damage modelling in concrete subject to sulfate attack. **Frattura ed Integrità Strutturale**, v. 8, n. 29, p. 222–229, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.29.19>. Acesso em: 16 abr. 2025.

CHEN, X. *et al.* A chemical-transport-mechanics numerical model for concrete under sulfate attack. **Materials**, v. 14, n. 24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14247710>. Acesso em: 16 abr. 2025.

CHEN, J. K.; QIAN, C.; SONG, H. A new chemo-mechanical model of damage in concrete under sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 536–543, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.074>. Acesso em: 16 abr. 2025.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2. ed. London: Oxford University Press, 1975-. ISSN 15205126.v. 79

D'ANDRÉA, R. **Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica**. Tese (Doutorado) - Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2010.

DONG, B. *et al.* Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 16–20, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.03.127>. Acesso em: 16 abr. 2025.

DONG, B. *et al.* Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 16–20, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.127>. Acesso em: 16 abr. 2025.

EVANGELISTA, L. R. *et al.* On the Einstein–Smoluchowski relation in the framework of generalized statistical mechanics. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 635, p. 129491, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.129491>. Acesso em: 16 abr. 2025.

FATIMA, T.; MUNTEAN, A. Sulfate attack in sewer pipes: Derivation of a concrete corrosion model via two-scale convergence. **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, v.15, January, p. 326–344, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2012.01.019>. Acesso em: 16 abr. 2025.

FERRARIS, C. F.; STUTZMAN, P. E.; SNYDER, K. A. Sulfate Resistance of Concrete: A New Approach. **R&D Serial**, n. 2486, p. 93. 2006.

FERREIRA, R. M.; JALALI, S. NDT measurements for the prediction of 28-day compressive strength. **NDT & E International**, v. 43, n. 2, p. 55–61, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2009.09.003>. Acesso em: 16 abr. 2025.

FIGUEIREDO, E. P. Inspeção e diagnostico de estruturas de concreto com problemas de resistência, fissuras e deformações. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto. Ensino, pesquisa e realizações**. 2005, São Paulo: IBRACON, v.2, p. 985-1015.

FU, Q. *et al.* Resistance to Sulfate Attack and Chemo-Damage-Transport Model of Sulfate Ions for Tunnel Lining Concrete under the Action of Loading and Flowing Groundwater. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 9, n. 42, p. 14307–14326, 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.1c05794?goto=supporting-info&articleRef=control>. Acesso em: 16 abr. 2025.

GIANNINI, E. R. *et al.* Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 253–264, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.012>. Acesso em: 16 abr. 2025.

GONG, J.; CAO, J.; WANG, Y. feng. Effects of sulfate attack and dry-wet circulation on creep of fly-ash slag concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 12–20, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.023>. Acesso em: 16 abr. 2025.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Werner technique. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, p. 536–541, 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos da física: eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 60–72, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2013.03.019>. Acesso em: 16 abr. 2025.

HOSSACK, A. M.; THOMAS, M. D. A. Varying fly ash and slag contents in Portland limestone cement mortars exposed to external sulfates. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 333–341, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.030>. Acesso em: 16 abr. 2025.

HOU, W.; HE, F.; LIU, Z. Characterization methods for sulfate ions diffusion coefficient in calcium sulphoaluminate mortar based on AC impedance spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123169, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123169>. Acesso em: 16 abr. 2025.

HUANG, Q. *et al.* Accelerated sulfate attack on mortars using electrical pulse. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 875–881, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.034>. Acesso em: 16 abr. 2025.

HUANG, Q. *et al.* Deterioration of mortars exposed to sulfate attack under electrical field. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 121–128, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.004>. Acesso em: 16 abr. 2025.

HUANG, Q. *et al.* Effect of mineral admixtures on sulfate resistance of mortars under electrical field. **Advances in Cement Research**, v. 29, n. 2, p. 45–53, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00063>. Acesso em: 16 abr. 2025.

IBRAHIM, M. *et al.* Use of surface treatment materials to improve concrete durability. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, February, p. 36–40, 1999.

IDIART, A. E.; LÓPEZ, C. M.; CAROL, I. Chemo-mechanical analysis of concrete cracking and degradation due to external sulfate attack: A meso-scale model. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 3, p. 411–423, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.12.001>. Acesso em: 16 abr. 2025.

IKUMI, T. *et al.* Alternative methodology to consider damage and expansions in external sulfate attack modeling. **Cement and Concrete Research**, v. 63, p. 105–116, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.05.011>. Acesso em: 16 abr. 2025.

IKUMI, T. *et al.* Simplified methodology to evaluate the external sulfate attack in concrete structures. **Materials & Design**, v. 89, p. 1147–1160, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.10.084>. Acesso em: 16 abr. 2025.

IKUMI, T.; CAVALARO, S. H. P.; SEGURA, I. The role of porosity in external sulphate attack. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, January 2018, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.016>. Acesso em: 16 abr. 2025.

IKUMI, T.; SEGURA, I. Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review. **Cement and Concrete Research**, v. 121, May, p. 91–105, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.010>. Acesso em: 16 abr. 2025.

IRASSAR, E. F.; BONAVENTI, V. L.; GONZÁLEZ, M. Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 1, p. 31–41, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00914-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00914-6). Acesso em: 16 abr. 2025.

IRASSAR, E. F.; DI MAIO, A.; BATIC, O. R. Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 4, p. 551–556, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00195-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00195-6). Acesso em: 16 abr. 2025.

JIANG, L. *et al.* Ultrasonic testing and microscopic analysis on concrete under sulfate attack and cyclic environment. **Journal of Central South University**, v. 21, n. 12, p. 4723–4731, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2482-6>. Acesso em: 16 abr. 2025.

JIANG, L.; NIU, D. Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 88–98, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.094>. Acesso em: 16 abr. 2025.

KOLEVA, D. A. *et al.* Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 8, p. 731–744, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.04.001>. Acesso em: 16 abr. 2025.

KROPP, J.; HILSDORF, H.; GRUBE, H.; ANDRADE, C.; NILSSON, L. Transport mechanisms and definitions. In: KROPP, J.; HILSDORF, H. (org.). **Performance Criteria for Concrete Durability**. 1a Edição. Londres: Spon, E & F, 1995. p. 3–9.

LANGARO, E. A. **Contribuição no estudo de controle e diagnóstico da reação álcali-sílica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

LEE, S. T. *et al.* Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 1, p. 68–76, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.003>. Acesso em: 16 abr. 2025.

LENCIONI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios**. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.

LI, C. *et al.* Understanding the sulfate attack of Portland cement-based materials exposed to applied electric fields: Mineralogical alteration and migration behavior of

ionic species. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, September 2019, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103630>. Acesso em: 16 abr. 2025.

LI, G.; WANG, B. The deterioration of cement mortar under the coupled conditions of stray current and sulfate. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 49, n. 1, p. 603–612, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/JTE20180721>. Acesso em: 16 abr. 2025.

LIU, G. *et al.* Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 1–5, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.213>. Acesso em: 16 abr. 2025.

LIU, G. *et al.* Electrochemical Analysis of Carbon Steel Corrosion Induced by Chloride and Sulfate Ions in Simulated Concrete Pore Solution. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 13, n. 7, p. 6248–6258, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.20964/2018.07.46>. Acesso em: 16 abr. 2025.

LORENTE, S.; YSSORCHE-CUBAYNES, M. P.; AUGER, J. Sulfate transfer through concrete: Migration and diffusion results. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 7, p. 735–741, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.001>. Acesso em: 16 abr. 2025.

LORENZI, A. **Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultrassônico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LOTENBACH, B. *et al.* Sulfate ingress in Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 8, p. 1211–1225, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.04.004>. Acesso em: 16 abr. 2025.

LV, Y. *et al.* Influence of Initial Damage Degree on the Degradation of Concrete Under Sulfate Attack and Wetting–Drying Cycles. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 14, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00422-z>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MARTINS, M. C. *et al.* External ammonium sulfate attack in concrete: Analysis of the current methodology. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122252, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122252>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Ensaio de migração de cloretos para concreto: Influência do número de fatias extraídas. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 4, p. 475–481, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000400007>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Electrical resistivity of concrete exposed to chlorides and sulfates. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 3, p. 119–130, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14359/51714464>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. **Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil - corrosão de armaduras devido à penetração de cloretos**. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. *et al.* Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Alconpat**, v. 2, Mayo-Agosto, p. 186–199, 2014.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; BEM, D. H. Study of the environment factor from Fick's and electrical resistivity models by simulation of chloride diffusivity prediction. **Advances in Structural Engineering**, v. 23, n. 10, p. 2097–2109, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/1369433220906932>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. McGraw-Hill, 2006. v. 4

MELARA, E. K. **Contribuição para a modelagem da vida útil de estruturas de concreto expostas ao ataque por sulfatos a partir da inclusão de dados de resistividade elétrica superficial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

MELARA, E. K. *et al.* Contribution to the service-life modeling of concrete exposed to sulfate attack by the inclusion of electrical resistivity data. **Construction and Building Materials**, v. 322, n. January, p. 126490, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126490>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MENDES, M. V. A. S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2009.

MENDES, S. E. S. *et al.* Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 610–620, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.145>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MIN, H. *et al.* An effective transport model of sulfate attack in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 365–378, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.218>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MÜLLAUER, W.; BEDDOE, R. E.; HEINZ, D. Sulfate attack expansion mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 208–215, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.005>. Acesso em: 16 abr. 2025.

NAIK, N. N. *et al.* Sulfate attack monitored by microCT and EDXRD: Influence of cement type, water-to-cement ratio, and aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 1, p. 144–159, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2005.06.004>. Acesso em: 16 abr. 2025.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismos de Transporte de Fluidos no Concreto. In: G.C.ISAIA (org.). **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações**. 1a Edição. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2005. p. 793–827.

NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1275–1296, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.004>. Acesso em: 16 abr. 2025.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda, 2013.

ORTEGA, J. M. *et al.* Long-term behaviour of fly ash and slag cement grouts for micropiles exposed to a sulphate aggressive medium. **Materials**, v. 10, n. 6, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma10060598>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ORTEGA, J. M. *et al.* Microstructural Effects of Sulphate Attack in Sustainable Grouts for Micropiles. **Materials**, v. 9, n. 11, p. 1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma9110905>. Acesso em: 16 abr. 2025.

PEREIRA, E. *et al.* Pyrite Oxidation and its effects on portland cement mortars subject to internal sulfates attack (ISA). **Revista Materia**, v. 21, n. 2, p. 342–354, 2016.

QIN, S. *et al.* A chemo-transport-damage model for concrete under external sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 132, p. 106048, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106048>. Acesso em: 16 abr. 2025.

QIN, S. *et al.* A failure thickness prediction model for concrete exposed to external sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 416, p. 135202, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135202>. Acesso em: 16 abr. 2025.

REHMAN, S. K. U. *et al.* Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 58–86, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SABBAĞ, N.; UYANIK, O. Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions. **Journal of Applied Geophysics**, v. 155, p. 13–25, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.007>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SALEEM, M. *et al.* Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 3, p. 209–214, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00078-X](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00078-X). Acesso em: 16 abr. 2025.

SAMSON, E.; MARCHAND, J. Modeling the transport of ions in unsaturated cement-based materials. **Computers and Structures**, v. 85, n. 23–24, p. 1740–1756, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.04.008>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 20–32, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.071>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 213–229, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.003>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 1178–1188, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.101>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Mechanism of sulfate attack: a fresh look: Part 2. Proposed mechanisms. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 3, p. 341–346, 2003. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884602009584>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Mechanism of sulfate attack: A fresh look - Part 1; Summary of experimental results. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p. 915–921, 2002a. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00724-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00724-X). Acesso em: 16 abr. 2025.

SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 4, p. 585–592, 2002b. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00727-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00727-X). Acesso em: 16 abr. 2025.

SHEVTSOV, D. S.; ZARTSYN, I. D.; KOMAROVA, E. S. Relation between resistivity of concrete and corrosion rate of reinforcing bars caused by galvanic cells in the presence of chloride. **Cement and Concrete Composites**, v. 119, p. 104026, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104026>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SILVEIRA, A, A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. **Sulfate attack on concrete**. New York: Spon Spress, 2002.

SOIVE, A.; TRAN, V. Q. External sulfate attack of cementitious materials: New insights gained through numerical modeling including dissolution/precipitation kinetics and surface complexation. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 263–272, 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.024>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SUN, D. *et al.* Deformation behaviour of concrete materials under the sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 232–241, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.050>. Acesso em: 16 abr. 2025.

TANG, Z. *et al.* Sulfate attack resistance of sustainable concrete incorporating various industrial solid wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 810–822, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.337>. Acesso em: 16 abr. 2025.

TANYILDIZI, H. Durability of concrete exposed to combined freeze-thaw, sulfate, and acid attacks after two years. **Revista de la Construcción**, v. 22, n. 1, p. 102–121, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.7764/RDLC.22.1.102>. Acesso em: 16 abr. 2025.

TIXIER, R.; MOBASHER, B. Modeling of Damage in Cement-Based Materials Subjected to External Sulfate Attack. I: Formulation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 4, p. 314–322, 2003a. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2003\)15:4\(314\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:4(314)). Acesso em: 16 abr. 2025.

TIXIER, R.; MOBASHER, B. Modeling of Damage in Cement-Based Materials Subjected to External Sulfate Attack. II: Comparison with Experiments. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 4, p. 314–322, 2003b. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2003\)15:4\(314\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:4(314)). Acesso em: 16 abr. 2025.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

UNE NORMALIZACION ESPAÑOLA. **UNE 83987 - Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido. Método multiregimen**. 2012a.

UNE NORMALIZACION ESPAÑOLA. **UNE 83988-2 - Durabilidad del hormigón – determinación de la resistividade – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner**. 2012b.

VILLAGRÁN ZACCARDI, Y. A. *et al.* Influence of temperature and humidity on Portland cement mortar resistivity monitored with inner sensors. **Materials and Corrosion**, v. 60, n. 4, p. 294–299, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/maco.200805075>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WANG, P. *et al.* A chemo-damage-transport model for chloride ions diffusion in cement-based materials: Combined effects of sulfate attack and temperature. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123121, 2021a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123121>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WANG, P. *et al.* A chemo-thermo-damage-transport model for concrete subjected to combined chloride-sulfate attack considering the effect of calcium leaching.

Construction and Building Materials, v. 306, p. 124918, 2021b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124918>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WANG, P. *et al.* Chemo-Damage-Transport Model of Combined Chloride-sulfate Attack in Concrete. **Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society**, v. 50, n. 2, p. 512–521, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.20210248>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WANG, Z. *et al.* Characterizing blended cement pastes under cyclic freeze–thaw actions by electrical resistivity. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 477–486, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.02.042>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WEI, X.; XIAO, L.; LI, Z. Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 341–346, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.111>. Acesso em: 16 abr. 2025.

WU, Q.; MA, Q.; HUANG, X. Mechanical properties and damage evolution of concrete materials considering sulfate attack. **Materials**, v. 14, n. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14092343>. Acesso em: 16 abr. 2025.

XU, P. *et al.* Influence of sulfate salt type on passive film of steel in simulated concrete pore solution. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 352–359, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.209>. Acesso em: 16 abr. 2025.

YAN, W. *et al.* Study on the service life prediction of freeze–thaw damaged concrete with high permeability and inorganic crystal waterproof agent additions based on ultrasonic velocity. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 120405, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120405>. Acesso em: 16 abr. 2025.

YANG, D. Y.; LUO, J. J. The damage of concrete under flexural loading and salt solution. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 129–134, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.019>. Acesso em: 16 abr. 2025.

YAO, J.; YANG, Y.; CHEN, J. A novel chemo-mechanical model for fracture toughness of mortar under sulfate attack. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 109, p. 102762, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102762>. Acesso em: 16 abr. 2025.

YIN, G. *et al.* Modeling of time-varying stress in concrete under axial loading and sulfate attack. **Computers and Concrete**, v. 19, n. 2, p. 143–152, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.2.143>. Acesso em: 16 abr. 2025.

YU, L. *et al.* Effects of Lightly Burnt MgO Expansive Agent on the Deformation and Microstructure of Reinforced Concrete Wall. **Advances in Materials Science and**

Engineering, v. 2019, p. 1–9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/1948123>. Acesso em: 16 abr. 2025.

YU, Y.; ZHANG, Y. X.; KHENNANE, A. Numerical modelling of degradation of cement-based materials under leaching and external sulfate attack. **Computers and Structures**, v. 158, p. 1–14, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.05.030>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ZHANG, C. *et al.* Mechanism and Performance Control Methods of Sulfate Attack on Concrete: A Review. **Materials**, v. 17, n. 19, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17194836>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ZHANG, W. M.; BA, H. J. Corrosion behaviour of electrode materials in chloride migration test. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v. 47, n. 6, p. 421–424, 2012.

ZHANG, Z. *et al.* Capillary rise height of sulfate in Portland-limestone cement concrete under physical attack: Experimental and modelling investigation. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p. 104299, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104299>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ZHENG, Y.; BAI, T.; LI, X. Bending Mechanical Model of Longitudinal Joint in Metro Shield Tunnel After Sulfate Attack. **Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University**, v. 48, n. 6, p. 821–830, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.19255>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ZHOU, Y. *et al.* Effect of sulfate attack on the stress–strain relationship of FRP-confined concrete. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 235–250, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.038>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ZHOU, Y. *et al.* Model for sulfate diffusion depth in concrete under complex aggressive environments and its experimental verification. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2015/693834>. Acesso em: 16 abr. 2025.