

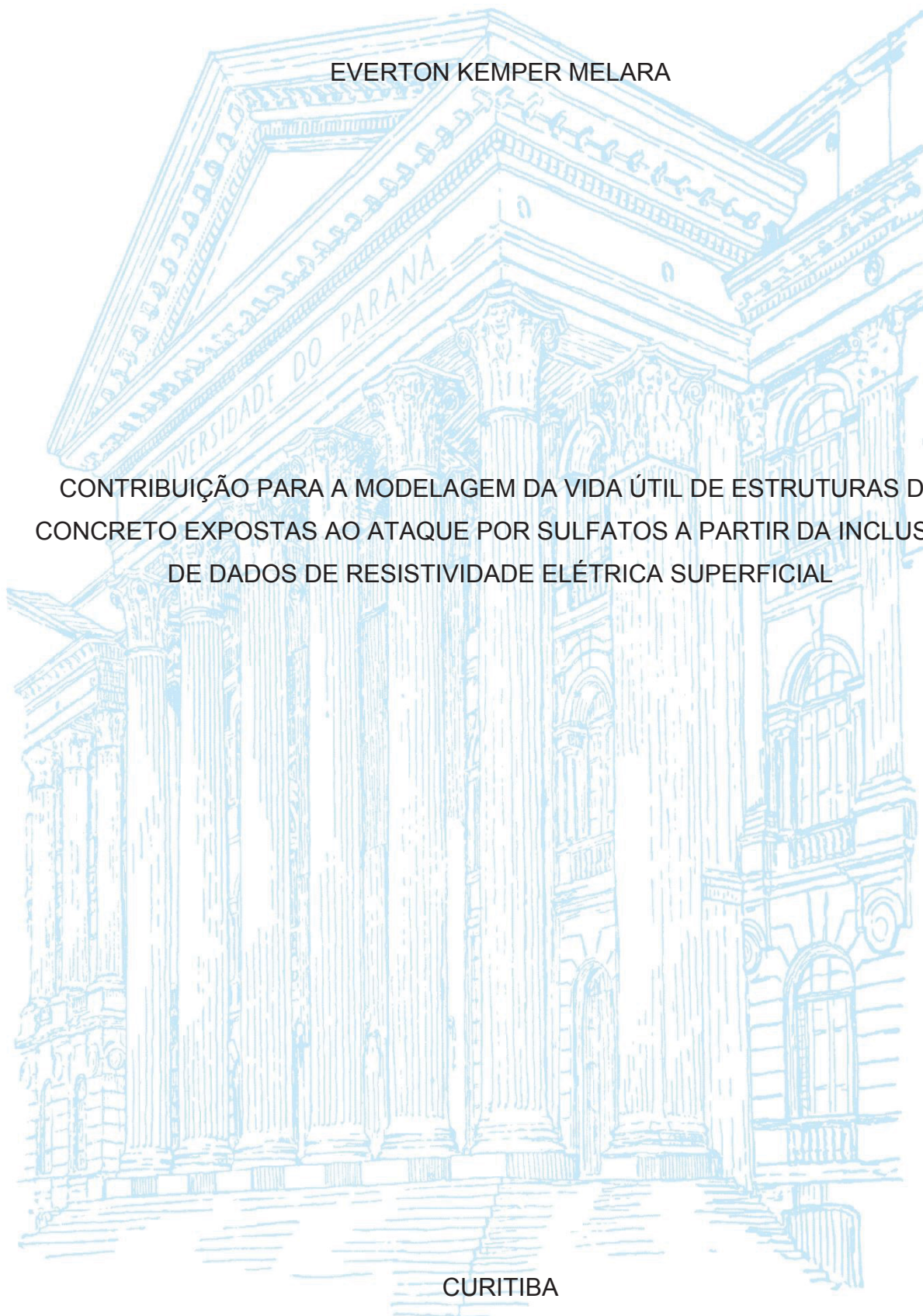
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EVERTON KEMPER MELARA

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

CURITIBA

2021



EVERTON KEMPER MELARA

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 apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração em Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná como requisito para qualificação à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros
Junior

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M517c Melara, Everton Kemper

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 [recurso eletrônico] / Everton Kemper Melara. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

Orientador: Ronaldo Alves de Medeiros Junior.

1. Modelagem. 2. Concreto. 3. Concreto de alta resistência. I. Universidade Federal do Paraná. II. Medeiros Junior, Ronaldo Alves de. III. Título.

CDD: 625.84

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **EVERTON KEMPER MELARA** intitulada: **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**, sob orientação do Prof. Dr. RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 16:14:44.0

RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 15:38:25.0

MARIANA D OREY GAIVAO PORTELLA BRAGANÇA

Avaliador Interno

Assinatura Eletrônica

25/08/2021 15:10:49.0

EDUARDO PEREIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3110 - E-mail: ppgecc@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 108569

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 108569

Dedico este trabalho aos familiares e amigos, que estiveram ao meu lado com amor e paciência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ronaldo A. de Medeiros Junior, pelo voto de confiança e por ter acreditado que esse sonho era possível. Agradeço pela orientação prestada, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou.

Agradeço imensamente aos meus pais, Rogério e Edina, e aos meus irmãos, Vinicius e Lorenzo, pelo amor, incentivo e apoio incondicional, sendo essenciais para que este objetivo pudesse ser atingido. Agradeço, também, as minhas tias Clariette e Roselene, que me acolheram e motivaram ao longo de toda esta jornada.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando, ajudando, torcendo e compartilhando de momentos de alegrias e dificuldades. Com vocês ao meu lado, conseguir forças para encarar qualquer desafio fica muito mais fácil. Meu imenso agradecimento.

Agradeço também a Prof.^a Dr.^a Mariana O. G. P. Bragança e ao Prof. Dr. Eduardo Pereira que aceitaram serem membros da banca avaliadora deste trabalho e compartilhar os seus conhecimentos e sugestões.

Agradeço aos técnicos do laboratório do LAME, bem como aos professores responsáveis, Prof. Dr. Marcelo H. F. Medeiros e Prof. Dr. Ricardo Pieralisi, pela ajuda prestada no desenvolvimento dos experimentos desta pesquisa, pela disponibilização do espaço, equipamentos e materiais. Também, agradeço ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-Labmu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pela ajuda na execução das técnicas microestruturais.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) e à Universidade Federal do Paraná (UFPR), por terem me possibilitado cursar o programa de mestrado em uma instituição pública e de qualidade. Estendo também meus agradecimentos à Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoa de Ensino Superior (CAPES), pelo apoio financeiro na forma de bolsa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação Araucária e a Agência Nacional de Águas (ANA), pela aquisição e doação de equipamentos; e a Cimento Itambé, Votorantim Cimentos, Exame Tecnologia e Penetron, pela doação de materiais que foram utilizados durante a pesquisa.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento dessa pesquisa, o meu sincero agradecimento.

“Olhem de novo esse ponto. É aqui, é a nossa casa, somos nós.”

Reflexões sobre o “Pálido Ponto Azul”. Carl Sagan.

RESUMO

A relação existente entre a resistividade elétrica superficial (RES) e as propriedades de transporte do concreto possibilita a sua utilização na modelagem do desempenho dos materiais frente a ação de agentes agressivos externos. Dessa forma, a presente pesquisa teve como objetivo explorar a modelagem do ataque externo por sulfatos, buscando utilizar a RES como parâmetro de entrada das equações em substituição ao coeficiente de difusão. Portanto, amostras de concreto foram moldadas com duas relações a/c (0,45 e 0,60) e expostas a ciclos de molhagem e secagem em solução de sulfato de sódio por um período de 140 dias (concentração de 10%, solução mantidas em 40 °C). Aos 28 dias da moldagem e nas datas de 28, 56, 112 e 140 dias de exposição aos sulfatos, foram realizados ensaios de absorção de água por imersão e RES. O coeficiente de difusão foi determinado através da segunda lei de Fick aplicada aos perfis de sulfatos determinados através de ensaios de titulação gravimétrica. Uma boa correlação entre a RES e o coeficiente de difusão foi encontrada ($R^2 = 0,83$). A evolução da RES foi interpretada por meio de perfis de sulfato e justificada pelos demais ensaios físicos. Um dos modelos proposto na literatura foi adotado para a previsão do avanço do ataque utilizando a RES em substituição ao coeficiente de difusão. Um segundo modelo, proposto para estudos em ataques por cloretos e carbonatação, foi testado para a avaliação do ataque por sulfatos. Os resultados mostraram erros de provisão abaixo de 10%, os quais foram considerados aceitáveis dada a intrínseca variabilidade do concreto e a sensibilidade do ensaio de resistividade elétrica.

Palavras-chave: Resistividade elétrica superficial. Ataque externo de sulfatos. Modelagem. Migração de sulfatos.

ABSTRACT

The relationship between the electrical resistivity (SER) of concretes and its transport properties allows for its application in service-life modelling of structures subjected to degradation by external aggressive agents. Therefore, the objective of this research is to explore the modelling of external sulfate attack (ESA) using SER data as an input parameter of the equations by replacing the diffusion coefficient. Concrete specimens were cast with two w/c ratios (0.45 and 0.60) and exposed to dry-wetting cycles in sodium sulfate solutions for a period of 140 days (10% concentration, solution kept in 40 °C). At the age of 28 days and after 28, 56, 112 and 140 days of exposure to sulfates the water absorption by immersion and SER were evaluated. The diffusion coefficient was then determined by Fick's law of diffusion. In addition, on the dates aforementioned, sulfate profiles were determined by chemical titration. A good relationship between SER and the diffusion coefficient was determined, proving the possibility of using SER data for sulfate attack modelling. The evolution of SER was interpreted through the sulfate profiles and justified by the other physical tests. One of the existing models in the literature was adopted to predict the advance of the sulfate attack using the SER data as a replacement for the diffusion coefficient. Also, an existing model for chloride and carbonation analysis was evaluated for ESA modelling. For both analysis, results showed errors varying around 10%, which were considered acceptable.

Key-words: Surface electric resistivity. External sulfate attack. Modelling. Migration of sulfates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Método dos Quatro Pontos ou Método de Wenner.	26
Figura 2 – Efeitos da geometria do corpo de prova nas medidas da resistividade elétrica superficial.....	28
Figura 3 – Influência do tipo de cimento na RES do concreto.....	31
Figura 4 – Efeito da carbonatação na resistividade elétrica de concretos com diferentes relações água/cimento.....	36
Figura 5 – Evolução da resistividade elétrica do concreto exposto a ciclos de molhagem e secagem com (a) água, (b) cloretos, (c) sulfatos e (d) cloretos e sulfatos.....	38
Figura 6 – Formação de cristais de gipsita nas paredes dos poros de um concreto exposto ao ataque externo por sulfatos.	49
Figura 7 – Microscopias de barras de argamassas contaminadas com pirita após 42 dias de envelhecimento natural, com detalhe para (a) microfissuras na pasta, e (b) formação de etringita.....	51
Figura 8 – Expansão radial de argamassas imersas em solução de 3% de Na ₂ SO ₄	53
Figura 9 – Etapas da degradação do ataque por sulfato de sódio.	56
Figura 10 – Resumo do mecanismo do ataque por sulfato de sódio.....	57
Figura 11 – Análises de DRX para diferentes profundidades de concretos expostos ao ataque externo por sulfatos: (a) 180 dias, (b) 360 dias.	58
Figura 12 – Micrografias mostrando a deterioração em camadas em argamassas expostas ao ataque externo por sulfatos.....	59
Figura 13 – Fluxo de trabalho da pesquisa.	74
Figura 14 – Fluxograma do planejamento experimental da pesquisa.	77
Figura 15 – Curva granulométrica do agregado miúdo.	80
Figura 16 – Curva granulométrica do agregado miúdo.	81
Figura 17 - Aspecto dos corpos de prova após a impermeabilização.	84
Figura 18 – Sistema arduino para controle da temperatura da solução de sulfatos.	87
Figura 19 – Coleta da amostra de titulação: (a) corpo de prova original, (b) áreas delimitadas e (c) furos para coleta das amostras.	90

Figura 20 – Preparo da amostra para o ensaio de titulação: (a) adição de água destilada, (b) adição de ácido clorídrico e (c) após a fervura.	91
Figura 21 – Precipitação dos sulfatos: (a) adição de cloreto de bário, (b) papel filtro antes da queima e (c) papel filtro após a queima.	93
Figura 22 – Representação de um perfil típico de difusão de sulfatos.	94
Figura 23 - Resistência à compressão axial dos concretos estudados: (a) Traço A e (b) Traço B.	98
Figura 24 – Processos de densificação e degradação do concreto: (a) densificação pelo preenchimento dos poros e (b) fissuras causadas por pressões internas.	100
Figura 25 - Microscopia das amostras do Traço A aos 168 dias. Detalhe para a formação de etringita nos poros do concreto.	100
Figura 26 - Aspecto visual dos corpos de prova após o envelhecimento acelerado.	101
Figura 27 - Aspecto visual dos corpos de prova: (a) aos 28 dias e (b) aos 168 dias.	102
Figura 28 - Aspecto visual da impermeabilização ao final do programa experimental.	103
Figura 29 - Aspecto visual das amostras de referência ao final do programa experimental.	103
Figura 30 – Absorção por imersão: (a) Traço A e (b) Traço B.	104
Figura 31 – Micrografias do Traço A: (a) poro aos 28 dias, sem a presença de subprodutos, e (b) poro aos 140 dias, preenchido por etringita. O EDS de caracterização do subproduto é apresentado juntamente à micrografia.	106
Figura 32 – Resistividade elétrica superficial: (a) Traço A e (b) Traço B.	108
Figura 33 - Microscopia de amostra do Traço A, aos 56 dias, apresentando a formação de gipsita nos poros do concreto.	109
Figura 34 – Análise da correlação entre a RES e a absorção por imersão: (a) Traço A e (b) Traço B.	111
Figura 35 - Relação entre a RES e a absorção por imersão para o Traço A: condições de (a) referência e (b) exposição a solução de sulfato de sódio.	112
Figura 36 - Relação entre a RES e a absorção por imersão para o Traço B: condições de (a) referência e (b) exposição a solução de sulfato de sódio.	112

Figura 37 – Concentração de sulfatos no Traço A: (a) 56 dias, (b) 84 dias, (c) 140 dias e (d) 168 dias.....	114
Figura 38 – Concentração de sulfatos no Traço B: (a) 56 dias, (b) 84 dias, (c) 140 dias e (d) 168 dias.....	115
Figura 39 – Variação da concentração de sulfatos no Traço A.....	116
Figura 40 – Variação da concentração de sulfatos no Traço B.....	116
Figura 41 – Comparação entre os perfis de sulfato para o Traço A e o Traço B: (a) 56 dias, (b) 84 dias, (c) 140 dias e (d) 168 dias.	117
Figura 42 - RES das amostras expostas à solução de sulfato de sódio.....	118
Figura 43 - Variação do coeficiente de difusão no tempo.	121
Figura 44 – Relação entre a RES e o coeficiente de difusão: (a) Traço A; (b) Traço B.	122
Figura 45 - Correlação entre a RES e o coeficiente de difusão.....	123
Figura 46 – Curvas de difusão definidas pela segunda lei de Fick: Traço A	125
Figura 47 – Curvas de difusão definidas pela segunda lei de Fick: Traço B	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de forma para diferentes tamanhos de corpo de prova.....	28
Tabela 2 – Modelos empíricos para a previsão do ataque externo por sulfatos.	60
Tabela 3 – Referências bibliográficas de modelos desenvolvidos nos últimos anos.	63
Tabela 4 – Caracterização química do cimento CP V-ARI.....	78
Tabela 5 – Caracterização física do cimento CP V-ARI	79
Tabela 6 – Caracterização física do agregado miúdo.	79
Tabela 7 – Caracterização física do agregado graúdo.....	80
Tabela 8 – Dimensões e quantidades dos corpos de prova.....	82
Tabela 9 – Detalhe dos traços empregados nas dosagens.	83
Tabela 10 – Propriedades do concreto no estado fresco.	84
Tabela 11 – Descrição do processo de ciclagem.....	86
Tabela 12 – Idades e quantidades de corpos de prova por ensaio.	88
Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para a absorção de água por imersão.	105
Tabela 14 – Comparação de médias para o ensaio de absorção de água por imersão.....	105
Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para a Resistividade Elétrica Superficial.	110
Tabela 16 – Comparação de médias para o ensaio de Resistividade Elétrica Superficial.....	110
Tabela 17 – Coeficientes de difusão definidos através da segunda lei de Fick	119
Tabela 18 - Profundidades de difusão dos íons sulfato.....	126
Tabela 19 – Resumo das variáveis utilizadas no modelo de Zhou et al. (2015).	127
Tabela 20 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada. Considerando um valor de " η " diferente para cada traço.	128
Tabela 21 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada. Considerando um valor médio de " η ".	129
Tabela 22 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada utilizando a RES na modelagem. Considerando um valor de " η " diferente para cada traço.	130

Tabela 23 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada utilizando a RES na modelagem. Considerando um valor médio de " η " = 0,987.	131
Tabela 24 – Resumo das variáveis utilizadas no modelo de Andrade (2004).	133
Tabela 25 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada.	133
Tabela 26 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada.	133

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO	19
1.2	HIPÓTESE	19
1.3	JUSTIFICATIVA	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFÍCIAL	23
2.1.1	Métodos de medida da resistividade elétrica	25
2.1.2	Fatores que influenciam na resistividade elétrica do concreto	29
2.1.3	A RES como parâmetro de durabilidade	39
2.1.4	Modelo de Andrade (2004)	41
2.1.5	Discussão final sobre a resistividade elétrica do concreto.....	43
2.2	ATAQUE POR SULFATOS	45
2.2.1	Mecanismo de Degradação do Ataque por Sulfatos.....	48
2.2.2	Ataque Externo por Sulfato de Sódio.....	54
2.2.3	Modelagem do Ataque Externo por Sulfatos	60
2.2.4	Discussão final sobre o ataque por sulfatos	71
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	74
3.1	FLUXO DE TRABALHO	74
3.2	VARIÁVEIS DE ANÁLISE	75
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	78
3.4	DIMENSÕES E QUANTIDADE DOS CORPOS DE PROVA	81
3.5	DOSAGEM E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	82
3.6	SOLUÇÃO DE SULFATO DE SÓDIO.....	85
3.7	CICLAGEM E ACONDICIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA	85
3.8	METODOLOGIA DOS ENSAIOS	87

3.8.1	Resistência à compressão axial	88
3.8.2	Absorção de água por imersão.....	89
3.8.3	Titulação gravimétrica de sulfatos	89
3.8.4	Resistividade elétrica superficial.....	95
3.8.5	Proposta de adaptação ao modelo de Zhou <i>et al.</i> (2015).....	96
3.8.6	Aplicação do modelo de Andrade (2004).....	96
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	98
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	98
4.2	ASPECTO VISUAL DOS CORPOS DE PROVA.....	101
4.3	ABSORÇÃO POR IMERSÃO.....	104
4.4	RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL	107
4.5	TITULAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE SULFATOS	113
4.6	MODELAGEM DO ATAQUE POR SULFATOS	118
4.6.1	Coeficiente de difusão	119
4.6.2	Profundidade de difusão nos perfis de sulfato.....	124
4.6.3	Modelo de Zhou <i>et al.</i> (2015).....	126
4.6.4	Uso da RES no modelo de Zhou <i>et al.</i> (2015).....	129
4.6.5	Modelo de Andrade (2004).....	131
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
5.1	CONCLUSÕES	135
5.2	PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	137
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
6	REFERÊNCIAS.....	139

1 INTRODUÇÃO

Na construção civil mundial, é comum que estruturas se deteriorem precocemente, não alcançando sua vida útil de projeto (MEDEIROS-JUNIOR, 2014). São vários os fatores que causam a perda de durabilidade do concreto. Dentre eles, pode-se destacar a interação do material com o ambiente ao qual está inserido como um dos mais importantes (TROIAN, 2010). De forma geral, não se pode alterar as características do ambiente ao qual a estrutura está exposta. Por isso, se tenta mitigar a ação dos agentes agressivos por meio do controle de propriedades intrínsecas ao próprio concreto, como a redução da permeabilidade, uso de cimentos especiais, ou até pelo isolamento das superfícies externas.

As características fundamentais de uma estrutura de construção civil são sua capacidade de resistência aos esforços solicitantes e sua durabilidade (PETRONILHO; SÍGOLO, 2011). Como definido na NBR 15575 (ABNT, 2013), a durabilidade das edificações e de seus sistemas complementares é uma exigência econômica do usuário, pois está diretamente associada ao custo global do bem imóvel.

No que diz respeito à resistência e estabilidade das estruturas, têm-se um conhecimento teórico já bem desenvolvido e consolidado. Diversas são as técnicas existentes para dosagem e projeto de concretos buscando atingir uma determinada resistência mecânica (ANDRADE; D'ANDREA, 2010). Todavia, apesar dos parâmetros de durabilidade previstos em normativas e cadernos técnicos, é comum que estruturas expostas a ambientes agressivos tenham sua vida útil atingida após poucos anos (MEDEIROS-JUNIOR, 2014).

Esta dificuldade se justifica pelos diferentes mecanismos de degradação que cada agente agressivo ataca o concreto e pelas diferentes abordagens de mitigação que cada processo demanda. Por exemplo, a utilização de uma técnica para o tratamento de um processo de degradação pode ser o fator iniciante ou um acelerador de outra condição, como é o caso da utilização de cimentos ricos em cálcio-aluminatos para mitigar o avanço da penetração de cloretos, que podem acelerar a deterioração causada pelo ataque por sulfatos.

O ataque por sulfatos é um complexo mecanismos de degradação que envolve uma série de reações químicas entre os íons sulfato e as fases hidratadas da matriz cimentícia. Essas reações são capazes de causar a fissuração, expansão e deslocamento do concreto. Diversos autores apontam o ataque por sulfatos como um dos processos de degradação mais destrutivo às estruturas de concreto armado e, por isso, é crescente o número de pesquisas em desenvolvimento acerca dos mecanismos e prevenção deste ataque (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; NEVILLE, 2004; IKUMI, 2017; SUN *et al.*, 2019).

Pela complexidade do mecanismo de degradação do ataque por sulfatos, a recuperação de estruturas em estágio avançado de deterioração reflete em grandes ônus de recursos financeiros, pessoais e materiais (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; HOPPE-FILHO *et al.*, 2015). Por isso, grande interesse é dado em pesquisas que contribuam para o entendimento da prevenção e modelagem deste ataque (ANDRADE *et al.*, 2009; IKUMI *et al.*, 2014).

Os modelos de previsão de vida útil surgem como uma opção para a concepção e dimensionamento de estruturas de concreto a partir do conceito de durabilidade (MEDEIROS-JUNIOR, 2014). Estes modelos buscam relacionar, por meio de equações matemáticas, os parâmetros que regem o desempenho das estruturas frente à ação de agentes agressivos, de forma a melhor entender como elas se comportarão ao longo de sua vida útil (ANDRADE *et al.* 2009).

Segundo Andrade *et al.* (2009) e Ikumi *et al.* (2016), por ser uma área de interesse recente, ainda existem lacunas do conhecimento técnico-científico acerca da modelagem de vida útil que precisam ser preenchidas através de estudos teóricos e experimentais para que se desenvolvam modelos matemáticos precisos, práticos, e que consigam refletir as condições da construção civil.

Dentre as principais dificuldades verificadas para a consolidação destes modelos, Andrade *et al.* (2009) citam a grande variabilidade dos parâmetros ambientais, a imensa variedade de materiais empregados na construção civil, a carência e fragmentação de dados de pesquisa, e a falta de comprovações experimentais representativas para estruturas reais.

A Resistividade Elétrica Superficial (RES) do concreto é uma medida indireta da conectividade dos poros do material, relacionada com a facilidade de penetração de agentes agressivos no concreto (ANDRADE; D'ANDREA, 2010). A sua determinação é feita a partir de ensaios relativamente rápidos e não-destrutivos. O ensaio permite o acompanhamento contínuo de algumas propriedades do material ao longo do tempo, sem nenhum impacto sobre essas (MEDEIROS-JUNIOR, 2014).

Diante deste cenário, a incorporação de dados de resistividade elétrica como parâmetro de entrada nos modelos de previsão de vida útil pode se mostrar uma possibilidade de aumentar a representatividade dos resultados, devido a facilidade de obtenção dos dados em campo e a possibilidade de acompanhamento contínuo ao longo do tempo.

1.1 OBJETIVO

A presente pesquisa tem como objetivo investigar a viabilidade da utilização de dados da resistividade elétrica superficial do concreto como parâmetro de durabilidade na modelagem da vida útil de estruturas expostas ao ataque externo de sulfatos. Para tanto, os modelos propostos por Andrade (2004) e Zhou *et al.* (2015) foram adotados.

Tem-se como objetivo secundário da pesquisa a identificação de uma relação entre a RES do concreto e o coeficiente de difusão de sulfatos. Dessa forma, a RES pode passar a ser empregada como um parâmetro relacionado às propriedades de transporte do concreto durante a ação de agentes agressivos.

1.2 HIPÓTESE

Sendo a Resistividade Elétrica Superficial (RES) um indicativo indireto de características físicas e químicas do concreto, adota-se como hipótese da presente pesquisa que a mesma pode ser utilizada como parâmetro de entrada em modelos matemáticos de predição da entrada de sulfatos no concreto.

A resistividade elétrica de um material pode ser relacionada com o movimento de cargas elétricas em seu interior através de uma das leis de Einstein, que define uma relação inversamente proporcional entre a RES e o coeficiente de difusão.

A relação entre a resistividade elétrica e o coeficiente de difusão de cloretos já é bem definida, sendo empregada com sucesso por Andrade (2004), Andrade e D'Andrea (2010), D'Andrea (2010), Andrade e D'Andrea (2011), Medeiros-Junior (2014) e Mendes *et al.* (2018). Todavia, a relação entre a resistividade elétrica e o coeficiente de difusão de sulfatos ainda não é bem definida, sendo poucas as pesquisas desenvolvidas acerca do assunto (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2019).

1.3 JUSTIFICATIVA

Segundo dados do Sumário de Commodities Minerais (USGS, 2020), estima-se que cerca de 50 bilhões de toneladas de concreto são produzidas anualmente, fazendo do concreto um dos materiais mais consumidos no planeta. A ampla utilização do concreto como material de construção é justificada pelo seu baixo custo e boa resistência mecânica e química, principalmente em relação à ação da água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, o concreto fresco é um material fluído, capaz de ser moldado nos mais diversos formatos.

A praticidade de aplicação e bom desempenho mecânico possibilitam o uso do concreto nos mais diversos ambientes, tais como barragens, edifícios, viadutos, tanques, etc. Para cada situação, o concreto é sujeito às mais variadas condições ambientais, expostos a elementos que podem ser prejudiciais ao seu desempenho, como no caso de estruturas industriais e de armazenamento de resíduos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Apesar do bom desempenho do concreto, sua durabilidade pode ser limitada. Diversos fatores podem levar à perda de durabilidade e comprometer o desempenho do concreto; dentre eles, destaca-se a ação de agentes agressivos presentes no ambiente, como os íons sulfato e íons cloreto (TROIAN, 2010). A deterioração precoce do concreto implica na necessidade de reparos e recuperações, consumindo

uma grande quantidade de recursos, gerando resíduos e contribuindo para emissões prejudiciais ao ambiente.

Um movimento na direção da sustentabilidade na construção civil pode ser observado na inserção de parâmetros de vida útil nas exigências dos códigos normativos do setor, que passa a adotar a durabilidade como parâmetro de projeto. Entretanto, os parâmetros mantêm uma abordagem prescritiva, sendo por muitas vezes insuficientes em garantir a vida útil esperada para estruturas de concreto em meios agressivos (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014).

Os modelos de previsão da vida útil de estruturas tentam relacionar por modelagem matemática os parâmetros que regem o desempenho do concreto frente a ação do ambiente, de forma a prever o seu comportamento ao longo do tempo (ANDRADE *et al.* 2009). Do ponto de vista da sustentabilidade, estruturas mais duráveis refletem em um menor consumo de recursos naturais e energia envolvidos nos processos de reparo e recuperação.

Entretanto, apesar do grande interesse do setor e da grande quantidade de estudos, a incorporação destes métodos em situações reais ainda é lenta (ANDRADE; D'ANDREA, 2010), principalmente devido falta de parametrização dos dados de entrada e também, a dificuldade da obtenção de alguns destes parâmetros, que muitas vezes demandam complexos ensaios laboratoriais (ANDRADE *et al.*, 2009).

A incorporação da RES nos modelos de previsão de vida útil vem sendo um caminho muito estudado nos últimos anos (MENDES *et al.*, 2018). A Resistividade Elétrica Superficial (RES) do concreto pode ser entendida como a habilidade do material em carregar cargas elétricas. No concreto, a resistividade é uma medida indireta da conectividade dos poros do material (ANDRADE; D'ANDREA, 2010), indicando a facilidade de penetração de agentes agressivos (MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016). Destaca-se o modelo de Andrade (2004), que utiliza a RES como parâmetro base para a modelagem da vida útil de estruturas frente a ação de íons cloreto e carbonatação. Entretanto, ainda não se encontram propostas de modelos que utilizem a RES para prever o comportamento de estruturas de concreto expostas ao ataque por sulfatos.

O ataque por sulfatos é um dos mecanismos de degradação mais agressivo e destrutivo ao concreto, sendo um dos principais fatores que leva a deterioração

precoce das estruturas (ZHOU *et al.* 2015). O entendimento deste mecanismo é complexo e envolve uma série de reações físicas e químicas entre os íons sulfato e as fases da matriz cimentícia hidratada. Por isso, os requisitos apresentados nas normas de desempenho tendem a ser simplificados para garantir o pleno entendimento do problema.

Diante do cenário, percebe-se uma oportunidade de desenvolvimento de um estudo inovador, contribuindo para o desenvolvimento do conhecimento técnico-científico na modelagem do ataque externo por sulfatos em estruturas de concreto armado com a inclusão da RES.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão discutidos os principais fundamentos teóricos que basearam o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, será apresentada a técnica da Resistividade Elétrica Superficial (RES), onde serão abordadas suas definições, os fatores que a influenciam e os métodos para medida experimental. Será também abordada a possibilidade da adoção dos dados de RES como parâmetro de durabilidade do concreto.

Em seguida, será feita uma conceituação do ataque por sulfatos no concreto, abordando seus mecanismos, manifestações e consequências. Serão estudados os parâmetros que influenciam na velocidade de degradação, as metodologias preventivas e mitigatórias, e alguns dos modelos de previsão deste ataque desenvolvidos nos últimos anos.

2.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFÍCIAL

A resistividade elétrica é uma propriedade dos materiais que está relacionada com sua habilidade em carregar cargas elétricas em seu interior (HALLIDAY; RESNICK, 1994). A resistividade elétrica (ρ), medida em $\Omega.m$ (*ohm* vezes metro), é o inverso da condutividade, e está diretamente relacionada com a resistência a passagem de corrente elétrica do material, como verificado pela Equação (1).

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (1)$$

Onde R é a resistência elétrica do material (Ω), L o comprimento do material (m) e A é a área da seção do material (m^2). Da lei de Ohm, sabe-se que a tensão (V) é proporcional a corrente elétrica (I) que o atravessa, como demonstrado na Equação (2).

Assim, a resistência elétrica pode ser obtida pela aplicação de uma diferença de potencial (V) entre dois pontos e pela medida da corrente resultante (I). Da

resistência elétrica, a resistividade elétrica pode ser calculada pela Equação (1), conhecidos os parâmetros do material.

$$V = R \times I \quad (2)$$

Dos conceitos de eletromagnetismo, sabe-se que a aplicação de uma diferença de potencial cria um fluxo de corrente, onde os elétrons se movimentam em direção ao polo positivo (HALLIDAY; RESNICK, 1994). No concreto, a corrente é formada pelo movimento dos íons através de sua rede de poros (MONFORE, 1968; SHEKARCHI *et al.*, 2004). Portanto, a resistividade elétrica do concreto é a propriedade que indica a facilidade dos íons se moverem no material através de sua solução aquosa presente nos poros (POLDER, 2001; LENCIONI, 2011; MEDEIROS-JUNIOR, 2014).

Dessa forma, a resistividade elétrica é diretamente ligada a configuração da rede de poros do concreto (quantidade, tamanho e interconectividade) e com o grau de saturação dos mesmos, sendo influenciada primordialmente pela composição química da solução nos poros e pelo teor de umidade do concreto (ZACCARDI *et al.* 2009).

O teor de umidade é importante por dois motivos. Primeiramente, a água é responsável por dissolver as fases solúveis da matriz cimentícia, deixando íons livres e aumentando o potencial eletrolítico da solução dos poros (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em segundo lugar, a água é também o meio pelo qual os íons se movimentam quando expostos à diferença de potencial, então, quanto maior a saturação da rede poros, menor será a resistência elétrica do concreto (WHITTINGTON; MCCARTER; FORDE, 1981; POLDER, 2001).

Sendo então a resistividade elétrica altamente influenciada pelo teor de umidade do concreto, Lencioni (2011) destaca a importância de se definir duas zonas distintas em uma peça de concreto: a zona superficial, referente aos primeiros centímetros do concreto, que está diretamente exposta ao ambiente e ciclos permanentes de molhagem e secagem, e, portanto, a resistividade poderá variar significativamente em curtos períodos de tempo em função da variação da condição de saturação da rede de poros. Por sua vez, a zona interna do concreto,

correspondente ao centro da peça, apresenta maior estabilidade quanto à presença de água, onde a umidade e, conseqüentemente, a resistividade tende a não variar significativamente em curtos períodos de tempo.

Em estudos sobre a resistividade elétrica que envolvem também processos de degradação originados pela ação de agentes agressivos externos, como os íons cloreto, íons sulfato e dióxido de carbono, maior interesse é dado à avaliação da resistividade elétrica na camada mais superficial através de métodos de ensaios específicos. Quando esta abordagem é adotada, convencionou-se denominar esta propriedade como Resistividade Elétrica Superficial (RES).

2.1.1 Métodos de medida da resistividade elétrica

Experimentalmente, a resistividade elétrica do concreto pode ser medida por meio de vários métodos; dentre os ensaios mais presentes na literatura nacional e internacional, pode-se citar: método do eletrodo externo, método dos dois pontos, método direto, método da resistividade volumétrica e método dos quatro pontos, sendo este último o mais utilizado na literatura para estudos em concreto.

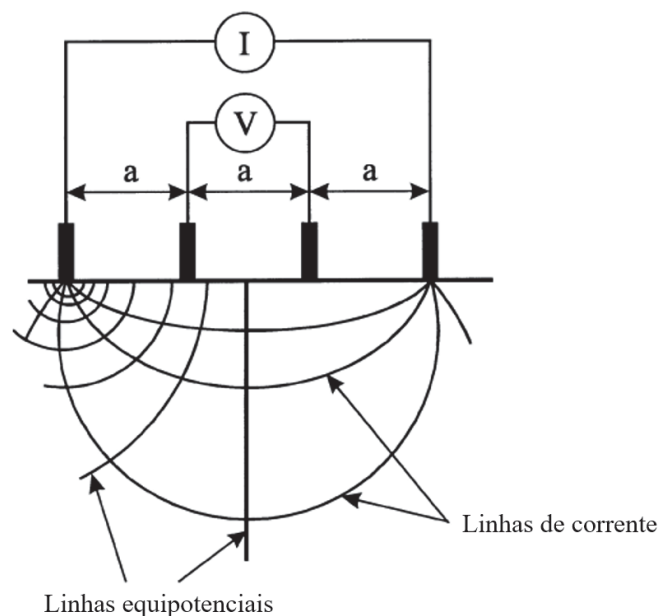
De forma a não replicar trabalhos consagrados que apresentam em profundidade cada um dos métodos de ensaio, para aprofundamento nestes métodos indicam-se os trabalhos de Polder (2001) e Lencioni (2011) que descrevem com excelência cada um dos ensaios citados. Como exceção, o Método dos Quatro Pontos (método de Wenner) será apresentado em detalhe, por se tratar de objeto de estudo na presente dissertação.

O método dos quatro pontos, ou método de Wenner, é o teste mais empregado no Brasil e no mundo para a medida de resistividade elétrica superficial de concretos, sendo padronizado pela norma espanhola UNE 83988-2 (2014). Inicialmente, esta técnica foi proposta e muito utilizada para a medida da resistividade elétrica de solos, sendo essa aplicação normalizada pela NBR 7117 (ABNT, 2020). O método foi adaptado para a aplicação em concretos e, mesmo ainda não possuindo uma normalização nacional, tem seu uso amplamente difundido na comunidade

profissional e acadêmica (GOWERS; MILLARD, 1999; LENCIONI, 2011; MEDEIROS-JUNIOR, 2014; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2019).

O método de ensaio consiste no posicionamento de quatro eletrodos em linha e de forma equidistantes na superfície do concreto; uma corrente é aplicada através dos dois eletrodos mais externos e mede-se a diferença de potencial formada entre os dois eletrodos internos (UNE 83988-2, 2014). A configuração do ensaio é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Método dos Quatro Pontos ou Método de Wenner.



Fonte: Traduzido de Gowers e Millard (1999).

A partir da tensão medida pelos eletrodos internos, a resistividade pode ser calculada através da Lei de Ohm, como apresentado na Equação (3), onde a é o espaçamento entre os eletrodos (m)

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

Segundo Santos (2006), uma vantagem associada a esta técnica é a limitação da área de estudo para a material compreendido entre os eletrodos internos, obtendo medidas localizadas e menos generalizadas. Todavia, Gowers e Millard (1999) destacam que o espaçamento entre os eletrodos deve ser maior que o 1,5 vezes o tamanho máximo do agregado, para reduzir o seu efeito nas leituras (MILLARD, 1991; SANTOS, 2006).

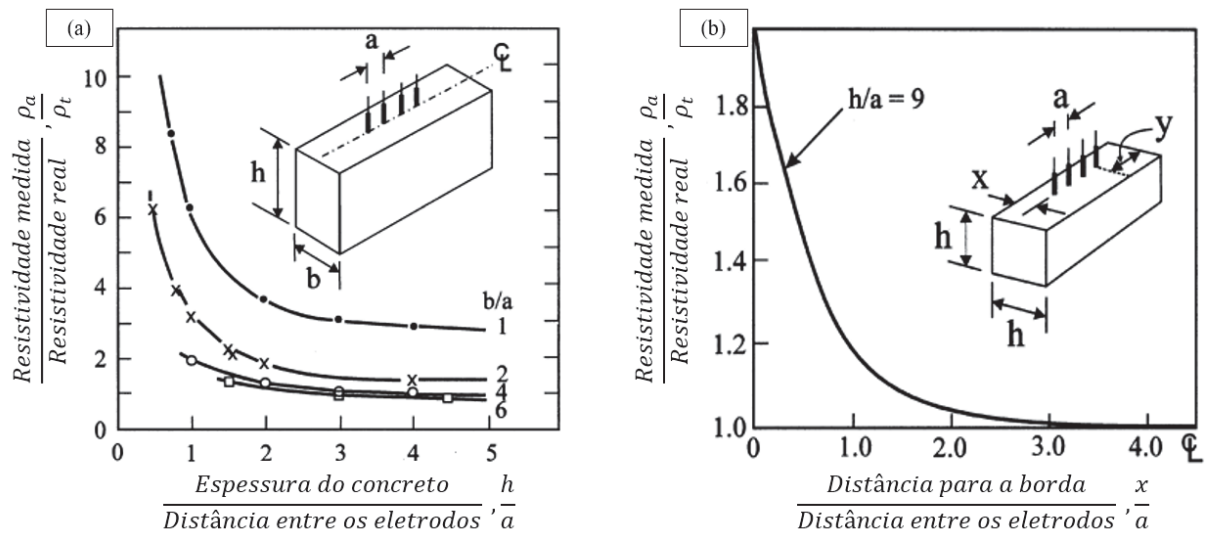
Uma das hipóteses do método dos quatro pontos é a existência de um meio semi-infinito, no qual a corrente aplicada se propaga uniformemente em todas as direções. A medida da resistividade próximo às extremidades da peça de concreto, ou em peças muito esbeltas, podem levar a erros significativos nas leituras (GOWERS; MILLARD, 1999; WHITTING; NAGI, 2003). Na Figura 2 são apresentados os efeitos da geometria do corpo de prova nas leituras de resistividade, conforme apresentados por Gowers e Millard (1999).

A partir dos resultados apresentados na Figura 2, Gowers e Millard (1999) sugerem que a espessura do concreto deve ser de no mínimo 4 vezes a distância entre os eletrodos, e que as leituras devem ser realizadas a uma distância da borda igual a duas vezes o espaçamento entre os eletrodos.

De forma a permitir a aplicação deste método em peças de menores dimensões, como no caso de corpos de prova em laboratório, foram estabelecidos fatores de forma que buscam corrigir leituras feitas em amostras de pequenas dimensões para valores obtidos em meios semi-infinitos. A Tabela 1 apresenta os fatores de forma listados na norma espanhola UNE 83988-2 (2014).

Atualmente, existem aparelhos comerciais de pequeno porte que facilitam a execução do ensaio em campo e em laboratório, sendo esta uma das principais vantagens deste método. Dessa forma, esta metodologia de ensaio se destaca por permitir que se realize o monitoramento contínuo da resistividade elétrica de uma mesma peça de concreto durante longos períodos de tempo de forma rápida e não destrutiva (ANDRADE; D'ANDREA, 2011; ANDRADE; D'ANDREA; REBOLLEDO, 2014).

Figura 2 – Efeitos da geometria do corpo de prova nas medidas da resistividade elétrica superficial.



Fonte: Traduzido de Gowers e Millard (1999)

Tabela 1 – Fator de forma para diferentes tamanhos de corpo de prova.

Formato do corpo de prova	a = 3,5 cm	a = 5 cm
Cilíndrico (30 x 15 cm)	0,714	0,606
Cilíndrico (20 x 10 cm)	0,571	0,377
Cilíndrico (15 x 7,5 cm)	0,384	-
Prismático (4 x 4 x 16 cm)	0,172	-

Nota: "a: distância entre os eletrodos"

Fonte: Traduzido de UNE 83988-2 (2014)

Apesar da simplicidade e praticidade do método, alguns detalhes devem ser observados para garantir que a qualidade dos resultados obtidos. Na seção 2.1.2 serão discutidos alguns dos principais fatores que podem influenciar nas leituras de resistividade elétrica de concretos.

2.1.2 Fatores que influenciam na resistividade elétrica do concreto

A resistividade elétrica do concreto é diretamente influenciada pela sua microestrutura, pela composição química da solução dos poros e pelo grau de saturação das redes de poro. Pequenas variações nestes parâmetros podem resultar em significativas variações na resistividade elétrica medida, tanto para mais quanto para menos, levando a interpretações errôneas do desempenho do concreto.

Dentro dos fatores que intervêm nas leituras da resistividade elétrica do concreto, pode-se fazer a distinção de dois grupos: (a) fatores intrínsecos ao concreto, ou seja, aqueles relacionados ao material concreto e a sua composição física e química; e (b) fatores extrínsecos ao concreto, ou seja, as condições ambientais às quais o material está exposto. Estes fatores serão discutidos em detalhe na sequência.

a) Relação água/cimento:

A relação água/cimento (a/c) afeta diretamente a microestrutura do concreto, sendo possível definir uma relação proporcional entre a relação a/c e a porosidade do concreto (SANTOS, 2006; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Com um maior volume de poros, se formam caminhos que facilitam a movimentação dos íons no interior do concreto, reduzindo a resistividade elétrica do material (SANTOS, 2006; LENCIONI, 2011). A quantidade de água utilizada durante a dosagem também regula a disponibilidade de água livre nos poros, que funciona como o condutor/eletrólito por onde os íons livres se movimentam (LENCIONI, 2011).

A influência da relação a/c na resistividade elétrica de concretos já foi exaustivamente estudada ao longo dos anos. Pesquisas desenvolvidas por Hoppe (2005), Lencioni (2011), Medeiros-Junior *et al.* (2014), Medeiros-Junior e Lima (2016), e tantos outros, concluem que quanto maior a relação água/cimento do concreto, menor será sua resistividade elétrica nas idades iniciais.

Todavia, esta relação não pode ser extrapolada genericamente para considerações a longo prazo. Segundo Medeiros-Junior e Lima (2016), a alta porosidade obtida com maiores relações a/c deixa o concreto mais susceptível à ação da carbonatação, que, a longo prazo, pode causar o aumento da RES.

b) Tipo e consumo de cimento:

O mercado nacional de cimentos disponibiliza diversos de tipos de cimentos com as mais variadas composições e adições minerais. Estas diferentes composições químicas e físicas resultam em diferentes microestruturas e propriedades no concreto endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A composição dos cimentos (presença de adições, teor de álcalis, teor de aluminato tricálcico, etc.) altera a cinética dos processos de hidratação e influencia na composição química da solução aquosa da rede de poros.

Van Noort, Hunger e Spiesz (2016) mostraram que cimentos mais finos tendem a apresentar maiores valores de resistividade elétrica, visto que tendem a desenvolver uma microestrutura mais densa e com uma rede de poros refinada. Ademais, o desenvolvimento da resistividade tende a ocorrer mais rapidamente, visto que a hidratação destes cimentos ocorre de forma mais rápida, devido sua alta superfície específica.

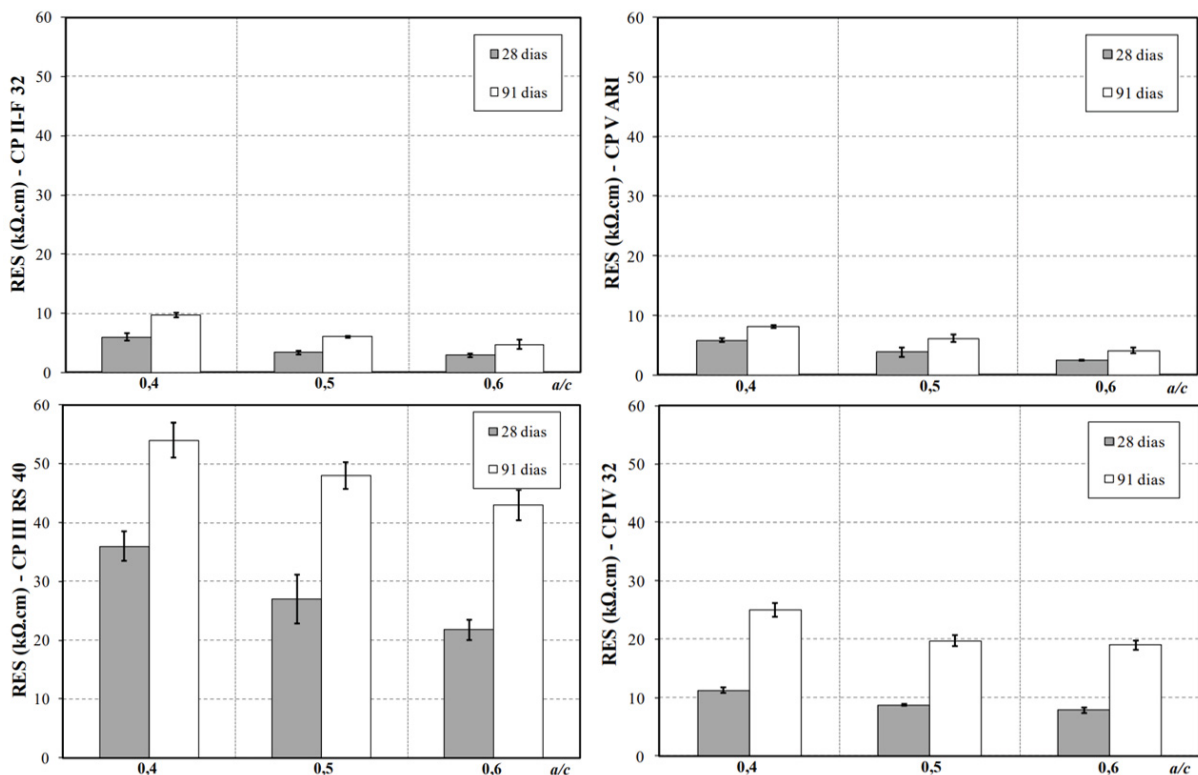
A presença de adições minerais também afeta significativamente o desenvolvimento da resistividade elétrica em concretos. Adições minerais cimentantes, fillers e materiais pozolânicos contribuem para a densificação da matriz cimentícia, refinando a rede de poros e aumentando a resistividade elétrica. As reações pozolânicas também podem garantir um aumento da resistividade elétrica a longo prazo, dada a lentidão das reações químicas envolvidas; além disso, tais reações levam à formação de compostos menos solúveis, reduzindo a concentração iônica da solução dos poros.

A influência de diferentes tipos de cimentos nas leituras da resistividade elétrica de concretos foi estudada por Gesoğlu e Özbay (2007), Ferreira e Jalali (2010), Ramezani pour *et al.* (2011), Lübeck *et al.* (2012),

Medeiros-Junior *et al.* (2014), Medeiros-Junior e Lima (2016), entre outros. Destes trabalhos, destaca-se a pesquisa de Medeiros-Junior *et al.* (2014) e Medeiros-Junior e Lima (2016) por englobarem grande parte dos cimentos disponíveis no mercado brasileiro.

A Figura 3 apresenta as leituras de resistividade elétrica superficial obtidas por Medeiros-Junior *et al.* (2014), que corroboram os efeitos da composição do cimento citados anteriormente. Os autores constataram que para uma mesma relação água/cimento e idade, o cimento CP III 40 RS, que possui cerca de 60% a 70% de escória de alto forno, apresentou os maiores valores de resistividade elétrica dentre os cimentos avaliados. O cimento CP IV 32, que possui cerca de 15% a 50% de adições pozolânicas, apresentou a segunda maior resistividade elétrica.

Figura 3 – Influência do tipo de cimento na RES do concreto



FONTE: Adaptado de Medeiros-Junior *et al.* (2014).

Da Figura 3, pode-se observar também o ganho de resistividade a longo prazo causado pela reação pozolânica, evidenciado pela diferença de valores entre as leituras de 91 dias e de 28 dias, que é mais significativo para os cimentos CP III RS 40 e CP IV 32, do que para os cimentos CP II-F 32 e CP V ARI, que não possuem adições pozolânicas em sua composição.

O efeito da relação água cimento, discutido no item anterior, também é evidenciado na Figura 3. Para as condições estudadas, quanto maior a relação água cimento menores foram os valores de RES medidas (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014).

c) Tipo e teor de agregados:

De forma geral, os agregados utilizados na construção civil no Brasil são provenientes de rochas graníticas e basálticas que são fragmentadas e britadas para atingir dimensões adequadas para a aplicação desejada (LASERNA; REZENDE, 2009). Estas rochas possuem uma porosidade ínfima e um teor de umidade normalmente insignificante e, por isso, se configuram como um material não condutor, com uma resistividade elétrica muito superior à da pasta (LENCIONI, 2011).

A medida da RES pelo método de Wenner assume que o material seja homogêneo (GOWERS; MILLARD, 1999). Porém, a presença de agregado de baixa condutividade na matriz de concreto forma obstruções físicas a passagem de corrente elétrica, dificultando a movimentação da carga elétrica (LENCIONI, 2011). Portanto, quanto maior o teor de agregados no concreto endurecido, maior será a dificuldade da corrente elétrica de se movimentar e, consequentemente, maior será a resistividade elétrica do material.

Sengul (2014) avaliou os efeitos do agregado na resistividade elétrica do concreto, encontrando uma relação linear crescente entre o teor de agregados graúdos e a resistividade elétrica do concreto. Estes resultados são condizentes com estudos similares, desenvolvidos por Hughes, Soleit e Brierley (1985), Princigallo *et al.* (2003), Gans (2017), entre outros.

Segundo Santos (2006), a resistividade elétrica do concreto é mais sensível a alterações na fase da pasta de cimento do que em relação aos agregados, uma vez que as resistividades elétricas destes são muito superiores aos valores da pasta. Esta conclusão é corroborada pelos resultados de Hou *et al.* (2017), onde as medidas de resistividade elétrica não foram afetadas significativamente pelo tipo de agregado (foram testados agregados de granito e mármore) e pela dimensão do agregado (foram testados agregados com dimensões variando entre 4,8 mm e 19 mm).

Em ensaios de resistividade volumétrica, Hou *et al.* (2017) encontraram efeitos similares aos citados para a RES, onde a presença de agregados tende a reduzir a resistividade elétrica. Todavia, através do emprego de técnicas de tomografia, os autores observaram que a corrente elétrica se movimenta preferencialmente através do agregado graúdo. Estes resultados divergem da teoria de que a corrente elétrica tende a contornar o agregado pela zona de transição, que é comumente encontrada na literatura (SANTOS, 2006; LENCIONI, 2011). Não foram encontradas discussões sobre a ocorrência deste processo também em ensaios de RES, destacando a importância de pesquisas subsequentes no tema.

d) Hidratação do cimento:

As reações de hidratação do cimento ocorrem de forma gradual e podem se estender por muitos meses (MEHTA; MONTEIRO, 2014). São estas reações de hidratação que causam a densificação da matriz cimentícia do concreto e o ganho de resistência química e mecânica e, por isso, influenciam também na resistividade elétrica do material (LENCIONI, 2011).

Nas primeiras horas e dias após a moldagem, o concreto apresenta ainda uma elevada porosidade com vazios ocupados pela água de amassamento. Com o passar do tempo e a evaporação da água, tais vazios passam a ser preenchidos por produtos das reações de hidratação (TAYLOR, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dessa forma, a resistividade elétrica é baixa nas primeiras idades do material. Com a evolução da hidratação, a rede

de poros é refinada e uma menor quantidade de água livre é mantida no interior do concreto, aumentando a resistividade elétrica (WHITTINGTON; MCCARTER; FORDE, 1981; HELENE, 1993; SANTOS, 2006; LENCIONI, 2011).

Os fatores discutidos nos parágrafos anteriores são inerentes ao material concreto. Porém, as condições do ambiente ao qual o material está exposto também podem influenciar significativamente no valor da RES medida (POLDER, 2001; LENCIONI, 2011). A seguir, serão discutidos os efeitos da temperatura, da carbonatação e a da presença de íons cloretos e sulfatos nas leituras da RES de concretos.

a) Temperatura:

A temperatura é um dos fatores reguladores da mobilidade iônica da solução aquosa da rede de poros do concreto, e, por isso, pode exercer importantes variações no valor da resistividade elétrica medida (HOPE; IP; MANNING, 1995; RILEM, 2000; CASTELLOTE; ANDRADE; ALONSO, 2001).

Diversos trabalhos sobre o efeito da temperatura na RES podem ser encontrados na literatura: Presnuel e Liu (2012) (variações de temperatura entre 10 °C a 45 °C), Wang *et al.* (2013) (temperaturas entre -30 °C e 15 °C), Sengul (2014) (temperaturas de 5 °C, 20 °C e 35 °C), entre tantos outros. A conclusão de tais pesquisas aponta que quanto maior a temperatura, menor será a resistividade elétrica do concreto.

Gowers e Millard (1999) sugerem que a resistividade diminui 0,33 kΩ.cm para cada 1 °C de aumento de temperatura. Polder (2001) indica que a RES varia entre 3% e 5% para cada grau de mudança de temperatura, em Kelvin. Para temperaturas abaixo de zero, Wang *et al.* (2013) perceberam um incremento substancial nos valores de resistividade.

Com o aumento de temperatura, a viscosidade da solução dos poros diminui, facilitando a movimentação iônica e reduzindo a resistividade elétrica

(POLDER, 2001; FERREIRA; JALALI, 2010). Este fenômeno destaca a importância do controle das condições de ensaio, e que fatores de correção sejam aplicados quando as leituras sejam feitas fora das condições padrões, de forma a garantir a confiabilidade e reprodutibilidade dos ensaios (SENGUL, 2014).

b) Carbonatação

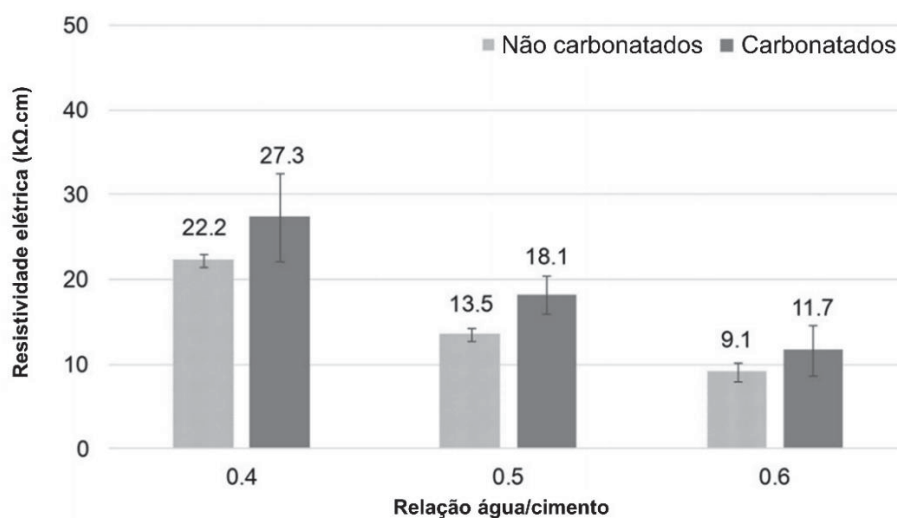
A carbonatação do concreto é o processo no qual compostos hidratados reagem com o dióxido de carbono da atmosfera, formando carbonato de cálcio (MILLARD, 1991; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esta reação causa importantes mudanças físicas na rede de poros do concreto, uma vez que o carbonato de cálcio formado possui um volume maior que o hidróxido de cálcio e, portanto, causa a colmatação da rede de poros do concreto (CHI *et al.*, 2002; BRAMESHUEER; RAUPACH, 2003; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2018).

Como já discutido, a porosidade é um dos principais reguladores da resistividade elétrica do concreto. Quanto menor a porosidade, maior será a dificuldade dos íons de se movimentarem no interior do concreto e, assim, maior será a resistividade elétrica do material. Além do efeito físico do tamponamento dos poros, as reações químicas do processo de carbonatação reduzem a concentração iônica da solução dos poros, também contribuindo para o aumento da resistividade elétrica (RILEM, 2000).

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos por Medeiros-Junior *et al.* (2018), onde os autores estudaram o efeito da carbonatação na resistividade elétrica de concreto. As amostras permaneceram em uma câmara de carbonatação por 45 dias, com temperatura mantida em 40 °C, umidade relativa de 70% e concentração de CO₂ de (5,0 ± 1,0) %.

Da Figura 4, percebe-se que a resistividade elétrica medida foi maior nas amostras carbonatadas para todas as relações água/cimento avaliadas, corroborando as discussões dos parágrafos anteriores (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2018).

Figura 4 – Efeito da carbonatação na resistividade elétrica de concretos com diferentes relações água/cimento.



Fonte: Traduzido de Medeiros-Junior *et al.* (2018).

c) Íons agressivos – Cloretos e sulfatos

O efeito dos íons cloretos nas medidas de resistividade elétrica de concretos ainda é um assunto contraditório (SANTOS, 2006; LENCIONI, 2011; GANS, 2017). Enquanto alguns autores observam reduções na resistividade com o aumento da concentração de íons cloreto na solução dos poros, outras pesquisas não conseguiram reproduzir tão claramente este fenômeno.

De forma geral, a presença de íons na rede de poros do concreto, como os cloretos e sulfatos, pode influenciar nas medidas da resistividade elétrica. A presença de íons como Na^+ , K^+ , OH^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} na solução dos poros aumenta a atividade eletrolítica da solução, facilitando a movimentação de cargas elétricas e, conseqüentemente, reduzindo a resistividade (REDAELLI *et al.*, 2006; KOLEVA *et al.*, 2008; TANGANOV, 2013).

Todavia, Andrade (2004) e Lubeck (2008), afirmam que o aumento na condutividade causado por elevadas concentrações de íons Cl^- é compensado pela diminuição da concentração de íons Ca^{2+} e OH^- , bem como pela redução do pH da solução dos poros. Hunkeler (1996), Andrade (2005) e Lencioni (2011) não observaram alterações significativas na resistividade elétrica de

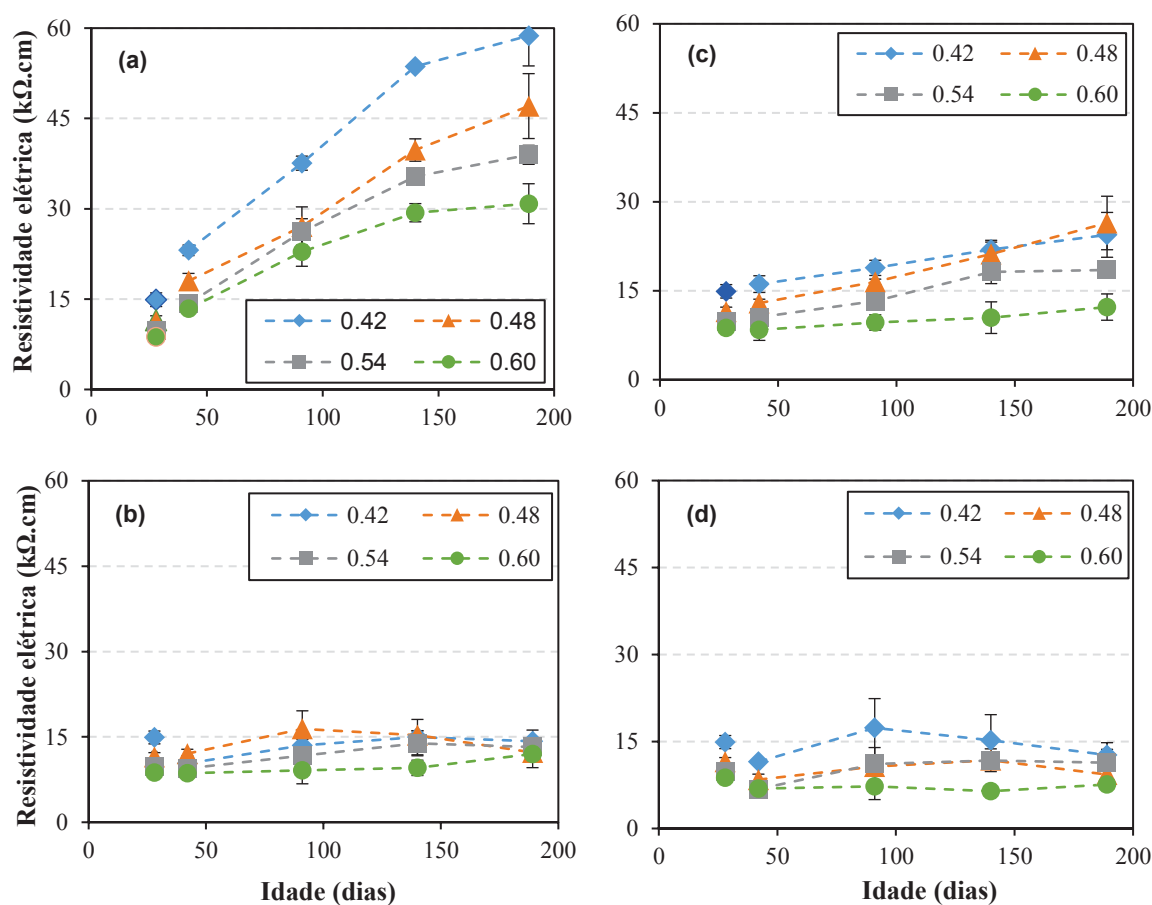
concretos contaminados com íons cloretos, concluindo que a presença de tais íons não exerce influência sobre a resistividade, ou que a influência é menos significativa do que outros processos, tais como a hidratação, atividades pozolânicas e o variações no teor de umidade.

Mais recentemente, Real (2015) estudou a resistividade elétrica de concretos com a adição de 0%, 1%, 2%, 3% e 4% de cloretos, em relação a massa de cimento. Como resultados, a adição de 1% levou a resistividades maiores do que para o concreto de referência, para a adição de 2% a resistividade foi estatisticamente igual à do concreto de referência. Para as adições de 3% e 4% de cloretos, a resistividade foi significativamente reduzida. Segundo a autora, o aumento da resistividade para a adição de 1% pode ser justificado pela formação de sais, como o Sal de Friedel, que causam o refinamento da rede de poros e reduzem a concentração iônica da solução dos poros. Para maiores concentrações de cloretos, ocorre a saturação da fixação de cloretos, e o excesso contribui para o aumento da condutividade da solução dos poros e consequente redução da resistividade elétrica. Simulando o ataque externo por cloretos (ciclos de molhagem e secagem em uma solução de 3,5% de NaCl), Gans (2017) observou também uma redução na RES do concreto. Corroborando a conclusão de que a presença de íons cloreto contribui para a redução da resistividade elétrica do material.

O efeito dos íons sulfato sobre a resistividade elétrica não é tão intensamente estudado quanto aos cloretos. Todavia, os resultados disponíveis na literatura indicam um comportamento similar aos efeitos da presença de íons cloreto.

Saleem *et al.* (1996) obteve reduções na resistividade elétrica proporcionais à concentração de sulfatos adicionada e ao teor de umidade da amostra no momento do ensaio. Medeiros-Junior *et al.* (2019) avaliaram a variação da resistividade elétrica de concretos expostos à ciclos de molhagem e secagem com água, cloreto de sódio, sulfato de sódio e uma mistura de cloreto e sulfato de sódio. Os resultados obtidos pelos autores são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Evolução da resistividade elétrica do concreto exposto a ciclos de molhagem e secagem com (a) água, (b) cloretos, (c) sulfatos e (d) cloretos e sulfatos.



Fonte: Adaptado de Medeiros-Junior *et al.* (2019).

A partir dos resultados apresentados, os autores concluíram que a presença de íons sulfato causou a redução da RES no concreto para todas as relações a/c estudadas. Durante o período de estudo, a RES apresentou uma tendência de crescimento, porém em um ritmo inferior às amostras de referência (em água).

Ainda da Figura 5, percebe-se que para a condição de exposição à solução mista de cloreto e sulfato de sódio, a RES se manteve estatisticamente igual desde a primeira idade de monitoramento até o final do período de estudo. Segundo a autora, para esta condição de exposição a rede de poros do concreto foi saturada com os íons externos já no primeiro período de exposição, estabilizando a resistividade elétrica para a condição da solução dos poros saturada.

Com isso, percebe-se que a resistividade elétrica do concreto é um parâmetro sensível a uma vasta quantidade de parâmetros do concreto e do ambiente ao qual o mesmo está inserido. O entendimento destes fatores é de extrema importância para que as leituras da resistividade elétrica possam ser utilizadas de forma correta em correlação a propriedades físicas e químicas do concreto.

2.1.3 A RES como parâmetro de durabilidade

A utilização da resistividade elétrica como parâmetro de monitoramento do desempenho de estruturas de concreto é uma área de pesquisa que apresenta grande potencial (COPPIO *et al.*, 2019). Trabalhos como os de Andrade e D'Andrea (2011), Silva, Ferreira e Figueiras (2011), Ait-Mokhtar *et al.* (2013), Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019) e Medeiros-Junior *et al.* (2019), entre outros, buscaram investigar a relação entre a resistividade elétrica e propriedades do concreto, tais como a sua porosidade, permeabilidade, resistência mecânica, grau de saturação e probabilidade de corrosão.

A resistência à compressão do concreto apresenta boa correlação com a resistividade elétrica superficial, uma vez que ambas são controladas, principalmente, pela configuração da rede de poros (FERREIRA; JALALI, 2010; DONG *et al.*, 2016; ZENG *et al.*, 2020). Lubeck *et al.* (2012) apresentam coeficientes de determinação variando entre 0,88 e 1,0 entre a RES e a resistência à compressão nas idades de 28 e 91 dias para concretos com diferentes relações a/c. Coeficientes de determinação similares são apresentados por Medeiros-Junior *et al.* (2014) em análises realizadas em diferentes tipos de cimento disponíveis no mercado brasileiro.

Dados os altos valores de correlação, Ferreira e Jalali (2010) e Wei *et al.* (2012) propõem a utilização da RES medida nas primeiras 72 h do concreto para a previsão da resistência à compressão do concreto nos 28 dias, obtendo erros de previsão da ordem de 9%. Todavia, tal previsão deve ser feita com cautela quando o concreto está exposto à ambientes contendo agentes agressivos. A presença de íons cloreto e íons sulfato na solução dos poros do concreto altera sua composição química e, conseqüentemente, sua condutividade (HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Dessa forma, a RES medida deixa de ser regulada apenas pela configuração

dos poros, dificultando a determinação de relações com a resistência à compressão do concreto.

A sensibilidade da RES para mudanças na condutividade da solução dos poros do concreto possibilita sua utilização para análises da durabilidade do concreto, como na detecção da presença de agentes agressivos e das manifestações patológicas decorrentes (POLDER, 2001; CCAA, 2009; MEDEIROS-JUNIOR; MUNHOZ; MEDEIROS, 2019).

Nos últimos anos, os avanços percebidos nos cadernos técnicos e normas regulamentadoras a respeito da produção de concretos duráveis se baseiam em limitações da porosidade do concreto, dificultando a difusão de agentes agressivos (ANDRADE *et al.*, 2009; ABNT NBR 6118, 2014; ABNT NBR 15575, 2015). Nesse contexto, a RES têm ganhado destaque como parâmetro de monitoramento do concreto, em substituição aos métodos convencionais de determinação do coeficiente de difusão, que dependem de complexos e onerosos ensaios laboratoriais (LENCIONI, 2011; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014; MENDES *et al.*, 2018; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2019; ZENG *et al.*, 2020).

A resistividade elétrica e o coeficiente de difusão do concreto são relacionados por uma das leis de Einstein (Equação (4)), que relaciona o movimento de cargas elétricas com a condutividade do meio (ANDRADE, 2004; MEDEIROS-JUNIOR *et al.* 2014).

$$D_{ef} = \frac{A}{\rho_{ef}} \quad (4)$$

Onde D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo ou coeficiente de difusão no estado estacionário (cm²/ano); A é um fator dependente da concentração externa de agentes agressivos (cm³Ω/ano); e ρ_{ef} é a resistividade efetiva do concreto saturado (Ω.cm).

A relação apresentada na Equação (4) permite que a RES seja empregada para o monitoramento de estruturas de concreto fornecendo dados importantes do desempenho do concreto frente à ação de agentes agressivos de forma rápida e não destrutiva (ANDRADE; D'ANDREA, 2010; HORNBOSTEL; LARSEN; GEIKER, 2013;

MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014). Keng *et al.* (2021) avaliaram a relação entre o coeficiente de difusão e a resistividade elétrica de concretos moldados com diferentes teores de cinza volante, obtendo coeficientes de correlação variando entre 0,62 e 0,82. Os autores citam a dificuldade da obtenção de um único ajuste para os diferentes traços de concreto testados, destacando a demanda por pesquisas subsequentes para aprofundamento do tema.

A mesma relação também favorece a utilização da resistividade elétrica na avaliação do desempenho e na modelagem da vida útil do concreto (MEDEIROS-JUNIOR, 2014; MENDES *et al.*, 2018). Segundo Sengul (2014) e Andrade, D'Andreia e Rebolledo (2014), esta relação permite o uso da resistividade como um parâmetro de durabilidade em modelos de previsão de vida útil baseados na segunda lei da difusão de Fick. Santos (2006) indica que a RES é um importante parâmetro nos estudos da cinética da corrosão das armaduras do concreto, capaz de representar as diferentes fases da iniciação e propagação da corrosão. Estes conceitos são abordados no modelo de previsão de vida útil baseado na corrosão de armaduras proposto por Andrade (2004), que será discutido em detalhe na sequência, por ser objeto de estudo da presente pesquisa.

2.1.4 Modelo de Andrade (2004)

O modelo de Andrade (2004) utiliza dados da resistividade elétrica superficial para definir os períodos de iniciação e propagação dos processos corrosivos, sejam eles iniciados pela ação de íons cloretos ou por carbonatação. Na fase de iniciação, a RES é empregada na modelagem da porosidade do concreto e da difusão dos íons cloreto. Na fase de propagação, com a corrosão já iniciada, a RES é empregada como indicativo do teor umidade, para definir a corrente formada e, conseqüentemente, a taxa de corrosão.

Sendo o objetivo da presente pesquisa o estudo da etapa de difusão de íons sulfato, apenas a etapa de iniciação do modelo de Andrade (2004) será definida a seguir.

Explorando a relação da Equação (4), a autora propõem a incorporação de um fator de ligação (r_{cl}) buscando representar as ligações entre os íons e os produtos hidratados da matriz cimentícia. Renomeando o parâmetro A da Equação (4) para k_{cl} e dividindo ambos os lados por r_{cl} , obtém-se a Equação (5).

$$\frac{D_{ef}}{r_{cl}} = \frac{k_{cl}}{\rho_{ef} * r_{cl}} \quad (5)$$

No que diz respeito a resistividade elétrica (ρ_{ef}), a autora destaca a importância da consideração da variação temporal desta propriedade, causada pela continuidade dos processos de hidratação. Dessa forma, a Equação (6) é definida.

$$\rho_t = \rho_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^q \quad (6)$$

Onde ρ_t é a resistividade elétrica em um dado tempo t , ρ_0 é a resistividade elétrica em um tempo t_0 , e q é um fator de idade, que ajusta a variação da resistividade em função do envelhecimento do concreto.

Finalmente, através da lei da raiz quadrada do tempo (TUUTI, 1982), pode-se relacionar a profundidade de difusão com o tempo através da Equação (7). Onde t é o tempo e x é a profundidade de difusão.

$$t = \frac{x^2}{D_{ef}} \quad (7)$$

Substituindo a Equação (5) na Equação (7), obtém-se a Equação (8) que permite a análise da profundidade de difusão de íons cloreto e da carbonatação em função da resistividade elétrica do concreto, determinada através da Equação (6).

$$t = \frac{x^2 * \rho_t * r_{cl}}{k_{cl}} \quad (8)$$

Além de simples e de fácil resolução, o modelo de Andrade (2004) possibilita uma série de aplicações práticas, dentre as quais pode-se citar:

- Determinar o cobrimento necessário para que se atinja uma determinada vida útil.
- Conhecida a geometria de uma peça, calcular a resistividade do concreto necessária para que uma determinada vida útil seja alcançada.
- Determinação da vida útil remanescente de uma estrutura;

Nos anos seguintes à publicação do modelo de Andrade (2004), o mesmo foi adaptado e complementado por Andrade e D'Andrea (2010), D'Andrea (2010), Andrade e D'Andrea (2011), Medeiros-Junior (2014) e Mendes *et al.* (2018), sendo atualmente um modelo aplicado para a previsão da vida útil de estruturas e para dosagem de concretos duráveis, destacando a viabilidade e efetividade do uso da RES como um parâmetro de durabilidade do concreto.

2.1.5 Discussão final sobre a resistividade elétrica do concreto

Com base na revisão da literatura apresentada ao longo do item 2.1, pode-se destacar as seguintes conclusões acerca da resistividade elétrica do concreto:

- a. A resistividade elétrica do concreto pode indicar a facilidade dos íons se moverem no concreto através de sua solução aquosa presente nos poros (POLDER, 2001; LENCIONI, 2011; MEDEIROS-JUNIOR, 2014).
- b. O método de Wenner é a técnica mais empregada para a determinação da resistividade elétrica de concretos. Sendo padronizado pela norma espanhola UNE 83988-2 (2014), o método consiste na utilização de sensores na superfície do concreto para a aplicação de uma corrente e medida da tensão gerada.
- c. A RES do concreto é uma propriedade sensível às condições do material e do ambiente no momento do ensaio (LENCIONI, 2011; MEDEIROS-JUNIOR,

2014), dentre os quais pode-se destacar: relação água/cimento, tipo de cimento, agregados, grau de hidratação, grau de saturação, temperatura, presença de íons cloreto e/ou sulfato, etc

- d. A RES possui grande potencial para ser utilizada como parâmetro de monitoramento do desempenho estrutural, podendo ser relacionada direta e indiretamente com propriedades do concreto como: porosidade, permeabilidade, resistência mecânica, nível de saturação, probabilidade de corrosão, etc. (ANDRADE; D'ANDREA, 2011; SILVA; FERREIRA; FIGUEIRAS, 2011; AIT-MOKHTAR *et al.*, 2013; MEDEIROS-JUNIOR; MUNHOZ; MEDEIROS, 2019; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2019).
- e. A resistividade elétrica e o coeficiente de difusão do concreto são relacionados por uma das leis de Einstein, que associa o movimento de cargas elétricas com a condutividade do meio (ANDRADE, 2004; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014). Tal relação pode ser utilizada para melhor entendimento da ação de agentes agressivos no concreto de forma rápida e não destrutiva (ANDRADE; D'ANDREA, 2010; MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014).

Fazendo-se uma revisão da literatura, observou-se que trabalhos recentes têm buscado:

- a. Mendes *et al.* (2018) – Os autores avaliaram a possibilidade de utilizar a RES como um parâmetro de dosagem de concretos duráveis. Além disso, os autores apresentam equações empíricas para a previsão da RES do concreto a partir de parâmetros da dosagem.
- b. Medeiros-Junior *et al.* (2019) – Explorar a relação entre a RES e a resistência à compressão de concretos expostos a soluções de cloretos e sulfatos. Segundo os autores, a presença de cloretos e/ou sulfatos causa uma estabilização na RES, diminuindo a correlação com a resistência à compressão.
- c. Zeng *et al.* (2020) – A pesquisa buscou estudar o comportamento da resistividade elétrica de concretos expostos a diferentes níveis de carregamento (frações da carga de ruptura). Com o aumento da carga aplicada, a resistividade tende a diminuir, aumentando rapidamente quando próximo a ruptura do concreto.

- d. Yousuf e Xiaosheng (2020) – Os autores propõem a utilização da resistividade elétrica do concreto para a previsão da resistência à compressão e da retração plástica. Os autores apresentam a existência de uma relação linear entre a resistividade elétrica medida após 72h da moldagem e a resistência à compressão aos 28 dias.
- e. Kang *et al.* (2021) – Os autores exploram a relação existente entre o coeficiente de difusão de iodeto no concreto e a resistividade elétrica superficial. Testando diferentes traços de concreto, os autores obtiveram coeficientes de correlação variando entre 0,62 e 0,82, destacando a viabilidade do uso da RES para a determinação indireta do coeficiente de difusão aparente.

Com base no apresentado, percebe-se a relevância de pesquisas a respeito do desenvolvimento de relações entre a RES e as diversas propriedades do concreto, bem como na utilização de tais relações para desenvolvimento de técnicas e modelos buscando a produção e o monitoramento de concretos duráveis.

Dessa forma, nota-se que o presente trabalho segue o cenário atual de pesquisas utilizando a RES como um parâmetro de desempenho do concreto. Busca-se também ampliar o conhecimento técnico-científico acerca da RES, contribuindo a demais estudos acerca da durabilidade e desenvolvimento sustentável de estruturas

2.2 ATAQUE POR SULFATOS

A presença dos íons sulfato (SO_4^{2-}) na rede de poros do concreto desencadeia uma série de complexas reações químicas com as fases hidratadas da matriz cimentícia, o que pode comprometer o desempenho do concreto (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002). A este conjunto de reações é dado o nome de ataque por sulfatos. Na literatura, o ataque por sulfatos é dividido em ataque interno e ataque externo, quanto a forma de ingresso dos sulfatos no concreto.

O termo ataque interno é utilizado para descrever as situações onde os íons sulfato estão presentes no interior do concreto devido à contaminação das matérias

primas utilizadas na dosagem (NEVILLE, 2004; PEREIRA, 2015). Segundo Campos *et al.* (2018), a forma mais comum de ocorrência deste ataque é através da utilização de agregados contaminados com enxofre, que tendem a se oxidar liberando óxidos de enxofre na rede de poros do concreto. A formação de etringita tardia é um caso especial do ataque interno por sulfatos, que ocorre quando o concreto é exposto a elevadas temperaturas (acima de 70 °C) por longos períodos de tempo, instabilizando a etringita (TAYLOR; FAMY; SCRIVENER, 2001).

Já o ataque externo, o mais comum dentre os dois, ocorre quando os íons sulfato ingressam no concreto a partir do ambiente externo, se movimentando gradativamente para o interior do material através da sua rede de poros (SANTHANAM; COHEN; OLEK, 2002; NEVILLE, 2004). No ambiente, os íons sulfato podem estar presentes em chuvas ácidas, dejetos industriais, resíduos de fertilizantes, solos, água marinha e na própria atmosfera, fazendo com que o ataque externo por sulfatos seja um mecanismo de degradação comum em estruturas subterrâneas, industriais e de alguns ambientes urbanos (IKUMI, 2017). É importante distinguir o ataque externo por sulfatos do ataque ácido, enquanto as manifestações no concreto podem ser similares (aumento da porosidade, fissuração superficial, perda de resistência, desintegração, etc.), o ataque ácido está relacionado à dissolução e lixiviação de compostos do concreto, sem que ocorra a formação de subprodutos expansivos (YUAN *et al.*, 2013).

Apesar desta distinção quanto à origem dos íons sulfato, Skalny, Marchand e Odler (2002) enfatizam que independentemente da forma de ingresso, o mecanismo de degradação do ataque por sulfatos é governado por princípios físico-químicos similares, sendo eles a formação de etringita, gipsita e, em casos especiais, a thaumasita (MEHTA; MONTEIRO, 2014; CEFIS; COMI, 2017; YI; CHEN; BINDIGANAVILE, 2019). Todavia, os ataques internos e externos resultam em diferentes consequências, devido as diferentes condições nas quais as reações ocorrem. Por exemplo, no ataque externo por sulfatos as reações ocorrem de forma gradual da superfície exposta em direção ao centro da peça de concreto. Já durante o ataque interno, as reações ocorrem em pontos específicos no interior do concreto, comumente em torno dos agregados.

Outra forma de classificação do ataque por sulfatos diz respeito à forma de degradação ao concreto. A forma mais comum, chamada de ataque químico, está relacionada as reações de formação de gipsita e etringita a partir das reações entre os íons sulfato e as fases hidratadas da matriz cimentícia.

Em situações de variações de temperatura e umidade, ocorre a hidratação do sulfato de sódio anidro (thenardita, Na_2SO_4) em um decahidrato (mirabilita, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), promovendo um aumento de volume que pode ser superior a 80% (SCHMIDT *et al.*, 2009; HAYNES; BASSUONI, 2011). Na situação do aumento da temperatura, a reação de desidratação pode ocorrer, criando uma reação cíclica de inchamento e retração dos sais (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; SCHMIDT *et al.*, 2009; PINKOSKI, 2019). Nesta situação, Mehta (2000), Brown (2002) e Neville (2004), dentre outros pesquisadores, definem que tal mecanismo é um ataque físico, decorrente da cristalização de um sal, e deve ser diferenciado do ataque químico. Skalny, Marchand e Odler (2002) apontam que apesar da natureza física do dano, esta reação é um processo químico com consequências físicas e, por essa complexidade, os aspectos físicos e químicos do ataque por sulfato não devem ser separados.

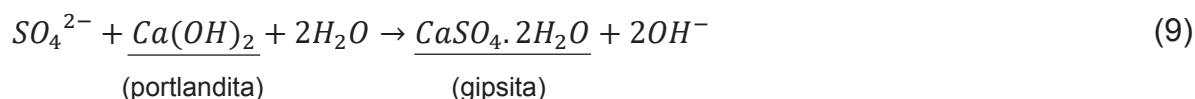
Além disso, em situações de campo, a degradação física e química ocorre de forma concomitante, dificultando a sua separação dos efeitos (NEHDI; SULEIMAN; SOLIMAN, 2014). Em casos de ataque externo, a superfície do concreto exposta ao ambiente está sujeita a constantes variações de umidade e temperatura, criando uma condição propícia ao ataque físico. Ao mesmo tempo, os íons sulfato continuam a penetrar no concreto através de sua rede de poros, dando início a reações químicas deletérias com os compósitos da pasta cimentícia (NEVILLE, 2012).

O mecanismo de degradação do ataque por sulfato será discutido em detalhe no item 2.2.1, apresentando as reações químicas e os mecanismos de formação dos esforços internos na matriz cimentícia. Em seguida, no item 2.2.2, particularmente o ataque externo por sulfatos será abordado em maior profundidade, uma vez que é o mecanismo em estudo na presente pesquisa.

2.2.1 Mecanismo de Degradação do Ataque por Sulfatos

Com o ingresso dos íons sulfato na rede de poros do concreto, têm-se o início de uma série de complexas reações químicas com os compostos do cimento Portland hidratado formando subprodutos que alteram as propriedades da matriz cimentícia (IRASSAR; DI MAIO; BATIC, 1996; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Inicialmente, a gipsita (sulfato de cálcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é formada pela reação do íon sulfato com fontes de cálcio da matriz cimentícia, principalmente a portlandita (hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), como apresentado na Equação (9) (BROWN, 2002).

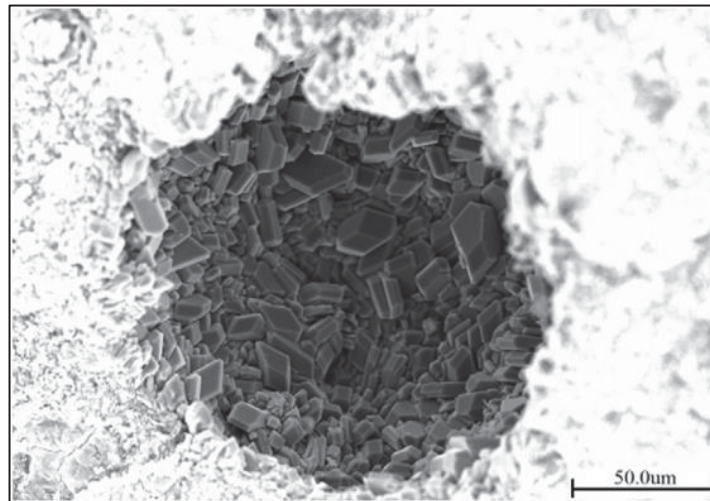


A portlandita é responsável por manter a alta alcalinidade da solução dos poros do concreto e seu consumo na reação com os íons sulfato pode levar a redução do pH do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em estágios avançados do ataque, o pH pode ser reduzido para níveis abaixo de 11,5, causando uma instabilidade química dos compostos da matriz cimentícia (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002). Neste momento, o gel C-S-H, principal responsável pela resistência mecânica do concreto, se torna instável e começa a se decompor, liberando Ca^{2+} para buscar reestabelecer a alcalinidade da solução dos poros (IKUMI, 2017). Nesta situação, o cálcio liberado pelo gel C-S-H começa também a reagir com os íons sulfato, formando gipsita, e o concreto inicia um processo de perda de resistência e desintegração (NEVILLE, 2004). A formação de gipsita na rede de poros de concretos pode ser observada na microscopia apresentada na Figura 6.

Comumente, o principal problema atribuído à formação de gipsita é o enfraquecimento do concreto, uma vez que ela é facilmente dissolvida pela água e apresenta resistência mecânica inferior em relação às outras fases da matriz cimentícia (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002). Por outro lado, o efeito da gipsita

no fenômeno de expansão do concreto causado pelo ataque por sulfatos ainda é incerto (TIAN; COHEN, 2000; NEVILLE, 2002; IKUMI, 2017; MINDESS, 2019).

Figura 6 – Formação de cristais de gipsita nas paredes dos poros de um concreto exposto ao ataque externo por sulfatos.

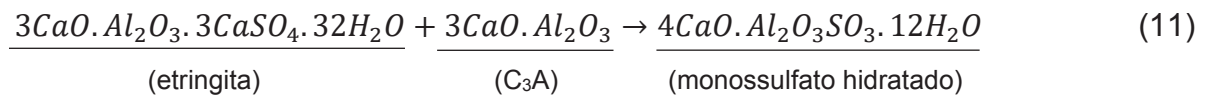
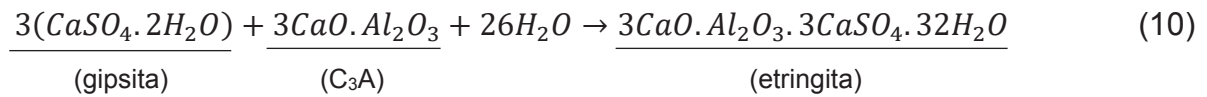


Fonte: Xiong *et al.* (2016)

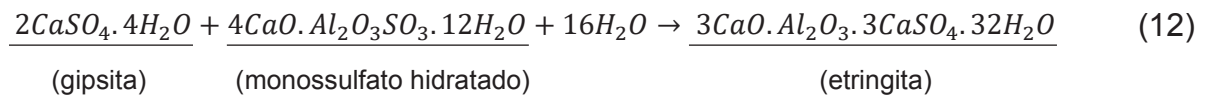
Ping e Beaudoin (1992) sugeriram que quando a solução dos poros se encontra supersaturada, a cristalização da gipsita pode levar a expansões na pasta. Em experimentos em pastas de alita pura (silicato tricálcico, $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou C_3S), onde não há a formação de etringita, Tian e Cohen (2000) demonstraram que a formação de gipsita causou a expansão de corpos de prova de argamassa. Mindess (2019) indica que a formação de gipsita a partir da portlandita gera um aumento de volume de sólidos de cerca de 1,2 vez. Skalny, Marchand e Odler (2002) indicam que a expansão pode ser derivada de uma reação topoquímica entre o íon sulfato e o hidróxido de cálcio cristalino da pasta de cimento. Por esta complexidade, é comum que trabalhos acerca do ataque por sulfatos considerem a formação de gipsita apenas como um passo intermediário para a formação de etringita, atribuindo a esta toda a expansão percebida durante o ataque (TIXIER; MOBASHER, 2003; BASISTA; WEGLEWSKI, 2008; IDIART, 2009; ZUO; SUN; YU, 2012; IKUMI *et al.*, 2014).

A formação de cristais de etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{C}_6\text{A}\bar{3}\text{H}_{32}$) ocorre naturalmente no concreto durante a hidratação do cimento, através da reação

entre as fases contendo aluminatos (aqui simplificadas pela denominação de C_3A) e a gipsita presentes no cimento Portland (Equação (10)) (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Quando a gipsita (fonte de sulfato) disponível para reação é esgotada, os aluminatos ainda disponível reage com a etringita formando monossulfato (monossulfato de aluminato de cálcio hidratado, $4CaO.Al_2O_3SO_3.12H_2O$ ou $C_4A\bar{S}H_{12}$) através da Equação (11) (BAUR et al., 2004; QUARCIONI, 2008). O monossulfato é um composto de menor tamanho que a etringita, ocupando menos espaço no interior do concreto (YU; SUN; SCRIEVENER, 2013).



Quando o concreto é exposto a uma nova fonte de sulfatos, a gipsita volta a ser formada através da Equação (9) (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Com a restituição de gipsita na matriz cimentícia, a formação de etringita é reiniciada, utilizando como fonte de aluminatos o monossulfato (Equação (12)). Esta etringita formada após a hidratação do cimento é comumente denominada de etringita secundária (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

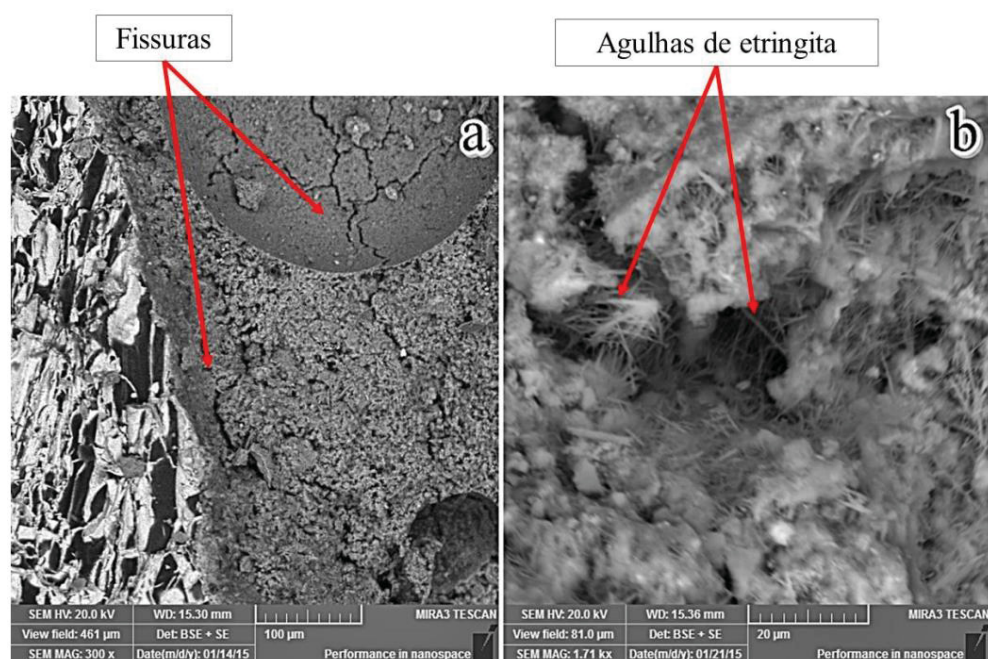


É consenso na literatura que a formação de etringita secundária na rede de poros é a principal responsável pela expansão percebida em concretos submetidos ao ataque por sulfatos (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2012; IKUMI et al., 2014). A formação dos produtos de reação causa

o preenchimento dos poros e a formação de tensões internas (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2012). Quando a magnitude destes esforços excede a resistência do concreto, têm-se o início da formação de fissuras e deslocamento. Na Figura 7 são mostradas micrografias por MEV apresentadas por Pereira (2015), onde é possível perceber a formação de microfissuras e a formação de agulhas de etringita na amostra de concreto submetida ao ataque interno por sulfatos, através da contaminação por pirita.

Apesar do consenso de que a expansão percebida durante o ataque por sulfatos é causada pela formação da etringita, ainda há muita discussão sobre qual mecanismo dessa reação causa este processo expansivo (MEHTA; MONTEIRO, 2014; IKUMI, 2017). Ao longo dos anos, diversas teorias foram propostas buscando justificar o mecanismo da expansão, dentre as mais discutidas, destacam-se a teoria da expansão devido ao aumento do volume de sólidos e a expansão devido às pressões de cristalização (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; KUNTHER; LOTHENBACH; SCRIVENER, 2013; IKUMI, 2017; SOIVE; QUAN-TRAN, 2017).

Figura 7 – Microscopias de barras de argamassas contaminadas com pirita após 42 dias de envelhecimento natural, com detalhe para (a) microfissuras na pasta, e (b) formação de etringita.



Fonte: Pereira (2015).

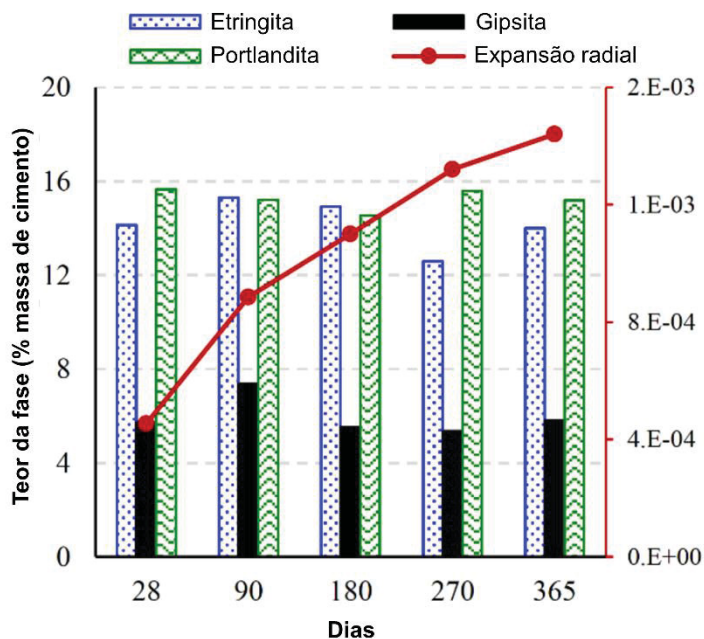
A teoria da expansão devido ao aumento do volume de sólidos assume que a expansão percebida durante o ataque por sulfatos é causada pelo aumento no volume dos sólidos presentes no sistema devido à formação de etringita. Irassar, Di Maio e Batic (1996) indicam que a formação da etringita a partir da reação entre a gipsita e o C₃A (Equação (10)) gera um aumento do volume de sólidos da ordem de 250%. Mindess (2019) apresenta que a formação da etringita a partir do monossulfato (Equação (12)) gera um aumento da ordem de 55%. Por essa teoria, os sólidos começam a se formar no interior dos poros ocupando o espaço disponível. Quando o espaço se torna limitado, a formação dos subprodutos começa a exercer pressões nas paredes dos poros, criando tensões internas (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; IKUMI *et al.*, 2014). Quando estas tensões ultrapassam a resistência da matriz, ocorrerá a fissuração interna do concreto.

Na Figura 8 estão apresentados resultados de expansão radial medidos por Ikumi *et al.* (2016) em discos de argamassas imersos em solução de 3% de Na₂SO₄. Apesar da expansão das amostras, os autores não encontraram uma clara relação com a quantidade de etringita e gipsita formada. Resultados similares foram apresentados por Kunther, Lothenback e Scrivener (2013).

As pesquisas citadas são alguns dos trabalhos que levantaram dados experimentais que não concordam com as premissas da teoria da expansão devido ao aumento de volume de sólidos. Por esta razão, a teoria da pressão de cristalização tem sido a mais aceita nos últimos anos.

Na teoria da expansão devido à pressão de cristalização, o grau de supersaturação da solução dos poros é o principal fator que determina a magnitude das pressões internas e, conseqüentemente, da expansão gerada (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002). Esta teoria se baseia no conceito que a formação de cristais a partir de soluções supersaturadas é capaz de gerar grandes pressões internas quando esses cristais são formados em um ambiente confinado, como é o caso da rede de poros do concreto (FLATT; SCHERER, 2008; BARY *et al.*, 2014)

Figura 8 – Expansão radial de argamassas imersas em solução de 3% de Na₂SO₄



Fonte: Traduzido de Ikumi et al. (2016)

Após a exposição do concreto aos íons sulfato, o aumento da concentração de íons é mais rápido que as reações de formação de etringita, causando a supersaturação da solução dos poros (IKUMI; CAVALARO; SEGURA, 2019). Segundo Scherer (2004), os maiores picos de supersaturação acontecem nos menores poros da matriz (menores que 15 nm), onde a condição de confinamento faz com que a formação de etringita nestes poros resultem em elevadas pressões de cristalização, causando esforços de expansão. Müllauer, Beddoe e Heinz (2013) indicam que a formação de etringita em poros com dimensões de 10 a 50 nm é capaz de gerar esforços de tração da ordem de 8 MPa, valor superior às resistências da maior parte dos concretos convencionais.

Bary (2008) mostrou que a teoria da pressão de cristalização é capaz de simular satisfatoriamente a formação de esforços e da fissuração do concreto. Todavia, a utilização desta teoria para a modelagem da expansão resulta em resultados duas ordens de grandeza menores que os resultados experimentais. Scherer (2004) também aponta a dificuldade da utilização desta teoria para justificar a expansão do concreto. Segundo o autor, a taxa de expansão resultante da pressão

de cristalização é mínima, e, além disso, a condição de supersaturação tende a se dissipar com o passar do tempo.

Bary *et al.* (2014) e Ikumi *et al.* (2014) sugerem que as duas teorias aqui citadas são compatíveis e representam duas fases distintas do ataque por sulfatos. Ikumi *et al.* (2014) sugerem que a iniciação dos esforços internos se deve principalmente à ação da pressão de cristalização, enquanto as expansões macroscópicas são explicadas pela teoria do aumento do volume de sólidos.

2.2.2 Ataque Externo por Sulfato de Sódio

Durante o ataque externo por sulfatos, o ingresso dos íons sulfato a partir do ambiente leva a formação de produtos expansivos na camada mais superficial. Esta reação irá gerar esforços internos que, quando superam a resistência do concreto, criam uma rede de fissuras irregulares (IKUMI *et al.*, 2014). Estas fissuras facilitam que a solução de sulfato atinja as camadas ainda mais internas do concreto. O avanço da degradação causada pelo ataque por sulfatos é simplificado na Figura 9.

No ambiente, os sulfatos podem ser encontrados em diversos ambientes. Em solos, podem estar presentes na forma mineral ou dissolvidos na água intersticial (IKUMI *et al.*, 2014; BREKAILO, 2019). A presença de sulfatos é também comum em resíduos industriais, como os da indústria metalúrgica e mineradora, bem como em esgotos agrícolas e industriais. Além disso, sulfatos também estão presentes na poluição atmosférica em grandes centros urbanos e na água marinha (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; NEVILLE, 2004; IKUMI *et al.*, 2014;).

Segundo Soive e Quan-Tran (2017), a velocidade das reações irá depender de fatores ambientais (tipo e concentração de sulfatos, pH da solução, umidade relativa, temperatura, etc.) e de fatores intrínsecos do concreto (relação água/cimento, composição química do cimento, configuração da rede de poros, coeficiente de difusão, etc.). Skalny, Marchand e Odler (2002) apontam que o cátion (íon positivo) ligado ao radical sulfato (SO_4^{2-}) é o principal responsável pela velocidade e intensidade das reações.

Os principais sulfatos associados ao ataque em estruturas de concreto são o sulfato de cálcio (CaSO_4), sulfato de sódio (NaSO_4) e o sulfato de magnésio (MgSO_4) (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014). A agressividade de cada um destes tipos de sulfato está relacionada com a sua solubilidade. Por exemplo, a baixa solubilidade do sulfato de cálcio implica em baixas concentrações de sulfato em solução (cerca de 1,5 g/l). Por outro lado, os sulfatos de sódio e de magnésio são muito mais agressivos ao concreto, pois apresentam elevadas concentrações quando dissolvidos (132 g/l e 230 g/l, respectivamente) (IKUMI *et al.*, 2014).

Além de diferentes velocidades e intensidade de degradação, os diferentes cátions atuantes (Ca^+ , Na^{2+} ou Mg^{2+}) desencadeiam diferentes reações químicas com as fases da matriz cimentícia (COUTINHO, 2011). A seguir, serão apresentados os mecanismos de degradação do ataque por sulfato de sódio, por ser o mais comum em estruturas de concreto convencionais e objeto de estudo na presente pesquisa.

O sulfato de sódio presente na rede de poros do concreto reage com as fases da matriz cimentícia que contém cálcio solúvel (portlandita e gel C-S-H), através das reações químicas apresentadas nas Equações (13) e (14), formando gipsita (HOBBS; TAYLOR, 2000; NEVILLE, 2012).

Na reação com a portlandita, o íon sódio liberado reage com a hidroxila disponível formando hidróxido de sódio, que, por ser um composto alcalino, mantém alto o pH da solução dos poros, garantindo a estabilidade do gel C-S-H e limitando a ocorrência da reação apresentada na Equação (14) (SKALNY; MARCHAND; ODLER; 2002).

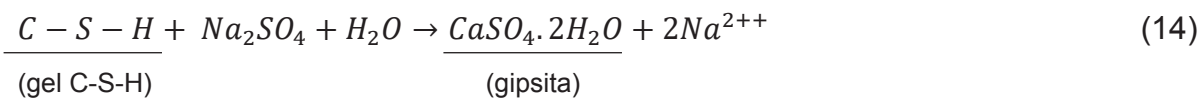
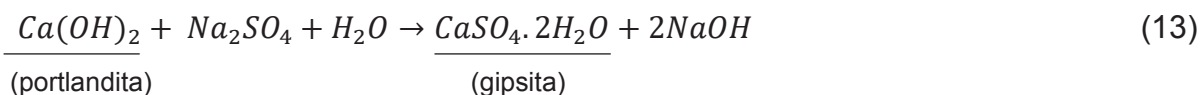
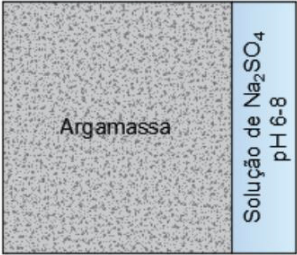
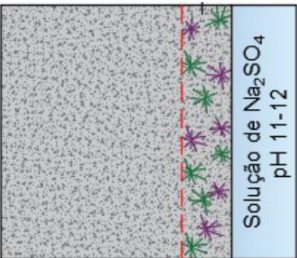
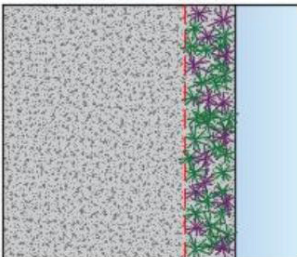
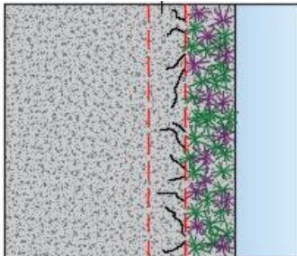
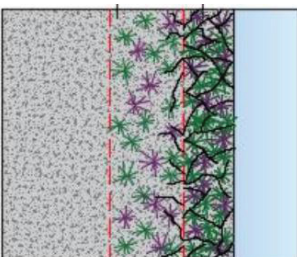
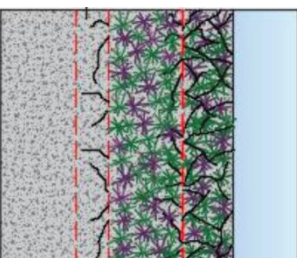


Figura 9 – Etapas da degradação do ataque por sulfato de sódio.

Fase	Representação	Descrição
1		A argamassa é exposta à solução do sulfato de sódio que possui pH entre 6 e 8.
2		Na superfície, têm-se início a formação de gipsita e etringita. A formação do hidróxido de sódio, bem como o transporte de hidroxilas para fora da argamassa, faz com que a solução de sulfato de sódio eleve seu pH para valores em torno de 11.
3		A gipsita e etringita preenchem os poros e dão início a formação de pressões internas. Começam-se a perceber expansões e formação de microfissuras.
4		Quanto as tensões internas ultrapassam a resistência da argamassa, forma-se uma rede de fissuras irregulares. Estas fissuras geram alterações nas propriedades mecânicas e no coeficiente de difusão. As fissuras formam caminhos que permitem que os sulfatos cheguem em regiões mais profundas da argamassa.
5		A presença de sulfatos em camadas mais profundas dá início à formação de gipsita e etringita. A evolução das reações nas camadas superficiais leva a desintegração da argamassa, dando início ao descolamento em grandes pedaços.
6		A Fase 4 se repete na camada mais profunda, permitindo que os sulfatos atinjam camadas ainda mais internas. O ataque continua avançando até a desintegração total da argamassa.

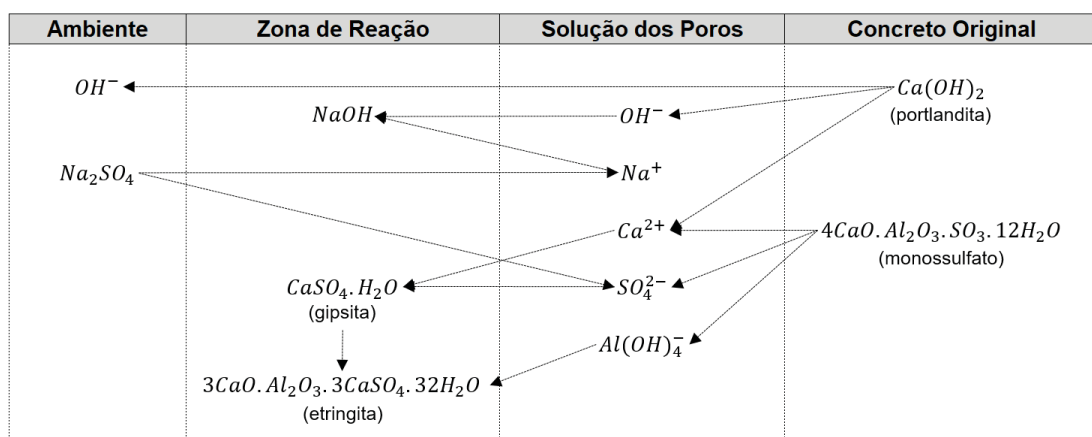
Fonte: Adaptado de Brekailo (2019)

Em seguida, a gipsita reage com as fases da matriz cimentícia que contenham aluminatos, formando etringita secundária ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$). No cimento hidratado, a principal fonte de aluminatos se encontra no monossulfato e, em menor escala, em grãos de aluminato tricálcico (C_3A) ainda não hidratados (NEVILLE, 2012). A Equação (10) e a Equação (12) (apresentadas previamente) apresentam, respectivamente, a formação de etringita a partir da reação da gipsita com o aluminato tricálcico e monossulfato.

Durantes estas reações, o movimento de íons hidroxila (OH^-) para fora do concreto pode ser percebido. Este fenômeno pode causar o aumento do pH da superfície do concreto e também do ambiente ao qual a estrutura está exposta (SKALNY; MARCHAND; ODLER; 2002). Na Figura 10 é apresentada uma esquematização do mecanismo do ataque por sulfato de sódio, apresentando os principais compostos e etapas das reações apresentadas nas Equações (13) e (14).

A difusão dos íons sulfato na rede de poros do concreto é mais lenta que as reações químicas com os compostos da pasta (IKUMI *et al.*, 2016). Por esta razão, a deterioração em camadas, como apresentado na Figura 9, é uma das principais características do ataque externo de sulfatos. O avanço gradual do ataque por sulfatos pode ser percebido também através de análises microestruturais, como as difratometrias de raios-X apresentadas na Figura 11, e as microscopias apresentadas na Figura 12.

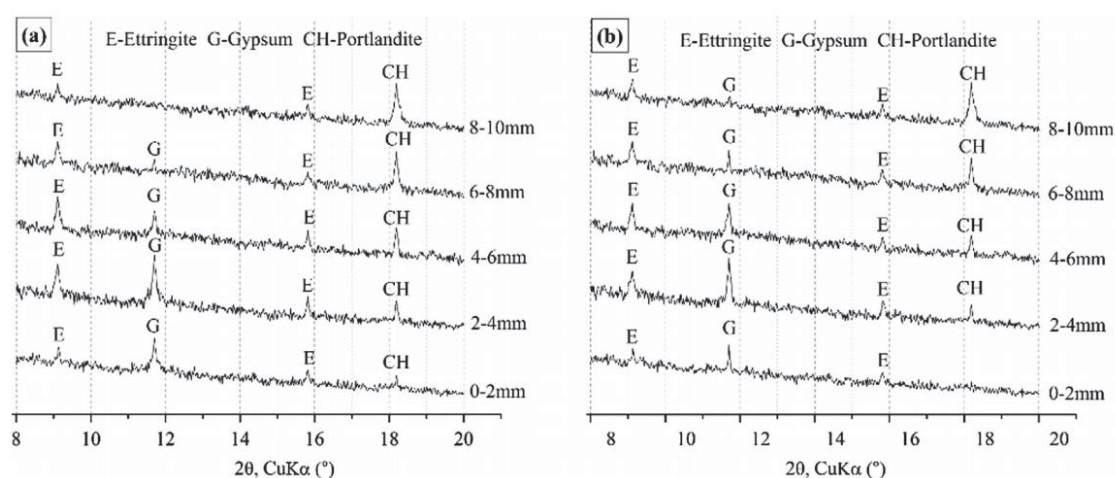
Figura 10 – Resumo do mecanismo do ataque por sulfato de sódio.



Fonte: Adaptado de Skalny, Marchand & Odler (2002)

Na Figura 11, observa-se a redução dos picos de portlandita nas profundidades superficiais do concreto, que é consumida pelas reações do ataque por sulfatos. Nas camadas superficiais, percebem-se também os picos de formação de gipsita e de etringita. Comparando as idades de 180 e 360 dias (Figura 11a e Figura 11b), o avanço do ataque por sulfatos pode ser visto pela detecção de maiores gipsita e etringita nas maiores profundidades.

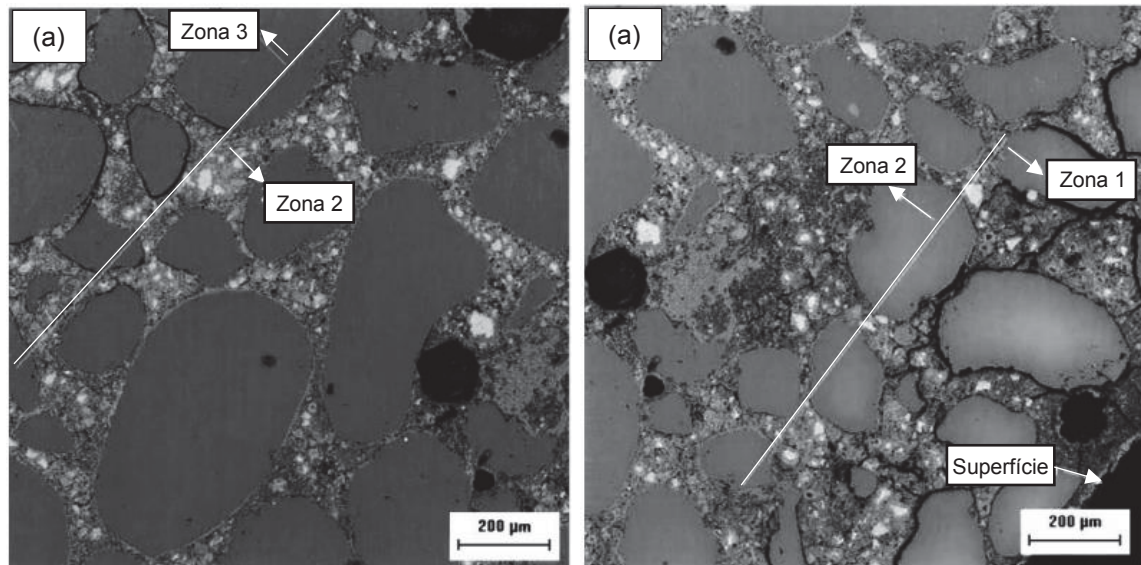
Figura 11 – Análises de DRX para diferentes profundidades de concretos expostos ao ataque externo por sulfatos: (a) 180 dias, (b) 360 dias.



Fonte: Xiong (2016)

Por meio de análises de MEV apresentadas na Figura 12, Santhanam, Colen e Olek (2003) observaram a formação de zonas paralelas à superfície, com diferentes configurações da microestrutura. A camada mais superficial, denominada Zona 1 (Figura 12a), apresenta uma predominância de depósitos de etringita e C-S-H decalcinado, representados pelas zonas escuras na micrografia. A Zona 2, apresenta abundantes depósitos de gipsita dispersos na pasta e no entorno dos agregados, representados por manchas cinzas mais claras na Figura 12a e Figura 12b. A Zona 3, mais profunda, apresenta uma microestrutura ainda inalterada em relação à concretos não expostos ao ataque por sulfatos, nessa região, depósitos de portlandita ainda são abundantes no entorno dos agregados.

Figura 12 – Micrografias mostrando a deterioração em camadas em argamassas expostas ao ataque externo por sulfatos.



Fonte: Traduzido de Santhanam, Cohen e Olek (2003).

Pelo mecanismo de formação de subprodutos apresentado previamente, percebe-se que a ocorrência e a intensidade do ataque externo por sulfato de sódio dependem diretamente da disponibilidade da portlandita e de aluminatos na matriz cimentícia, ou seja, da composição do cimento utilizado.

A utilização de cimentos com menores teores de aluminatos propicia uma maior resistência ao ataque por sulfato de sódio (HOSSACK; THOMAS, 2015; BREKAILO, 2019). Nesta condição, menos monossulfato será formado na matriz cimentícia hidratada e, conseqüentemente, menos etringita secundária será formada.

Segundo Skalny, Marchand e Odler (2002), a resistência do concreto contra o ataque por sulfato de sódio também pode ser aumentada pelo aumento do teor de gesso no cimento utilizado, desde que o teor de sulfetos (SO_3) seja mantida dentro dos limites aceitáveis. No Brasil, a NBR 16697 (ABNT, 2018) limita em 4,5% (em massa) o teor de SO_3 para todos os tipos de cimentos Portlands produzidos. Nesta situação, menos etringita primária será dissolvida em monossulfato, reduzindo a quantidade de etringita secundária que poderá ser formada na ocorrência do ataque por sulfatos.

2.2.3 Modelagem do Ataque Externo por Sulfatos

Ao longo dos anos, diversos modelos matemáticos foram propostos com o objetivo de prever a velocidade e intensidade da degradação de estruturas de concreto expostas aos íons sulfato. Os primeiros modelos, propostos nas décadas de 1970 e 1980, se baseavam em equações empíricas elaboradas a partir da extrapolação de resultados de longas campanhas experimentais de campo ou em laboratório (KALOUSEK; PORTER; BENTON, 1972; ATKINSON; HEARNE, 1984; SHUMAM *et al.*, 1989; JAMBOR, 1998).

Em um dos modelos pioneiros, a equação apresentada por Atkinson e Hearne (1984) tinha como objetivo estimar a profundidade de penetração de sulfatos através da rede de poros do concreto. O modelo proposto pelos autores, apresentado na Tabela 2, considera como variáveis de entrada apenas características da agressividade do meio e da reatividade do cimento, deixando de considerar as propriedades de transporte do concreto em sua abordagem. Como resultando desta simplificação, o modelo assume uma relação linear entre a profundidade de penetração de sulfatos e o tempo.

Tabela 2 – Modelos empíricos para a previsão do ataque externo por sulfatos.

Autor	Equação proposta	
Atkinson e Hearne (1984)	$X = \frac{4,2}{5} * \frac{C_{C_3A}}{8} * \frac{(Mg^{2+} SO_4^{2-})}{0,19} * t \quad (*)$	(15)
Shumam <i>et al.</i> (1989)	$X = 1,86 * 10^6 C_{C_3A} (Mg^{2+} + SO_4^{2-}) D_0 * t \quad (**)$	(16)
Jambor (1998)	$GC = [0,11S^{0,45}] * [0,143t^{0,33}] * [0,204e^{0,145C_{C_3A}}] \quad (***)$	(17)
Obs.:	(*) X: profundidade de difusão (cm), C_{C_3A}: teor de C₃A no cimento (%), $Mg^{2+} SO_4^{2-}$: concentração da solução de sulfatos (mol/L), e t é o tempo em que se deseja conhecer a profundidade de difusão (anos). (**) D_0: coeficiente de difusão de sulfatos no concreto não degradado. (***) GC: grau de corrosão; S: concentração da solução de sulfatos (g/L), t: tempo (dias), e C_{C_3A}: teor de C₃A no cimento (%).	

Fonte: O autor.

Shumam *et al.* (1989) adaptaram o modelo de Atkinson e Hearne (1984) buscando incorporar as propriedades de transporte do concreto na modelagem, inseridas no modelo na forma do coeficiente de difusão do concreto, como apresentado na Tabela 2. Apesar da adaptação do modelo, sabe-se que o coeficiente de difusão do concreto não é constante ao longo do tempo, mas sim variável em função do refinamento da rede de poros devido a hidratação do cimento ou pela fissuração causada pelo próprio ataque por sulfatos, aspecto não considerado no modelo de Shumam *et al.* (1989).

Mais tarde, Jambor (1998) propôs o modelo apresentado na Tabela 2 para estimar o “grau de corrosão” do concreto, índice que o autor define como um indicativo da quantidade das fases do cimento consumidas em reações com o íon sulfato. O modelo de Jambor (1998) se diferencia por deixar de considerar uma relação linear entre a profundidade de penetração de sulfatos e o tempo. Todavia, assim como o modelo de Atkinson e Hearne (1984), o modelo de Jambor (1998) não incorpora dados das propriedades de transporte do concreto na modelagem do avanço da deterioração.

Além da falta de variáveis para representar todos os aspectos que influenciam o desenvolvimento do ataque por sulfatos, os modelos empíricos também têm como desvantagem a limitação de aplicação para situações semelhantes as quais o modelo foi desenvolvido inicialmente (IKUMI *et al.*, 2016). Com o desenvolvimento e consolidação do conhecimento teórico acerca dos mecanismos envolvidos nas reações do ataque por sulfato, começaram-se a desenvolver modelos de previsão adotando uma abordagem físico-mecânica, com variados níveis de complexidade.

A abordagem mecânica se diferencia do empirismo ao utilizar do conhecimento teórico disponível para buscar relações entre variáveis consideradas relevantes para o comportamento da manifestação patológica (ZHOU *et al.*, 2015). As variáveis são então relacionadas através de uma equação matemática sem a necessidade de coeficientes de ajuste, permitindo que a mesma seja aplicada em variados ambientes e condições sem perder sua validade interna (LEE *et al.*, 2012; IKUMI *et al.*, 2014; ZHOU *et al.* 2015).

Os trabalhos de Tixier e Mobasher (2003a, 2003b) são um ponto de destaque na linha do tempo do desenvolvimento da modelagem mecânica do ataque por

sulfatos. As hipóteses e deduções propostas pelos autores servem de base para boa parte dos modelos mecânicos e modelos integrados desenvolvidos até os dias de hoje (IKUMI, 2017).

De forma geral, a formulação de Tixier e Mobasher (2003a) propõe que o problema da modelagem do ataque por sulfatos seja dividido em quatro aspectos: (a) a movimentação dos íons sulfato pela rede de poros do concreto; (b) o consumo das fases da matriz cimentícia e formação de subprodutos; (c) a formação e propagação de fissuras; e (d) a resposta mecânica do concreto.

A movimentação dos sulfatos no interior do concreto é assumida como um processo exclusivamente de difusão iônica, onde os íons sulfato se movimentam devido ao gradiente de concentração na solução dos poros (TIXIER; MOBASHER, 2003; BARY et al., 2014; IKUMI et al., 2014; ZHOU et al., 2015). A segunda lei de Fick é utilizada para representar a difusão dos íons sulfato na rede de poros do concreto.

A modelagem do consumo das fases da matriz cimentícia devido às reações químicas com os íons sulfato é, na grande parte dos modelos, representada por um parâmetro de reatividade do concreto, comumente definido pelo teor de C_3A (aluminato tricálcico) presente no cimento utilizado em sua produção (ATKINSON; HEARNE, 1985; KURTIS; MONTEIRO, 2000; IKUMI et al., 2014; ZHOU et al., 2015). Clifton e Pommersheim (1994) adotaram também o teor de cimento por unidade de volume do concreto como uma das variáveis da modelagem.

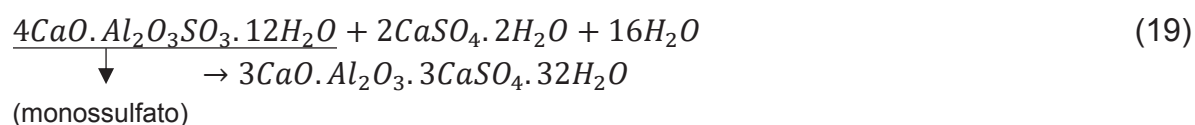
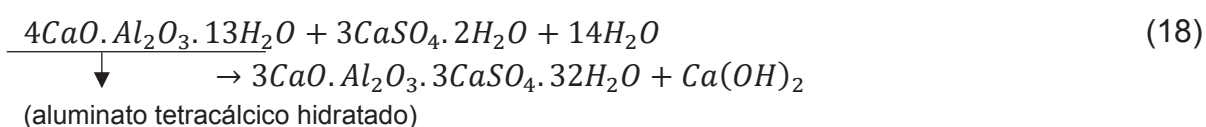
Como discutido no item 2.2, o papel da gipsita na formação dos esforços expansivos no concreto ainda é incerto e assunto de discussão (TIAN; COHEN, 2000; NEVILLE, 2002; IKUMI, 2017; MINDESS, 2019). Por esta razão, a grande maioria dos modelos propostos para o ataque por sulfato atribui todo o esforço expansivo gerado à formação de etringita, considerando a gipsita apenas como uma fase intermediária do ataque por sulfatos (IDIART et al., 2011; IKUMI et al., 2014; ZHOU et al., 2015). A Tabela 3 apresenta algumas referências que contém modelos de previsão desenvolvidos nos últimos anos, indicando como a formação de esforços expansivos é atribuída aos subprodutos das reações químicas e o mecanismo de expansão assumido.

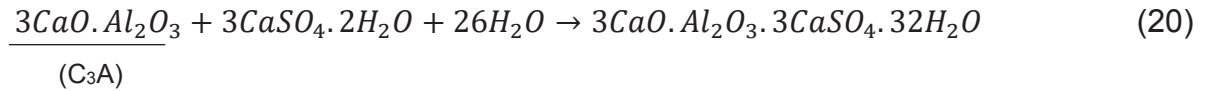
Tabela 3 – Referências bibliográficas de modelos desenvolvidos nos últimos anos.

Autor	Ano	Mecanismo de expansão	Produto expansivo
Tixier e Mobasher	2003	Aumento do volume de sólidos	Etringita
Bary <i>et al.</i>	2008	Pressão de cristalização	Etringita e gipsita
Idiart <i>et al.</i>	2011	Aumento do volume de sólidos	Etringita
Cefis e Comi	2014	Aumento do volume de sólidos	Etringita
Bary <i>et al.</i>	2014	Pressão de cristalização e aumento do volume de sólidos	Etringita
Ikumi <i>et al.</i>	2014	Aumento do volume de sólidos	Etringita
Cefis e Comi	2017	Aumento do volume de sólidos	Etringita e gipsita
Soive e Quan-Tran	2017	Pressão de cristalização	Etringita e gipsita
Yu e Zhang	2018	Aumento do volume de sólidos	Etringita

Fonte: Adaptado de Ikumi *et al.* (2016).

Outra simplificação adotada na modelagem das reações químicas diz respeito às diferentes reações de formação da etringita. No concreto não degradado, existem diversas fases contendo cálcio-aluminatos, que, quando expostos à gipsita, participam das reações de formação da etringita (TIXIER; MOBASHER, 2003a). As Equações (18), (19) e (20) apresentam as três principais fases contendo cálcio-aluminatos e as respectivas reações químicas de formação de etringita.





Cada uma destas reações apresenta intensidades e frequências diferentes, e, também, diferentes variações de volume entre os reagentes e a etringita formada. Por isso, Tixier e Mobasher (2003a) propuseram que as diferentes reações de formação de etringita sejam simplificadas em uma única reação química típica, como apresentado na Equação (21).



Onde C_a é o teor equivalente de cálcio-aluminatos disponíveis, definido pela Equação (22).

$$C_a = \sum_{i=1}^3 \gamma_i P_i \quad (22)$$

Onde γ_i representa o teor de aluminatos em cada um dos reagentes apresentados nas Equações (18), (19) e (20), representados pela letra P .

Na Equação (21), q é peso estequiométrico médio das reações de formação de etringita, definido pela Equação (23).

$$q = \sum_{i=1}^3 \gamma_i a_i \quad (23)$$

Onde a_i representa o valor estequiométrico dos sulfatos presentes na gipsita em cada uma das reações apresentadas nas Equações (18), (19) e (20). Sendo assim, a formação de etringita é quantificada a partir de uma única reação química

simplificada, assumindo uma variação de volume constante entre o reagente e o subproduto.

A teoria da formação de forças de expansão devido à pressão de cristalização tem sido apoiada por trabalhos recentes acerca dos mecanismos do ataque por sulfatos (BARY *et al.*, 2014; IKUMI *et al.*, 2014). Todavia, a aplicação desta teoria nos modelos de previsão é limitada, pois requer complexas análises químicas e o monitoramento da composição da solução dos poros do concreto (IKUMI *et al.*, 2014). Por esta razão, a teoria do aumento do volume de sólidos é utilizada na grande maioria dos modelos disponíveis para a previsão da expansão do concreto submetido ao ataque externo por sulfatos (IKUMI *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2015).

Com a formação gradativa de etringita através das reações das fontes de cálcio-aluminato com a gipsita, a rede de poros do concreto é gradativamente refinada até o momento que não há espaço suficiente para acomodar a etringita formada, causando a formação de esforços internos (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2012). O processo de acomodação de etringita no vazio dos poros, sem a geração de esforços de expansão, é quantificado por um coeficiente de amortecimento (TIXIER; MOBASHER, 2003a).

O coeficiente de amortecimento do concreto é definido por uma fração da porosidade inicial do concreto que pode ser preenchida por subprodutos antes que esforços de expansão comecem a se formar (TIXIER; MOBASHER, 2003a; IDIART *et al.*, 2011). Na literatura, diversos valores são propostos para este coeficiente: Clifton e Pommersheim (1994) acreditavam que os esforços de expansão se iniciam apenas quando 100% da porosidade do concreto é preenchida, Tixier e Mobasher (2003a) propõem que este valor varia entre 6% e 40% para diferentes tipos de concreto. Yu, Zhang e Khennane (2015), por sua vez, indicam o valor de 36%.

Uma vez que a capacidade de amortecimento da rede de poros seja alcançada, a continuidade na formação de etringita irá representar a formação de esforços de expansão e consequente fissuração da matriz cimentícia (NEVILLE, 2012). A modelagem da formação de microfissuras na matriz cimentícia é comumente realizada pela incorporação de uma variável de dano macroscópico, conforme proposto por Tixier e Mobasher (2003a), baseando-se em teorias da mecânica do dano.

Nas últimas décadas, teve-se também o advento dos modelos integrados para a previsão do ataque por sulfatos (MALTAIS; SAMSON; MARCHAND, 2004; SAMSON; MARCHAND, 2007; IKUMI *et al.*, 2014; CEFIS; COMI, 2017; SOIVE; QUAN-TRAN, 2017). Estes modelos utilizam de processos iterativos resolvidos por softwares computacionais para modelar o mecanismo de degradação considerando o maior número possível de variáveis e processos (SAMSON; MARCHAND, 2007; LOTHENBACH *et al.*, 2010; IKUMI, 2017). Atualmente, estes modelos possibilitam a maior precisão na modelagem do ataque, porém, a complexidade das equações e a necessidade de alta capacidade computacional dificultam seu emprego em usos cotidianos e a sua incorporação em normas regulamentadoras (IKUMI *et al.*, 2016).

O presente trabalho não abrange a utilização de modelos integrados de grande complexidade. Para maior aprofundamento nas hipóteses e desenvolvimento dos métodos, sugere-se a leitura dos trabalhos específicos do tema (TIXIER; MOBASHER, 2003a; TIXIER; MOBASHER, 2003b; BARY *et al.*, 2014; IKUMI *et al.*, 2014; CEFIS; COMI, 2017; SOIVE; QUAN-TRAN, 2017; YU; ZHANG, 2018).

Buscando simplificar a modelagem do processo de deterioração do ataque por sulfatos de forma a permitir a inclusão em normativas e cadernos técnicos, bem como a difusão na comunidade técnica e acadêmica, percebe-se também uma busca pelo desenvolvimento de modelos mecânicos simplificados, que permitam ao Engenheiro uma resolução direta e intuitiva sem a necessidade do uso de complexos processos computacionais (LEE *et al.*, 2012; ZHOU *et al.* 2015; IKUMI *et al.*, 2016). Dentre os diversos modelos mecânicos simplificados encontrados na literatura, dá-se destaque aos modelos de Lee *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2015).

Lee *et al.* (2013) propuseram um modelo mecânico simplificado para a previsão da profundidade de penetração dos íons sulfato no concreto. Em seu modelo, apresentado na Equação (24), os autores abrangem a agressividade do meio (pela concentração da solução de sulfatos), as propriedades de transporte do concreto (através do coeficiente de difusão do concreto não degradado) e a reatividade do concreto (através do teor de C₃A no cimento utilizado).

$$X = \sqrt{\frac{2D_0 C_s t}{C_{C_3A}}} \quad (24)$$

Onde D_0 é o coeficiente inicial de difusão dos sulfatos no concreto, C_s é a concentração de sulfatos no meio agressivo, t é o tempo de exposição, e C_{C_3A} é a concentração de aluminato tricálcico no cimento utilizado na produção do concreto.

O modelo de Lee *et al.* (2013) permite uma resolução simplificada e direta; entretanto, o modelo não foi experimentalmente verificado pelos autores. Além disso, o modelo deixa de incorporar a variabilidade dos parâmetros ao longo do tempo.

O modelo proposto por Zhou *et al.* (2015) é baseado na adaptação do modelo de Lee *et al.* (2013), buscando incorporar a variação temporal do coeficiente de difusão e da cinética das reações ao longo do tempo.

As hipóteses e formulações do modelo de Zhou *et al.* (2015) são apresentadas em detalhe na sequência, uma vez que o modelo será aplicado para o desenvolvimento da presente dissertação. O modelo proposto se baseia em três princípios básicos:

1. Assume-se a difusão iônica como o principal mecanismo de transporte pelo qual os sulfatos ingressam no concreto, sendo o processo de difusão definido pela segunda Lei de Fick. Assumindo um tempo t (dias), a profundidade de difusão de SO_4^{2+} como x (m), a concentração de sulfatos passando pela área S (m²) de concreto como $C(x)$ (mol/m³) e a massa sendo $M(x)$ (mol), pode-se derivar a Equação (25).

$$M(x) = -D_e \cdot S \cdot \frac{dC(x)}{dx} \cdot dt \quad (25)$$

Onde D_e é o coeficiente de difusão efetivo dos sulfatos no concreto. O sinal negativo indica que a difusão se dá para na direção da menor concentração.

2. A distribuição da concentração de sulfatos na espessura do concreto pode ser simplificada por uma distribuição linear. Portanto, têm-se a relação apresentada na Equação (26).

$$\frac{dC(x)}{dx} = - \frac{C_s - C_0}{x} \quad (26)$$

Onde C_s é a concentração de sulfatos na superfície do concreto, e C_0 é a concentração de sulfatos no concreto ainda não afetado.

3. Assume-se a equação simplificada de formação de etringita, proposta por Tixier e Mobasher (2003a), apresentada na Equação (21).

Assumindo-se que a quantidade de sulfato difundido pela rede de poros em um tempo dt reage com o cálcio-aluminatos existentes na camada dx do concreto, a Equação (27) pode ser formulada a partir da lei de conservação de massa

$$C_{CA} \cdot S \cdot dx = -qD_e \cdot S \cdot \frac{\partial C(x)}{\partial x} dt \quad (27)$$

Onde q representa o peso estequiométrico médio das reações de formação de etringita. A dedução do parâmetro q é apresentada na Equação (23). Zhou *et al.* (2015) indicam a utilização do valor de 2,67, baseado em Liu *et al.* (2014), quando a determinação do parâmetro real não foi possível.

Combinando as Equações (26) e (27), e então integrando ambos os lados da equação resultante, deriva-se a Equação (28), que define a profundidade de difusão dos sulfatos no concreto. Para a dedução completa da equação, indica-se a leitura do trabalho original.

$$X = \sqrt{\frac{2D_e(C_s - C_0)q}{C_{CA}}} \sqrt{t} \quad (28)$$

A fim de incorporar a variação do coeficiente de difusão (D_e) ao longo do tempo, propõem-se a utilização de um coeficiente de atenuação definido experimentalmente, a ser utilizado conforme apresentado na Equação (29).

$$D_e = D_{e,0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (29)$$

Onde $D_{e,0}$ é o coeficiente de difusão medido em um dado tempo t_0 , e m é o coeficiente de atenuação das reações. Incorporando a Equação (29) na Equação (28), têm-se a Equação (30).

$$X = \sqrt{\frac{2D_{e,0}t_0^m(C_s - C_0)q}{C_{CA}}} \sqrt{t^{1-m}} \quad (30)$$

A adoção da difusão iônica como o único processo de transporte no interior do concreto assume indiretamente que o concreto está permanentemente submerso na solução agressiva de sulfatos. A fim de considerar diferentes métodos de degradação acelerada, os autores propõem a incorporação de um fator de aceleração das reações, a fim de se corrigir as mudanças nas características da difusão dos sulfatos. O coeficiente de correlação é definido na Equação (31).

$$D_{e,0} = \eta^2 D_{e,t} \quad (31)$$

Onde η é o fator de aceleração das reações devido ao método de exposição aos sulfatos, e $D_{e,t}$ é o coeficiente de difusão natural do material. Para a aplicação da equação, Zhou *et al.* (2015) indicam que η seja determinado a partir do ajuste de dois pontos conhecidos. Incorporando a Equação (31) na Equação (30), têm-se o modelo de previsão proposto pelos autores, definido pela Equação (32).

$$X = \eta \sqrt{\frac{2D_{e,0}t_0^m(C_S - C_0)q}{C_{CA}}} \sqrt{t^{1-m}} \quad (32)$$

Para um determinado concreto, dois pontos distintos no tempo, t_1 e t_2 , podem ser definidos pelas Equações (33) e (34).

$$X_1 = \eta \sqrt{\frac{2D_{e,0}t_0^m(C_S - C_0)q}{C_{CA}}} \sqrt{t_1^{1-m}} \quad (33)$$

$$X_2 = \eta \sqrt{\frac{2D_{e,0}t_0^m(C_S - C_0)q}{C_{CA}}} \sqrt{t_2^{1-m}} \quad (34)$$

Dividindo a Equação (33) pela Equação (34), se obtém a Equação (35).

$$X_2 = X_1 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^{\frac{1-m}{2}} \quad (35)$$

Logo, m pode ser definido conforme a Equação (36):

$$m = 1 - 2 \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{\ln t_2 - \ln t_1} \quad (36)$$

A fim de verificar experimentalmente a equação proposta, Zhou *et al.* (2015) expuseram corpos de prova de concreto (consumo de cimento = 417 kg/m³; relação a/c = 0,48; teor de C₃A = 8,74%; resistência aos 28 dias = 56,1 MPa) a ciclos de molhagem e secagem (imersão por 9 h, secagem a temperatura ambiente por 1 h, secagem a 40° por 1 h, secagem em temperatura ambiente por 1h) em solução de 7% de sulfato de sódio por um período de 150 dias. Após 30, 60, 90, 120 e 150 dias de exposição aos ciclos de molhagem e secagem, os corpos de prova foram cortados em

fatias de 5 mm de espessura. O teor de sulfatos presente em cada camada foi determinado pelo processo de titulação química, permitindo a elaboração de um perfil de sulfatos.

O coeficiente de difusão efetivo ($D_{e,0}$ na Equação (29)) foi determinado pelo ajuste de uma curva baseada na segunda lei de Fick sobre os dados do perfil de sulfato correspondente à 30 dias de degradação. O coeficiente de atenuação das reações (m na Equação (29)) foi determinado a partir da comparação dos perfis de sulfato nas datas de 30 e 60 dias de degradação. Com os dados apresentados acima, a aplicação do modelo para a previsão da profundidade de penetração de sulfatos nas idades de 90, 120 e 150 dias resultou em erros de 5,9%, 8,1% e 1,6%, respectivamente.

Com o objetivo de complementar a verificação experimental, Zhou *et al.* (2015) aplicaram o modelo em dados de perfis de sulfato apresentados por Liu *et al.* (2014). Os erros obtidos foram de 20,3%, 13,8%, 10,1% e 1,1% para previsões da profundidade de penetração de sulfatos nas idades de 15, 20, 25 e 30 dias, respectivamente.

Dessa forma, o modelo proposto por Zhou *et al.* (2015) se destaca dos demais modelos mecânicos simplificados por incorporar questões complexas da variação das propriedades do concreto ao longo do tempo de exposição e por permitir a consideração dos diferentes tipos de exposição aos sulfatos (imersão, ciclos de molhagem e secagem, névoa, etc.). Apesar disto, o modelo permite uma resolução rápida e direta, obtendo erro médio de 5,6% na verificação experimental dos autores.

2.2.4 Discussão final sobre o ataque por sulfatos

Com base na revisão da literatura apresentada ao longo do item 2.2, pode-se destacar as seguintes conclusões acerca dos mecanismos, manifestações e consequências do ataque por sulfatos em estruturas de concreto:

- a. Os íons sulfato presentes na rede de poros do concreto reagem com as fases contendo cálcio e aluminados do cimento Portland hidratado, formando gipsita e etringita (MEHTA; MONTEIRO, 2014);

- b. As principais manifestações do ataque por sulfatos são a formação de fissuras irregulares e o deslocamento em camadas do concreto. Além disso, têm-se também a expansão macroscópica, perda de resistência mecânica e a perda de massa (NEVILLE, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2014);
- c. O mecanismo de expansão do ataque por sulfatos ainda é incerto. As principais teorias que buscam explicar o papel da gipsita e da etringita em tal fenômeno são a teoria do aumento de volume de sólidos e a teoria da pressão de cristalização (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; KUNTHER; LOTHENBACH; SCRIVENER, 2013; IKUMI, 2017).
- d. A difusão dos íons sulfato na rede de poros do concreto é mais lenta que as reações químicas com os compostos da pasta. Por esta razão, o ataque externo de sulfatos é caracterizado por uma deterioração em camadas (IKUMI *et al.*, 2014).

No que diz respeito a modelagem do ataque por sulfatos, observou-se que trabalhos recentes têm buscado:

- a. Ikumi *et al.* (2014) – Proposta de um modelo teórico integrado com uma nova abordagem para a consideração da configuração da rede de poros do concreto. O modelo adota uma simplificação dos processos químicos envolvidos nas reações dos sulfatos com as fases hidratadas da matriz cimentícia;
- b. Zhou *et al.* (2015) – Modelo teórico simplificado que incorpora a variação temporal das propriedades do concreto e os diferentes métodos de exposição aos sulfatos;
- c. Ikumi *et al.* (2016) – Proposta de um modelo teórico simplificado baseado em Ikumi *et al.* (2014), permitindo a resolução direta da equação do modelo para prever a profundidade de penetração dos íons sulfato no concreto. Equações para a avaliação do potencial de dano são também propostas;
- d. Yi, Chen, e Bindiganaville (2019) – Proposta de um modelo teórico integrado que considera o concreto como um material não-homogêneo, considerando as diferentes propriedades de transporte entre o agregado e a pasta;

- e. Qin *et al.* (2020) – Modelo teórico integrado que incorpora o efeito da lixiviação de cálcio e da variação de temperatura na análise das reações químicas do ataque por sulfatos.
- f. Zou *et al.* (2021) – Modelagem numérica do ataque externo por sulfatos, explorando os efeitos da concentração da solução agressiva e da temperatura de exposição. O modelo apresenta boa representatividade da aceleração nas taxas de reação causadas pelo aumento de temperatura.

Dessa forma, percebe-se que as pesquisas recentes acerca da modelagem do ataque por sulfatos são distintas, cada uma buscando incorporar um aspecto do ataque que não foi considerado nos modelos predecessores. Este cenário destaca o grande número de incertezas e lacunas existentes no entendimento do mecanismo de degradação do ataque por sulfatos.

Assim, nota-se que a presente pesquisa está alinhada com o cenário de pesquisas acerca da durabilidade e do desenvolvimento sustentável de estruturas. Como discutido, a simplificação dos modelos de previsão da vida útil de estruturas é um objetivo atual e pertinente, sendo esta a principal colaboração da pesquisa à comunidade científica.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

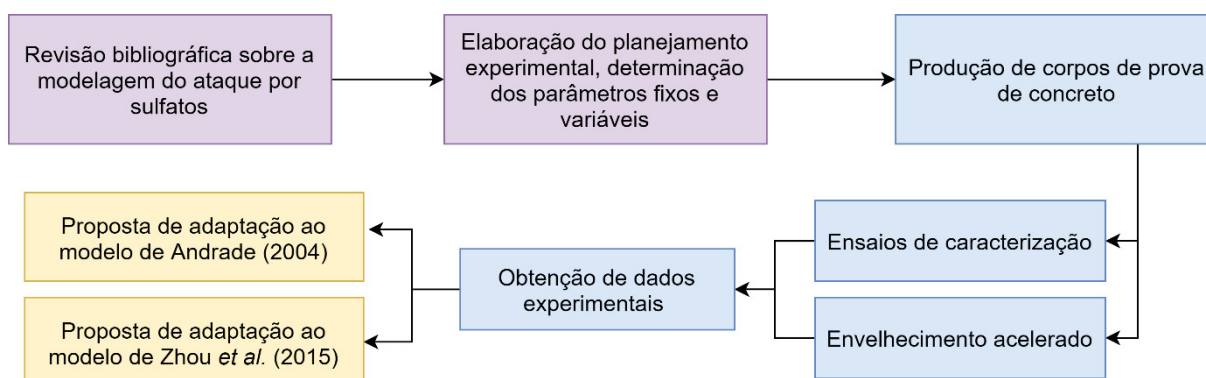
O objetivo da presente pesquisa é a utilização da Resistividade Elétrica Superficial (RES) do concreto como um parâmetro de entrada em modelos de previsão de vida útil de estruturas de concreto submetidas ao ataque externo de sulfatos. Dessa forma, a metodologia experimental da pesquisa foi planejada a fim de permitir o monitoramento da RES e do avanço do ataque por sulfato em corpos de prova de concreto ao longo do período de análise.

Para atingir os objetivos desta pesquisa, elaborou-se o programa experimental com definição das variáveis de análise, caracterizando os materiais utilizados e apresentando os métodos de ensaios adotados.

3.1 FLUXO DE TRABALHO

Na Figura 13, o fluxo de trabalho da pesquisa é apresentado na forma de um fluxograma. O fluxo de trabalho busca apresentar, de forma simplificada, as etapas da pesquisa.

Figura 13 – Fluxo de trabalho da pesquisa.



Fonte: O autor.

Inicialmente, uma extensa e detalhada revisão da bibliografia foi desenvolvida para o melhor entendimento do tema, aprofundamento de conceitos teóricos e familiarização com o estado da arte de pesquisas ao redor do mundo. Apenas após esta etapa foi possível o desenvolvimento de um programa experimental da pesquisa, com a certeza de que seriam obtidos resultados significativos, relevantes e capazes de fornecer os dados necessários para a aplicação nos modelos escolhidos.

As etapas de moldagens, cura, e a execução dos ensaios foram realizadas em acordo com as normas nacionais e internacionais vigentes, e serão apresentadas em detalhes na sequência do capítulo.

3.2 VARIÁVEIS DE ANÁLISE

Sendo o objetivo do estudo a modelagem do ataque por sulfatos a partir de dados de Resistividade Elétrica Superficial, a definição das variáveis de análise da pesquisa passa pelo entendimento dos principais fatores que afetam a evolução do ataque externo por sulfatos em estruturas de concreto.

De forma geral, a modelagem dos diversos processos de deterioração do concreto frente à ação de agentes agressivos externos tende a incorporar parâmetros suficientes para representar os mecanismos envolvidos na reação de degradação. Considerando o mecanismo do ataque por sulfatos definido no Capítulo 2, a velocidade e intensidade da degradação são influenciadas por parâmetros inerentes ao concreto, ao ambiente e ao próprio agente agressivo.

Em relação ao concreto, a composição do cimento utilizado representa um importante fator na disponibilidade de aluminatos para participar das reações químicas com os íons sulfato, formando produtos expansivos. A configuração da rede de poros do concreto também influencia significativamente o avanço do ataque. A interconectividade dos poros forma caminhos para os íons sulfato penetrarem para o interior do concreto com maior ou menor facilidade, e a dimensão dos poros representa a capacidade destes de acomodar a formação dos subprodutos sem que se formem tensões internas que acarretem em fissuras e expansão do material. Por isso, optou-se por monitorar a porosidade do concreto de forma indireta através dos

ensaios de absorção de água por imersão. A influência da variação da porosidade foi estudada em dois níveis, controlados pela variação da relação água/cimento do traço do concreto.

Optou-se por fixar a concentração de aluminatos de forma a limitar as variáveis em estudo. Assim, todas as moldagens foram feitas com o mesmo aglomerante, sendo escolhido um cimento Portland CP V-ARI, cuja composição foi definida através de ensaios de fluorescência de raio-X e as fases do clínquer foram estimadas através do método de Bogue modificado (TAYLOR, 1989).

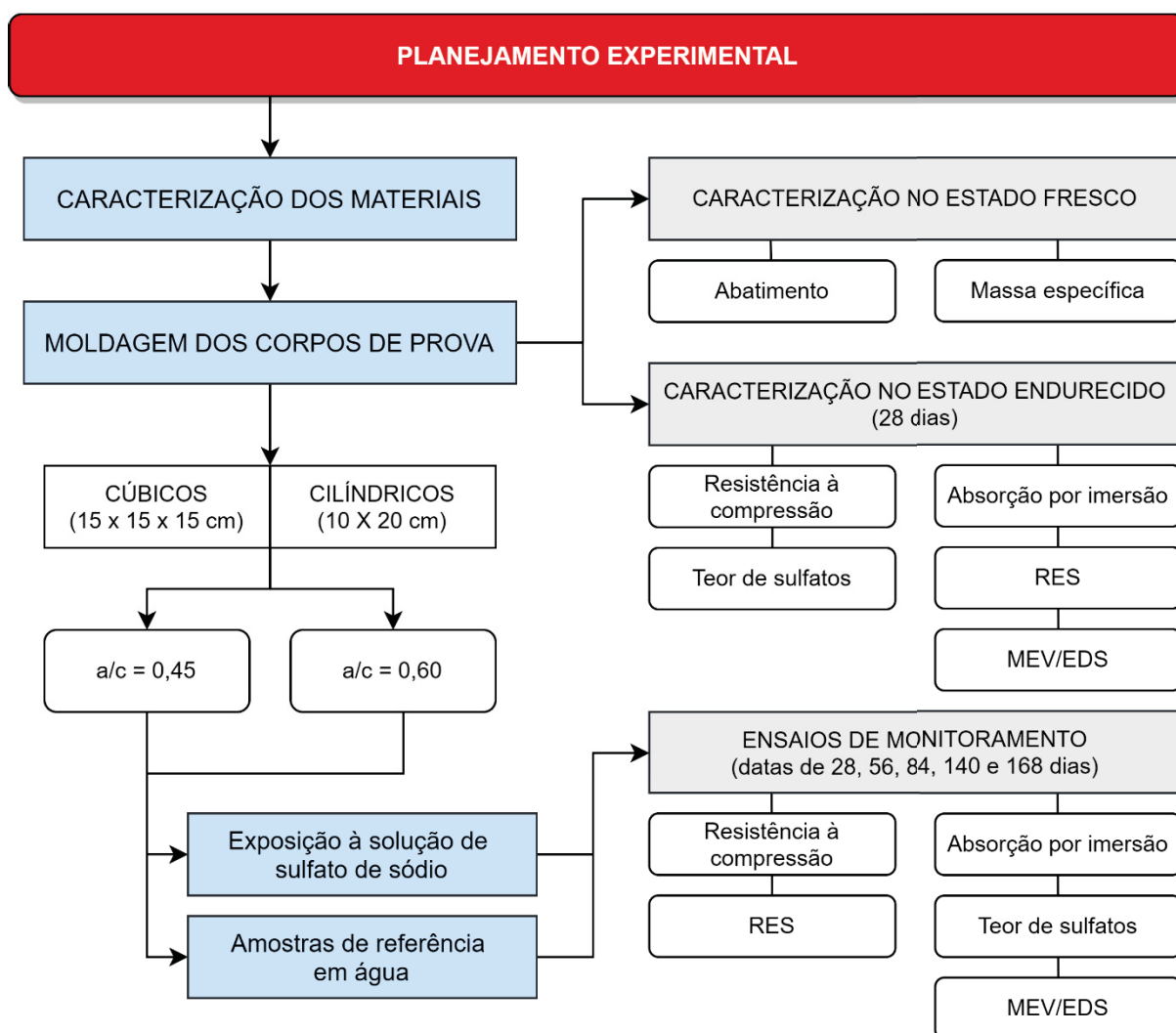
A configuração do ambiente ao qual o concreto está exposto também influencia diretamente na intensidade do ataque por sulfatos. De forma a delimitar as variáveis do estudo, fixou-se a condição de exposição à ciclos de molhagem e secagem em solução de 10% de sulfato de sódio com temperatura controlada em 40 °C. Além disso, amostras foram também submetidas à ciclos de molhagem e secagem em água (também a 40 °C), de forma a servir como amostras de referência.

Com as especificações apresentadas, o concreto, o ambiente e o agente agressivo foram parâmetros controlados e conhecidos na pesquisa. A caracterização do material e o monitoramento do avanço do ataque por sulfatos foram realizados por ensaios físicos e químicos no material endurecido, sendo eles: absorção de água por imersão, resistência à compressão axial, resistividade elétrica superficial, titulação de sulfatos e microscopias eletrônicas de varredura. O coeficiente de difusão dos íons sulfato no interior do concreto foi definido pela aplicação da 2ª lei de Fick para aos dados experimentais obtidos na presente pesquisa. A determinação da expansão linear, condição usualmente medida em estudos de ataque externo por sulfatos, não foi possível na presente pesquisa em função da irregularidade da camada impermeabilizante, que impede as medidas de expansão com a precisão necessária.

Na Figura 14 o planejamento da pesquisa é apresentado na forma de um fluxograma. De maneira resumida, são apresentados a seguir os parâmetros fixos do estudo:

- Cimento utilizado: CP V-ARI;
- Tipo e tempo de cura: imersão em água com cal por 28 dias;
- Tipo de sulfato: sulfato de sódio (Na_2SO_4);
- Condição de exposição: ciclos de molhagem e secagem;
- Concentração de sulfatos: 10%;

Figura 14 – Fluxograma do planejamento experimental da pesquisa.



Fonte: O autor.

As variáveis independentes são aquelas controladas ao longo do estudo, que irão influenciar as variáveis dependentes. Na presente pesquisa, as variáveis independentes são:

- Relação água/cimento: 0,45 e 0,60;
- Tempo de exposição à solução de sulfato: 28, 56, 84, 112 e 140 dias.
- Tipo de exposição: solução de sulfato de sódio e água

As variáveis dependentes são os fatores de resposta do estudo e são influenciadas pela variação das variáveis independentes. Portanto, as variáveis dependentes do estudo são:

- Consistência do concreto;
- Absorção de água por imersão;
- Resistência à compressão axial;
- Resistividade elétrica superficial;
- Concentração de sulfatos no concreto;
- Coeficiente de difusão de sulfatos;

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A confecção dos concretos utilizados na pesquisa utilizou o cimento Portland tipo CP V-ARI. Este aglomerante foi escolhido por ser o cimento disponível no mercado brasileiro com o menor teor de adições (ABNT NBR 16.697, 2018), de forma a reduzir as variáveis no estudo. Ademais, é o cimento com maior concentração de aluminatos (Al_2O_3), tornando-o mais susceptível aos processos de degradação do ataque por sulfatos.

As caracterizações química e física do cimento foram disponibilizadas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente. Os resultados da caracterização são também comparados com os requisitos dispostos na NBR 16.697 (ABNT, 2018) e na ASTM C150 (2020), os quais são atendidos pelo aglomerante em questão.

Tabela 4 – Caracterização química do cimento CP V-ARI

Propriedade	Unidade	CP V-ARI	NBR 16.697	ASTM C150
Al_2O_3	%	4,34	-	-
SiO_2	%	18,55	-	-
Fe_2O_3	%	2,75	-	-
CaO	%	61,76	-	-
MgO	%	3,20	$\leq 6,50$	$\leq 6,00$
SO_3	%	2,72	$\leq 4,50$	$\leq 3,50$
Perda ao fogo	%	3,76	$\leq 6,50$	$\leq 3,50$
CaO livre	%	1,15	-	-
Resíduo Insolúvel	%	0,81	$\leq 3,50$	$\leq 1,50$

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante (2020)

Tabela 5 – Caracterização física do cimento CP V-ARI

Propriedade	Unidade	CP V-ARI	NBR 16.697	ASTM C150
Tempo de pega – início	h:min	3:10	≥ 1:00	≥ 0:45
Tempo de pega – fim	h:min	4:15	≤ 10:00	≤ 6:25
Finura Blaine	cm ² /g	4.480	-	-
Finura Peneira #200 (75 µm)	%	0,04	≤ 6,00	-
Massa específica	g/cm ³	3,09	-	-
Consistência normal	%	29,50	-	-
Resist. à compressão – 1 dia	MPa	24,10	≥ 14,00	≥ 12,00
Resist. à compressão – 3 dias	MPa	39,50	≥ 24,00	≥ 24,00
Resist. à compressão – 28 dias	MPa	54,10	-	-

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante (2020)

Como agregado miúdo, utilizou-se uma areia proveniente de leito de rio. Os resultados obtidos na caracterização do agregado miúdo estão apresentados na Tabela 6, bem como a normativa nacional que define o método de ensaio.

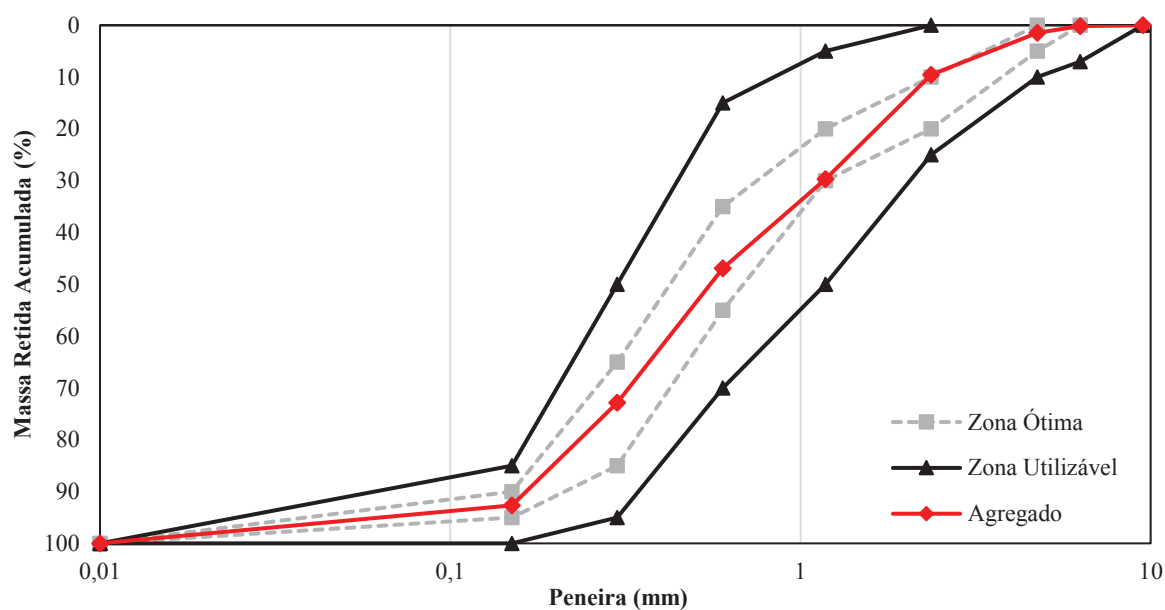
Tabela 6 – Caracterização física do agregado miúdo.

Propriedade	Unidade	Valor	Norma de ensaio
Massa Unitária	g/cm ³	1,45	NBR NM 45 (2006)
Massa específica absoluta	g/cm ³	2,56	NBR NM 52 (2009)
Massa específica aparente	g/cm ³	2,43	
Massa específica SSS	g/cm ³	2,48	
Absorção de água	%	2,00	NBR NM 30 (2001)
Teor de material pulverulento	%	5,95	NBR NM 46 (2003)
Módulo de finura	-	2,53	NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica	mm	4,8	NBR NM 248 (2003)

Fonte: O autor.

A composição granulométrica do agregado miúdo foi avaliada de acordo com a NBR NM 248 (2003). A curva granulométrica obtida, bem como as zonas de classificação definidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009), estão apresentadas na Figura 15.

Figura 15 – Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: O autor.

A Tabela 7 apresenta os resultados da caracterização do agregado graúdo utilizado, bem como a indicação da normativa que define o método de ensaio.

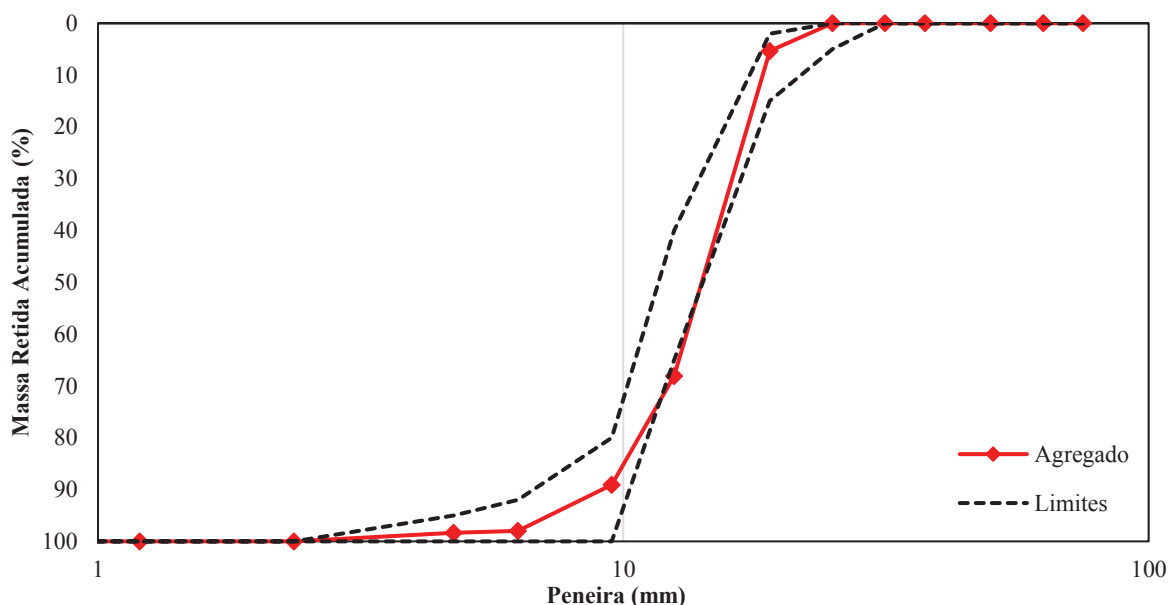
Tabela 7 – Caracterização física do agregado graúdo.

Propriedade	Unidade	Valor	Norma de ensaio
Massa unitária – Ag. Solto	g/cm ³	1,36	NBR NM 45 (2006)
Massa unitária – Ag. Compactado	g/cm ³	1,48	
Massa específica	g/cm ³	2,63	NBR NM 53 (2009)
Massa específica aparente	g/cm ³	2,59	
Teor de material pulverulento	%	5,95	NBR NM 46 (2003)
Absorção de água	%	2,53	NBR NM 53 (2009)
Módulo de finura	-	2,93	NBR NM 248 (2003)
Dimensão máxima característica	mm	19,00	NBR NM 248 (2003)

Fonte: O autor.

A Figura 16 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo utilizado, realizada de acordo com a NBR NM 248 (2003). Os limites admissíveis destacados na figura são definidos pela NBR 7211 (2009).

Figura 16 – Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: O autor.

A água utilizada para a moldagem das amostras foi do tipo potável do sistema de abastecimento público, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR.

3.4 DIMENSÕES E QUANTIDADE DOS CORPOS DE PROVA

A fim de atender as necessidades de cada ensaio realizado, foram moldados corpos de prova de dois diferentes formatos, seguindo modelos e indicações apresentadas na bibliografia. Na Tabela 8 estão apresentadas as características dos corpos de prova utilizados para cada um dos ensaios realizados, bem como a quantidade de amostras moldadas.

A escolha do tamanho e formato dos corpos de prova cúbicos tem por objetivo permitir a realização do ensaio de RES na face que está diretamente exposta à solução agressiva. Este formato de corpo de prova foi também utilizado por Zhou *et al.* (2015). Para a determinação da resistência à compressão axial (ABNT NBR 5738, 2015) e da absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778, 2009) foi realizada a moldagem de corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm.

Tabela 8 – Dimensões e quantidades dos corpos de prova.

Ensaio	Dimensão do CP	Número total de CPs
Resistência à compressão axial	Cilíndrico: 10 x 20 cm	14(*)
Absorção de água por imersão	Cilíndrico: 10 x 20 cm	60(*)
Resistividade elétrica superficial	Prismático: 15 x 15 x 15 cm	36(**)
Titulação de sulfatos	Prismático: 15 x 15 x 15 cm	36(**)

Notas: CP = Corpo de prova

(*) = Os mesmos corpos de prova foram utilizados para os dois ensaios, como será discutido nos itens seguintes.

(**) = Os mesmos corpos de prova foram utilizados para os dois ensaios, como será discutido nos itens seguintes.

Fonte: O autor.

3.5 DOSAGEM E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A definição do concreto utilizado para a moldagem dos corpos de prova da presente pesquisa partiu da escolha de um traço base (denominado Traço A), com proporções unitárias de 1:2,2:2,9, com um consumo de cimento de 350 kg/m³ e relação água/cimento de 0,60. Este traço foi escolhido por ser uma dosagem comum para concretos convencionais. Na literatura, um traço similar foi utilizado por Pinkoski (2019), que obteve profundidades de penetração de sulfatos de cerca de 20 mm em um período de estudo similar ao da presente pesquisa, corroborando a escolha do traço para os objetivos da pesquisa e com tempo de estudo disponível.

A partir do Traço A, definiu-se um segundo traço (Traço B) com a relação água/cimento de 0,45, mantendo o consumo de cimento de 350 kg/m³. As proporções do Traço B foram definidas através da adição de agregados de forma a compensar o menor volume de água adicionado. Na Tabela 9 os traços utilizados para a moldagem dos concretos utilizados no presente estudo são apresentados em detalhes.

O consumo de cimento é um dado importante em pesquisas relacionadas ao ataque por sulfatos, uma vez que o cimento é a principal fonte de aluminatos que irão participar das reações de formação de subprodutos expansivos. Por esta razão o consumo de cimento foi igual para os dois traços, de forma que as variações no desenvolvimento do ataque por sulfatos possam ser estudadas apenas como função das diferenças microestruturais.

A partir dos traços definidos, os materiais foram misturados em uma betoneira estacionária até formar uma massa homogênea, conforme estabelecido na ABNT NBR 5738 (2015). Após a mistura, realizou-se a moldagem dos corpos de prova em formas previamente imprimadas com uma camada de desmoldante. Os corpos de prova prismáticos foram moldados em formas individuais de madeira, mantidas em posição por parafusos metálicos. As amostras cilíndricas foram moldadas em formas metálicas convencionais.

Tabela 9 – Detalhe dos traços empregados nas dosagens.

Traço A				
	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço Unitário	1	2,20	2,90	0,60
Consumo de materiais(kg/m³)	350	770	1015	210
Traço B				
	Cimento	Areia	Brita	Água
Traço Unitário	1	2,34	3,10	0,45
Consumo de materiais (kg/m³)	350	819	1085	157,5

Fonte: O autor.

Os corpos de prova cilíndricos foram adensados manualmente, conforme indicações da ABNT NBR 5738 (2015). Porém, os corpos de prova cúbicos foram vibrados em uma mesa vibratória por 20 segundos, de forma a garantir o espalhamento e adensamento do concreto nas regiões das arestas das formas. Após o preenchimento das formas, um filme plástico foi posicionado sobre a superfície das amostras, de forma a evitar a evaporação da água de amassamento.

Durantes os procedimentos de moldagem, o concreto no estado fresco foi caracterizado quanto a sua consistência pelo método do abatimento do tronco de cone “*Slump test*”, conforme a ABNT NM 67 (1998). Além disso, realizaram-se testes para definir sua massa específica e o teor de ar aprisionado. A temperatura da mistura foi monitorada imediatamente após a realização do teste de consistência. Na Tabela 10 são apresentados em detalhe as propriedades dos traços no estado fresco.

Tabela 10 – Propriedades do concreto no estado fresco.

Medida	Traço A	Traço B
Slump (mm)	12 ± 2	6 ± 2
Temp. Ambiente(*)	18 °C	22 °C
Massa Específica	2.346 kg/m³	2.375 kg/m³
Ar Aprisionado	1,74%	1,18%

Nota: (*) Temperatura ambiente no momento da dosagem.

Fonte: O autor.

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 h da moldagem, sendo então mantidos em cura submersa em água saturada com cal até a idade de 28 dias. Ao fim do período de cura, os corpos de prova foram protegidos com um impermeabilizante a base de cristalização, de forma que apenas uma face tivesse contato direto com o agente agressivo, garantindo que a penetração dos sulfatos seja unidirecional, conforme também aplicado nos estudos de Zhou *et al.* (2015), Ikumi *et al.* (2016) e Min *et al.* (2019). Na Figura 17 são mostrados os corpos de prova após a aplicação da camada de impermeabilizante.

Ainda na idade de 28 dias, foram realizados os ensaios de caracterização. As amostras restantes foram colocadas nos tanques contendo a solução de sulfato de sódio.

Figura 17 - Aspecto dos corpos de prova após a impermeabilização.



Nota: Nas imagens, a face não impermeabilizada é a face inferior, não visível.

Fonte: O autor.

3.6 SOLUÇÃO DE SULFATO DE SÓDIO

A solução de sulfato de sódio foi escolhida como agente degradante das amostras de concreto, por ser o tipo de sulfato mais comum no ambiente (IKUMI, 2018, PINTO *et al.*, 2020) e o mais estudado em pesquisas no Brasil e no mundo, em termos de durabilidade do concreto.

A concentração de sulfatos na solução foi estudada no nível de 10% de Na_2SO_4 . O preparo das soluções seguiu o procedimento na NBR 13583 (ABNT, 2014), sendo ele:

- a. Adição de 800 g de água destilada em um becker de vidro;
- b. Adição da quantidade de reagente desejada;
- c. Adição de água destilada até atingir 1 l de solução;
- d. Agitação com espátula até dissolução completa.

As soluções foram preparadas em relação à concentração de Na_2SO_4 adicionada, por ser um dado de entrada no modelo de previsão de vida útil abordado na presente pesquisa (ZHOU *et al.*, 2015). Todavia, na literatura é comum se encontrar a especificação das soluções em relação à concentração apenas de SO_4^{2-} . Para o sulfato de sódio, que possui massa molar de 142,04 g/mol, o ânion SO_4^{2-} possui uma massa molar de 96,06 g/mol, ou seja, 67,63% do peso da molécula.

Após o preparo, as soluções de sulfato foram adicionadas em tanques de polipropileno, com dimensões internas de 92 x 55 x 58 cm (largura x comprimento x altura). Os tanques permaneceram fechados com tampa durante todo o período do estudo, de forma a evitar a evaporação da solução e entrada de contaminantes indesejados.

3.7 CICLAGEM E ACONDICIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Ao fim do período de cura, os corpos de prova (prismáticos e cilíndricos) foram submetidos a um processo de ciclos de molhagem e secagem, de forma a acelerar o processo de deterioração do ataque externo por sulfatos, conforme também aplicado

na literatura referente a este tema (ZHOU *et al.*, 2015; CHEN *et al.*, 2016, ZHOU *et al.*, 2016; YU *et al.*, 2018). As etapas da ciclagem estão apresentadas em detalhe na Tabela 11.

Durante o período de molhagem, as amostras eram acondicionadas no interior de tanques contendo a solução de sulfato de sódio (10% Na₂SO₄). De forma a controlar a disponibilidade de íons sulfato em relação ao concreto, a relação solução/concreto foi fixada em 1,8 (em volume) em todos os momentos da pesquisa. Praticamente, isso significa que sempre que corpos de prova eram retirados ou adicionados ao tanque, o volume da solução era corrigido na devida proporção.

Tabela 11 – Descrição do processo de ciclagem.

Etapa	Duração	Especificação:
Molhagem	2 dias	Imersão em solução de Na ₂ SO ₄ , em temperatura de (40 ± 2) °C
		Referência – Imersão em água, em temperatura de (40 ± 2) °C
Secagem	5 dias	Secagem em temperatura ambiente

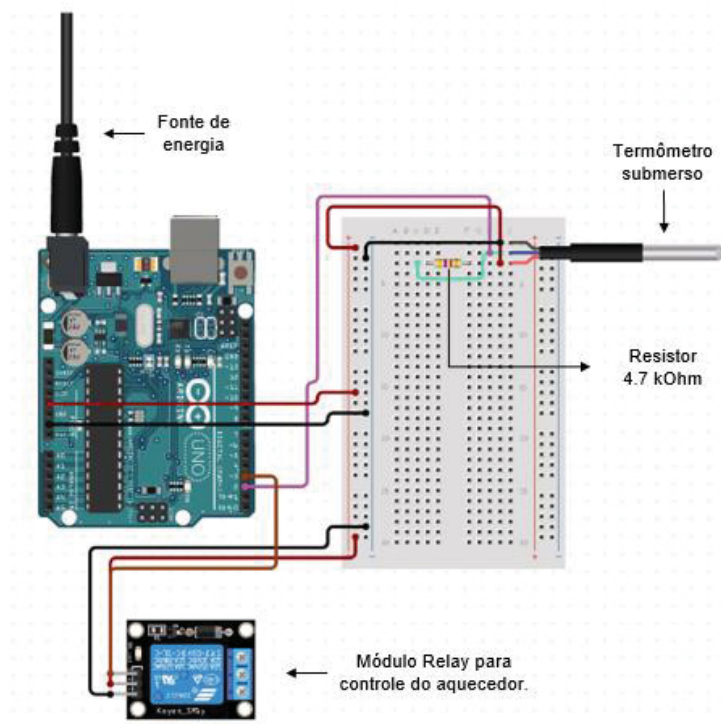
Fonte: O autor.

Os períodos de molhagem foram executados com a solução de sulfato de sódio mantida em 40 °C. Esta temperatura é definida pela NBR 13583 (ABNT, 2014) para acelerar o ataque por sulfatos de sódio. O uso de temperaturas elevadas permite uma maior adsorção de íons SO₄²⁻ que, consequentemente, aceleram o processo de cristalização e o tamanho dos cristais formados, sendo um importante fator na taxa de degradação (MANGAT; EL-KHATIB, 1992; SANTHANAM; COHEN; OLEK, 2002; SOUZA, 2006).

Para controlar a temperatura da solução em (40 ± 2) °C ao longo dos ciclos de molhagem, montou-se um sistema em arduíno capaz de controlar a ativação e desligamento de um aquecedor elétrico. O sistema construído, apresentado na Figura 18, é composto por um sensor de temperatura DS18B20 que faz leituras de temperatura a cada minuto. A leitura é então interpretada pelo Arduino Uno que controla, através de um módulo Relay simples, a ativação e desligamento de um aquecedor elétrico.

O pH da solução foi medido por meio de um pHmetro de bancada. Logo após o preparo da solução, o pH variou entre 8 e 9, porém, após o primeiro ciclo de molhagem (2 dias) o pH foi alterado para valores próximos a 12, se mantendo entre 12,08 e 12,57 durante todo o período da pesquisa.

Figura 18 – Sistema arduino para controle da temperatura da solução de sulfatos.



Fonte: O autor.

Na etapa de secagem, os corpos de prova eram retirados dos tanques e mantidos em ambiente de laboratório, sem exposição direta ao sol e vento, permitindo a secagem lenta dos corpos de prova, em temperatura ambiente.

3.8 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

A seguir serão descritos os ensaios e técnicas utilizadas para a caracterização e monitoramento dos corpos de prova ao longo do período da pesquisa. São apresentados os métodos, equipamentos e normas consideradas. Quando oportuno, são também apresentadas as adaptações realizadas aos procedimentos descritos nas normatizações.

As idades do concreto nas quais foram conduzidos os ensaios, bem como as quantidades de corpos de prova são apresentadas na Tabela 12 .

Tabela 12 – Idades e quantidades de corpos de prova por ensaio.

Ensaio	Quantidade de corpos de prova				
	28 dias	56 dias	84 dias	140 dias	168 dias
	0 ciclos*	4 ciclos	8 ciclos	16 ciclos	20 ciclos
Absorção por imersão	6	6	6	6	6
Resistência à compressão	8	-	-	-	6
Titulação de sulfatos	6	3	3	3	3
R.E.S	6	6	6	6	6

Nota: (*) = Número de ciclos de molhagem e secagem, após a cura de 28 dias.

Fonte: O autor.

3.8.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial dos corpos de prova foi avaliada para caracterizar o material na idade de 28 dias, sendo realizada em 4 corpos de prova por traço. Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, em conformidade com a ABNT NBR 5739 (2018).

Na idade de 168 dias o ensaio de resistência à compressão axial foi também realizado nos corpos de prova cilíndricos que foram submetidos ao ensaio de absorção por imersão. A interpretação e extrapolação dos dados obtidos neste momento deve ser feita com cautela, uma vez que o ensaio de absorção de água pode representar em mudanças na microestrutura do concreto, devido a prévia secagem em estufa. Estes resultados foram utilizados apenas de forma comparativa entre as amostras submetidas à mesma condição de ensaio.

Para o ensaio, os corpos de prova tiveram suas faces inferior e superior retificadas, a fim de se obter uma distribuição uniforme da carga de compressão. Utilizou-se o equipamento FORETEST, com célula de carga de 200 tf, com carregamento automatizado.

3.8.2 Absorção de água por imersão

Os ensaios de absorção por imersão foram conduzidos através do procedimento definidos na NBR 9778 (ABNT, 2009). Inicialmente, os corpos de prova foram secos em estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por 72 h. Em seguida, as amostras foram imersas em água por um período de 72 h. A absorção é definida pelo ganho de massa, em porcentagem, da situação saturada em relação à condição seca.

O ataque por sulfatos causa alterações físicas e químicas na microestrutura do concreto, onde inicialmente os poros são refinados pela formação de subprodutos expansivos que, nos estágios mais avançados, criam esforços internos que levam a fissuração do concreto, aumentando a porosidade (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dessa forma, a avaliação da absorção por imersão das amostras permitirá o monitoramento indireto das alterações da microestrutura do material, servindo como apoio para a interpretação de outros resultados e nas conclusões.

3.8.3 Titulação gravimétrica de sulfatos

O modelo de Zhou *et al.* (2015), alvo de estudo na presente pesquisa, tem por objetivo prever a profundidade de penetração de íons sulfato no concreto. Portanto, o método empregado para definir a profundidade de penetração é de extrema importância para a precisão do modelo.

Na idade de 28, 56, 84, 140 e 168 dias, o que representa 0, 4, 8, 16 e 20 ciclos de exposição à solução de sulfato de sódio, os corpos de prova foram submetidos a análises de titulação gravimétrica, de forma a quantificar o teor de íons sulfato no interior do concreto, permitindo a definição de um perfil em função da profundidade. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada idade, sendo que para cada corpo de prova foram determinados 3 perfis de sulfato. Portanto, o resultado final representa uma média de 9 perfis de sulfato para cada condição avaliada.

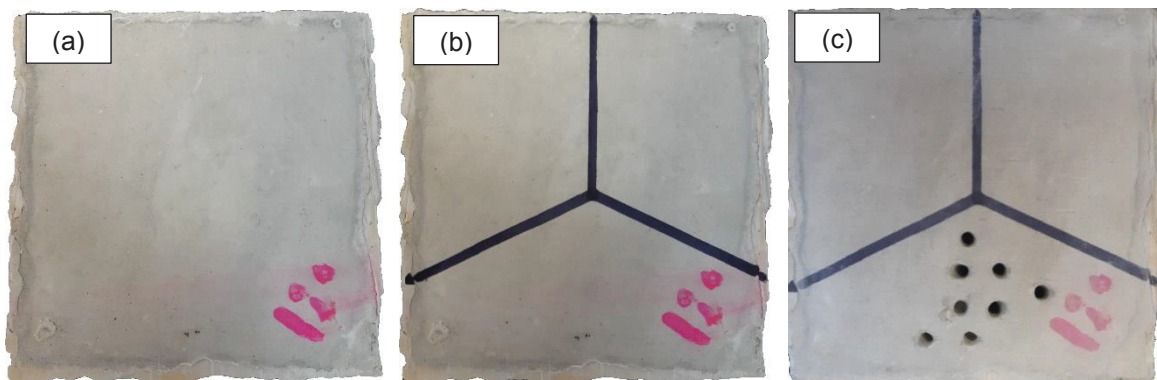
Para a determinação dos perfis, a concentração de sulfatos foi calculada para cinco camadas de 5 mm de espessura, representando os 25 mm superficiais do concreto. O procedimento do ensaio é definido pela ASTM C114-18, e pode ser dividido em três etapas:

a) Coleta da amostra:

- a. A superfície dos corpos de prova era dividida em 3 áreas aproximadamente iguais, onde seriam realizados ensaios distintos;
- b. Com o auxílio de uma furadeira, 6 a 8 furos foram realizados até atingir 5 mm de profundidade.
- c. O pó proveniente destes furos foi coletado e armazenado em um cadinho de porcelana;
- d. O pó coletado foi então passado pela peneira #100 (abertura de 150 μm); a amostra do ensaio consistiu em 1 g do material passante na peneira.
- e. Repetiu-se as etapas *b* a *d* para as profundidades seguintes (10, 15, 20 e 25 mm), de forma que se obtiveram amostras para cada camada de 5 mm.

A Figura 19(a) apresenta a superfície de um corpo prismático utilizado para o ensaio de titulação, na Figura 19(b) é demonstrada a divisão da superfície em três áreas, e na Figura 19(c) são visíveis os furos realizados para a coleta do pó.

Figura 19 – Coleta da amostra de titulação: (a) corpo de prova original, (b) áreas delimitadas e (c) furos para coleta das amostras.



Fonte: O autor.

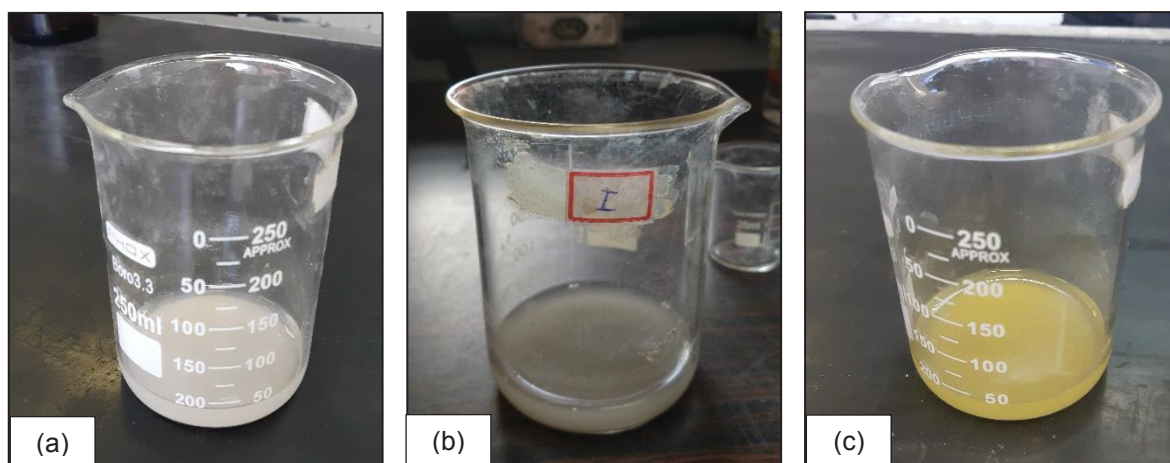
Com as amostras coletadas, pode-se dar continuidade ao ensaio, conforme a ASTM C114-18:

b) Preparo da amostra:

- a. Em béqueres de 250 ml, adicionou-se 25 ml de água destilada às amostras de pó;
- b. Agitando a solução, adicionou-se 5 ml de ácido clorídrico;
- c. Foi adicionada água destilada até completar 50 ml;
- d. A solução foi aquecida por 15 minutos na temperatura de fervura;
- e. A solução foi filtrada em papel filtro quantitativo faixa branca;
- f. Finalmente, a solução foi diluída até 250 ml e aquecida até a fervura;

Na Figura 20 são mostradas as etapas do preparo da amostra. Na Figura 20(a) é mostrada a solução da amostra de pó com 25ml de água destilada. Na Figura 20(b), após a adição do ácido clorídrico, a solução assume uma cor escura, levemente verde. Após os 15 min de aquecimento (Figura 20(c)), a solução assume uma coloração amarela.

Figura 20 – Preparo da amostra para o ensaio de titulação: (a) adição de água destilada, (b) adição de ácido clorídrico e (c) após a fervura.



Fonte: O autor.

A etapa final do ensaio consiste na quantificação dos sulfatos presentes na solução, que é feita através do seguinte procedimento (ASTM C114-18):

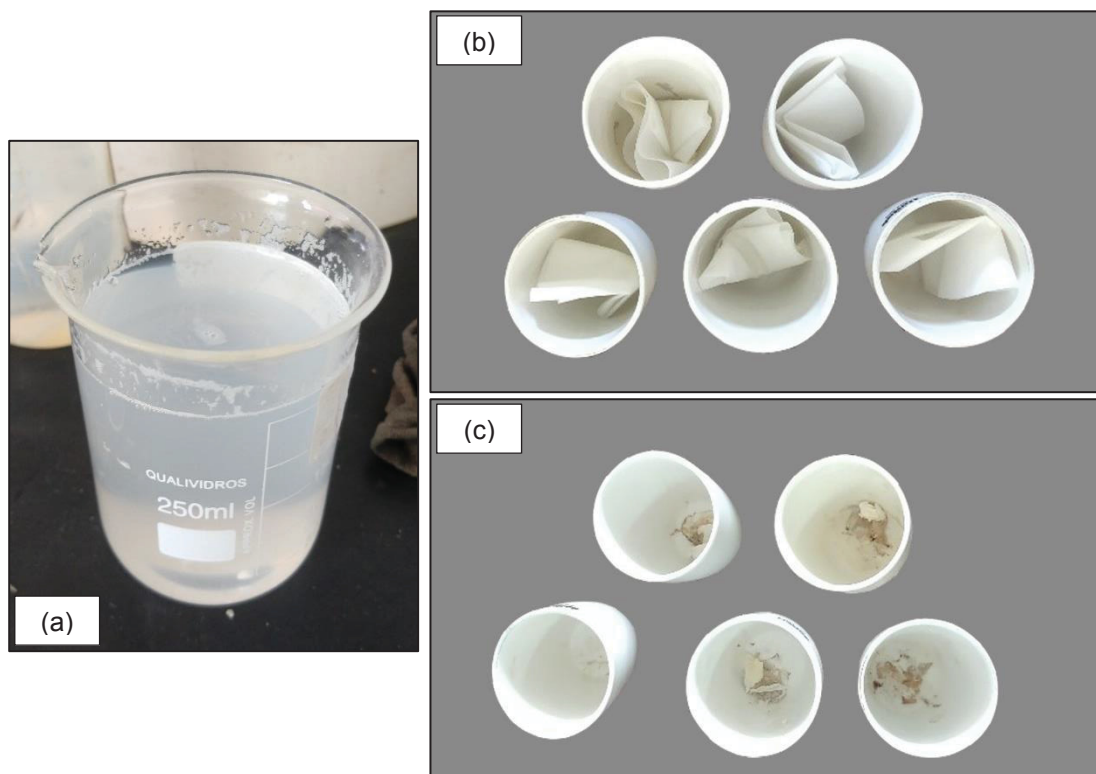
c) Precipitação dos sulfatos:

- a. Com a solução em ponto de fervura, adicionou-se lentamente 10 ml de uma solução de 10% cloreto de bário (BaCl_2);
- b. Manteve-se a solução em ponto de fervura por 2 horas. Durante este período, o volume da solução foi controlado entre 225 e 260 ml, adicionando água destilada sempre que necessário;
- c. Filtrou-se a solução em papel quantitativo faixa azul;
- d. O papel filtro foi reservado em um cadinho de porcelana;
- e. Queimou-se o papel em temperatura entre 800 e 900 °C;
- f. Após aguardar o resfriamento, pesou-se o material restante no cadinho.

A ASTM C114 indica a execução a digestão da solução (etapa b. nos itens acima) por um período de 12 a 24h. O período de digestão foi reduzido para 2 horas de forma a permitir a execução do ensaio em um único dia, uma vez que o ensaio completo pode se estender por aproximadamente 8 horas. A redução deste período de digestão é discutida também por Bishara (1991), que recomenda períodos menores de digestão quando a finalidade de ensaio não é a de verificação de requisitos de cimentos.

Na Figura 21 são apresentadas as etapas da quantificação dos sulfatos presentes na solução. Na Figura 21(a) é mostrada a solução após a adição da solução de cloreto de bário. Neste momento, o cloreto de bário é dissolvido e reage com os íons sulfato presentes na solução, formando sulfato de bário, que irá precipitar e se acumular no fundo do becker. Nesta etapa a solução assumirá uma coloração branca, como pode ser visto na mesma figura.

Figura 21 – Precipitação dos sulfatos: (a) adição de cloreto de bário, (b) papel filtro antes da queima e (c) papel filtro após a queima.



Fonte: O autor.

Após a filtragem, o papel filtro foi cuidadosamente dobrado e posicionado em um cadinho de porcelana, como mostrado na Figura 21(b). Após a queima em mufla, o papel foi consumido, restando apenas o sulfato de bário no fundo do cadinho, na forma de um pó branco (Figura 21(c)).

Sabendo-se a massa de sulfato de bário restante após a queima, a massa de sulfato (ou sulfeto) foi calculada, e, em função da massa da amostra inicial (1 g), a concentração de sulfatos foi determinada. As Equações (37) e (38) apresentam a formula de cálculo da concentração de sulfatos e sulfetos, respectivamente, onde M é a massa de sulfato de bário obtida ao final do ensaio.

$$SO_4^{2-}(\%) = M * 41,16 \quad (37)$$

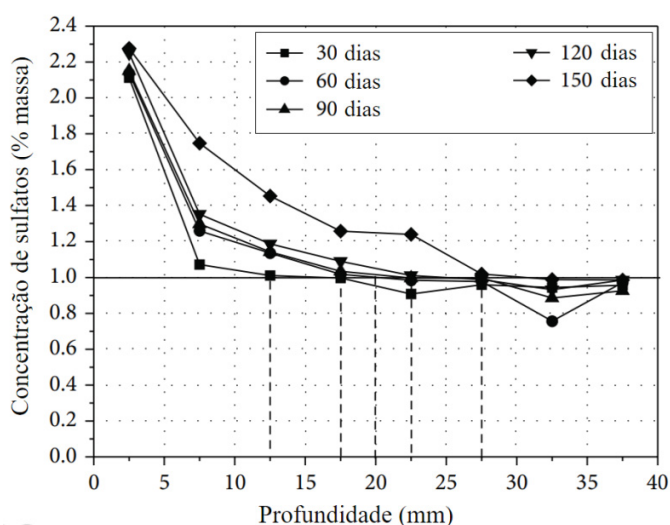
$$SO_3(\%) = M * 34,30 \quad (38)$$

A análise em 5 profundidades permite que seja definida uma relação entre a concentração do íon e a profundidade do corpo de prova, melhor entendendo a difusão dos sulfatos. A Figura 22 apresenta os perfis de concentração de sulfato encontrados por Zhou *et al.* (2015) que cortaram os corpos de prova em fatias de 5 mm de espessura e determinaram a concentração de sulfato por meio de titulação gravimétrica.

Na Figura 22, percebe-se a definição de duas faixas distintas do perfil. Primeiramente, a partir do primeiro ponto, há uma gradual redução na concentração de sulfatos, representando a região onde a difusão está ocorrendo em direção ao centro do concreto. Na região mais interna do concreto, percebe-se se uma concentração constante, representando a região não alcançada pelos íons sulfato provenientes do ambiente externo.

Destaca-se que a concentração de sulfatos percebida na região mais interna não é igual a zero. Isso ocorre pelo fato de o cimento Portland possuir em sua composição uma baixa concentração de sulfetos (no Brasil, limitados a 4,5% pela NBR 16697 (ABNT, 2018)). Por isso, a modelagem do ataque de sulfatos para prever a profundidade de penetração deve considerar esta concentração inicial. Na presente pesquisa, a concentração de sulfatos natural do concreto é adotada como o valor obtido na análise de titulação na idade de 28 dias, imediatamente após a cura e previamente a exposição a solução de sulfato de sódio.

Figura 22 – Representação de um perfil típico de difusão de sulfatos.



Fonte: Traduzido de Zhou *et al.* (2015)

3.8.4 Resistividade elétrica superficial

A resistividade elétrica superficial dos corpos de prova prismáticos foi medida aos 28 dias, como referência, e nas idades de 56, 84, 140 e 168 dias para monitoramento após a exposição à solução de sulfato de sódio (e referência em água). O ensaio foi realizado conforme o método de Wenner, seguindo os procedimentos previstos na norma espanhola UNE 83988-2 (2014).

Utilizou-se o equipamento Resipod, da marca Proceq, específico para a medida da resistividade elétrica superficial de concretos. O aparelho se caracteriza por uma sonda com espaçamento de 50 mm entre os eletrodos, com capacidade de medição de resistividade entre 1 e 1000 k Ω .m. O ensaio foi realizado na face não impermeabilizada dos corpos de prova, com as amostras em condição saturada superfície seca. De forma a permitir a execução do ensaio nos corpos de prova prismáticos (cúbicos de lado 15 cm), foi necessária reduzir a distância entre os eletrodos para 3,5 cm, utilizando um adaptador para os sensores.

O ensaio da resistividade elétrica superficial tem como hipótese a utilização em peças de grandes dimensões (superior a 20 cm, conforme Gowers e Millard (1999)), onde a geometria da amostra não influencia os resultados obtidos. O emprego desta técnica em corpos de prova de pequenas dimensões requer que se aplique um fator de correção nos resultados obtidos.

Os valores dos fatores de correção para os corpos de prova usuais são apresentados na norma UNE 83988-2 (2014). Todavia, a norma citada não define um fator de correção para corpos de prova utilizados na presente pesquisa. Portanto, o fator de correção foi definido através da moldagem de corpos de prova cúbicos de aresta de 25 cm, dimensão que dispensa a aplicação de fator de correção. A relação entre os valores obtidos em cada tipologia de corpo de prova (cúbicos de aresta 15 cm e 25 cm) foi determinada, obtendo um valor de fator de forma igual a 0,67.

3.8.5 Proposta de adaptação ao modelo de Zhou *et al.* (2015)

O objetivo da presente pesquisa é o de contribuir à modelagem do ataque externo por sulfatos, adotando dados de RES como um dos parâmetros de entrada na equação de Zhou *et al.* (2015). O programa experimental descrito previamente tem por objetivo fornecer fundamentação para que tal objetivo seja alcançado.

O modelo de Zhou *et al.* (2015) foi escolhido como objeto de estudo, por se tratar de um modelo de resolução direta que incorpora as complexidades do ataque por sulfatos, tais como a variação das propriedades do concreto ao longo do tempo. A dedução e detalhamento do modelo de Zhou *et al.* (2015) foi apresentada em detalhes no item 2.2.3.

A relação da RES com aspectos da durabilidade e desempenho do concreto são discutidos no item 2.1.3. De forma geral, sabe-se que a RES pode ser relacionada com o coeficiente de difusão do concreto, conforme uma das leis de Einstein, apresentada na Equação (4) e replicada abaixo na Equação (39) para facilidade da leitura.

$$D_{ef} = \frac{A}{\rho_{ef}} \quad (39)$$

Por esta razão, a adaptação proposta ao modelo de Zhou *et al.* (2015) é a substituição do coeficiente de difusão pela RES medida no concreto. Tal abordagem tem como benefício a facilidade de determinação da RES que substitui o complexo e longo processo de determinação do coeficiente de difusão.

3.8.6 Aplicação do modelo de Andrade (2004)

O modelo de Andrade (2004) foi desenvolvido com o objetivo de prever os períodos de iniciação e de propagação da corrosão de armaduras iniciada pela carbonatação e pela ação de cloretos. O modelo, apresentado em detalhes no item

2.1.4, se destaca por utilizar a RES como um parâmetro de entrada nas equações, como um indicativo da mobilidade iônica no interior do concreto, evidenciando a capacidade da RES de ser um indicativo do desempenho do concreto frente a ação de agentes agressivos.

Por este motivo, escolheu-se o modelo de Andrade (2004) como objeto de estudo buscando avaliar sua aplicabilidade para o mecanismo de difusão do ataque externo de sulfatos. Para tanto, os parâmetros da modelagem obtidos através dos dados experimentais foram aplicados nas equações do modelo.

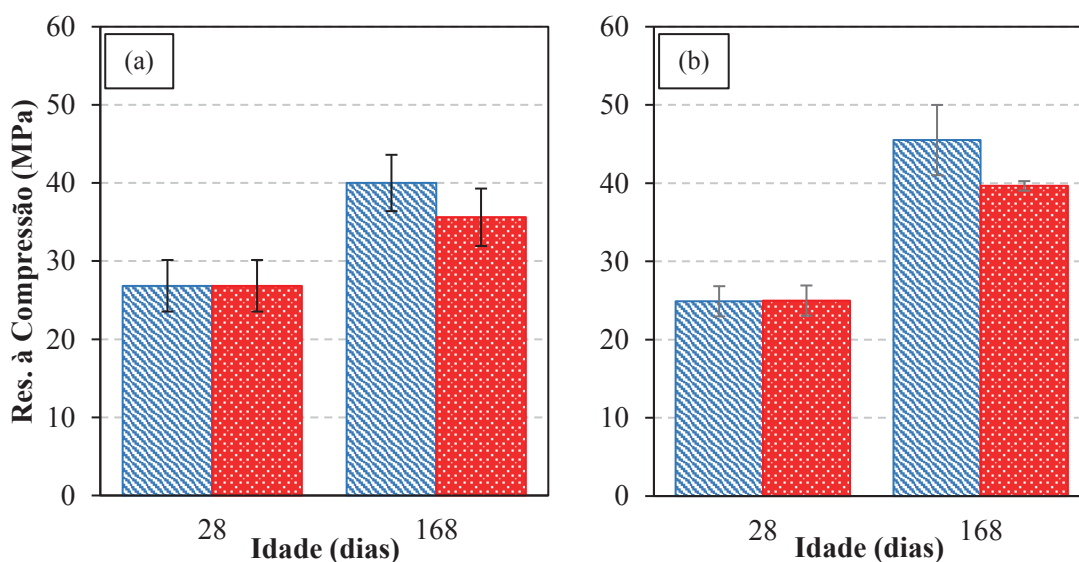
Os resultados teóricos são então comparados aos valores medidos em laboratório, permitindo a tomada de conclusões acerca da validade da extrapolação do modelo de Andrade (2004), inicialmente desenvolvido para processos de carbonatação e de cloretos, para análises da ação de íons sulfato.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Buscando identificar alterações no desempenho mecânico dos concretos moldados, o ensaio de resistência à compressão axial foi executado nas idades de 28 dias, como referência, e aos 168 dias, ao final do período de estudo. Os valores obtidos são apresentados na Figura 23, para os Traços A e B, respectivamente.

Figura 23 - Resistência à compressão axial dos concretos estudados:
(a) Traço A e (b) Traço B.



Fonte: O autor.

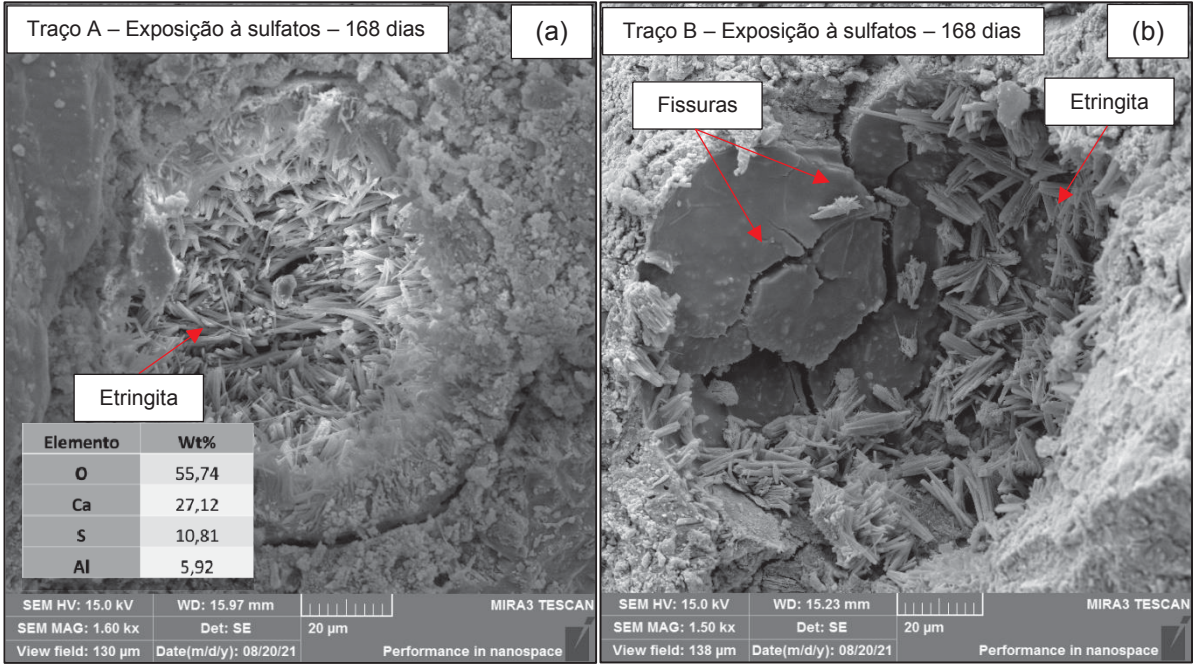
Aos 28 dias, o Traço A apresentou uma resistência média igual a 27 MPa, próximo ao valor esperado de 30 MPa. Por outro lado, o Traço B apresentou uma resistência de 25 MPa, onde se esperava um resultado maior que o obtido para traço A, tendo em vista a menor relação água/cimento empregada. Pode-se supor que a baixa relação água/materiais secos do Traço B, decorrente do consumo de cimento fixo e do incremento do volume de agregados, dificultou a hidratação do cimento, impedindo o ganho de resistência.

No final do período de envelhecimento, aos 168 dias, os valores de resistência à compressão obtidos para a condição de referência foram de 40 e 45,5 MPa, para o traço A e B respectivamente. Um leve ganho de resistência é esperado pela continuidade da hidratação do cimento, fortificando a matriz cimentícia do concreto, todavia, sendo utilizado um cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI), esperava-se que a resistência mecânica do concreto fosse alcançada próximo de sua totalidade já aos 28 dias. Porém, os concretos estudados apresentaram um ganho de resistência de 49% e 82% entre os 28 dias e os 168 dias, respectivamente para os traços A e B. Assume-se que os processos de ciclagem em água a 40 °C causou um processo de cura térmica sobre o concreto, ao qual pode ser atribuído estes grandes ganhos de resistência. Percebe-se que aos 168 dias, o traço B passou a apresentar resistências maiores que o traço A, como era esperado ao início da pesquisa.

Da mesma forma, as amostras dos traços A e B expostas à solução de sulfato de sódio apresentaram resistências à compressão de 36 e 39 MPa, respectivamente. Este efeito pode ser atribuído a densificação do concreto causada pelos processos conjuntos de hidratação do cimento e da formação de subprodutos causada pelo ataque por sulfatos. Na literatura, Cheng *et al.* (2021) relatam um significativo aumento da resistência à compressão durante os primeiros 150 dias de exposição de amostras ao ataque por sulfato de sódio. Na Figura 24(a) está condição é exemplificada, onde é possível observar um poro com uma intensa formação de etringita, causando a densificação do concreto e justificando os ganhos de resistência à compressão.

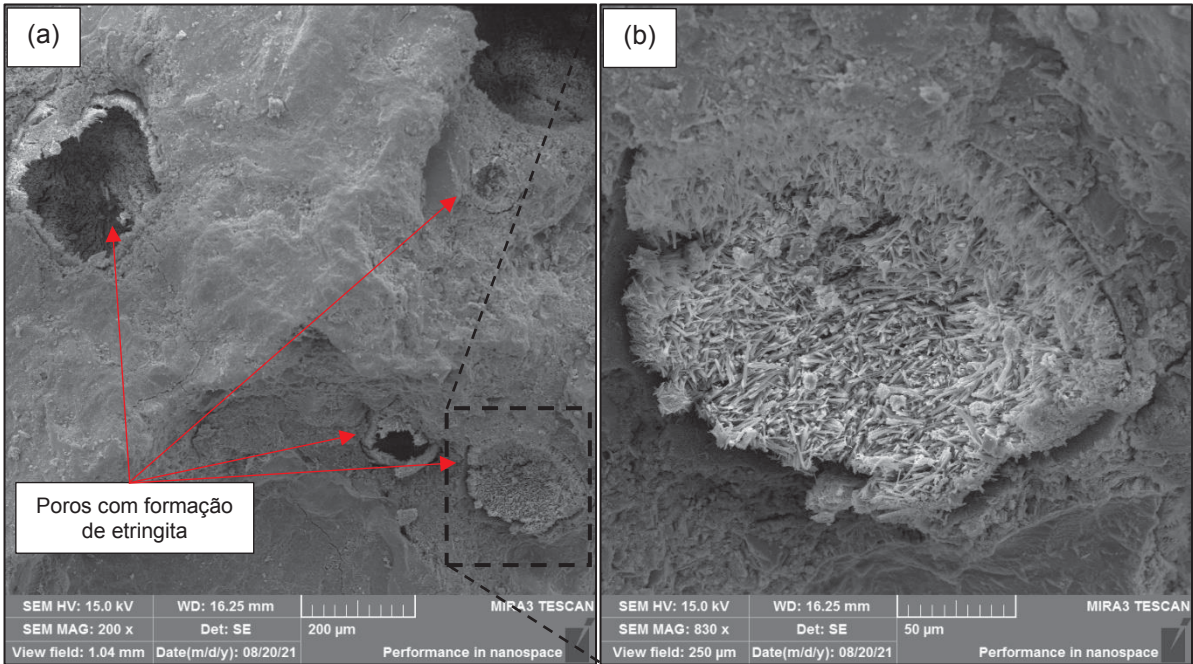
Como apresentado na revisão bibliográfica, sabe-se que o ataque por sulfatos causa alterações na microestrutura do concreto que, a longo prazo, pode comprometer o desempenho mecânico do material. Na campanha experimental conduzida, este efeito pode ser identificado através de uma redução nos valores de resistência à compressão média aos 168 dias. Todavia, a diferença não pôde ser considerada estatisticamente significativa, o que pode indicar que os processos de degradação se encontram uma fase inicial. Na Figura 24(b) é apresentado um poro do concreto do traço B onde se observa a formação de fissuras nas paredes laterais, possivelmente decorrente de esforços internos causados pela formação dos subprodutos. Na Figura 25 pode se observar a formação de depósitos de etringita em uma série de poros do concreto.

Figura 24 – Processos de densificação e degradação do concreto: (a) densificação pelo preenchimento dos poros e (b) fissuras causadas por pressões internas.



Fonte: O autor.

Figura 25 - Microscopia das amostras do Traço A aos 168 dias. Detalhe para a formação de etringita nos poros do concreto.

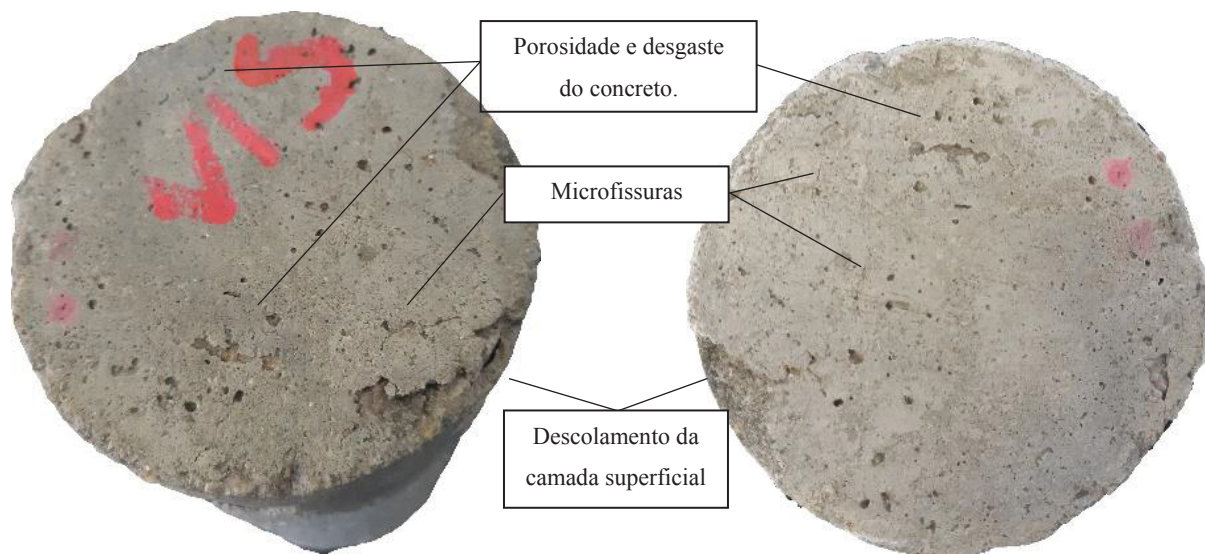


Fonte: O autor.

4.2 ASPECTO VISUAL DOS CORPOS DE PROVA

Apesar da exposição à solução de sulfatos não ter comprometido a resistência mecânica, manifestações visuais do ataque puderam ser observadas nos corpos de prova. O aspecto visual dos corpos de prova submetidos ao ataque por sulfatos é exemplificado pela Figura 26. As superfícies dos corpos de prova expostas à solução de sulfato apresentaram um grande número de poros, desgaste superficial e microfissuras dispersas. Durante o período de secagem, depósitos de sais cristalizados podiam ser observados nas superfícies das amostras. Na Figura 27 é apresentado também um corpo de prova aos 28 dias, ao final da cura, onde é possível observar a diferença da condição da superfície quando comparado ao material aos 168 dias, decorrente do desgaste causado pelas reações do ataque por sulfatos.

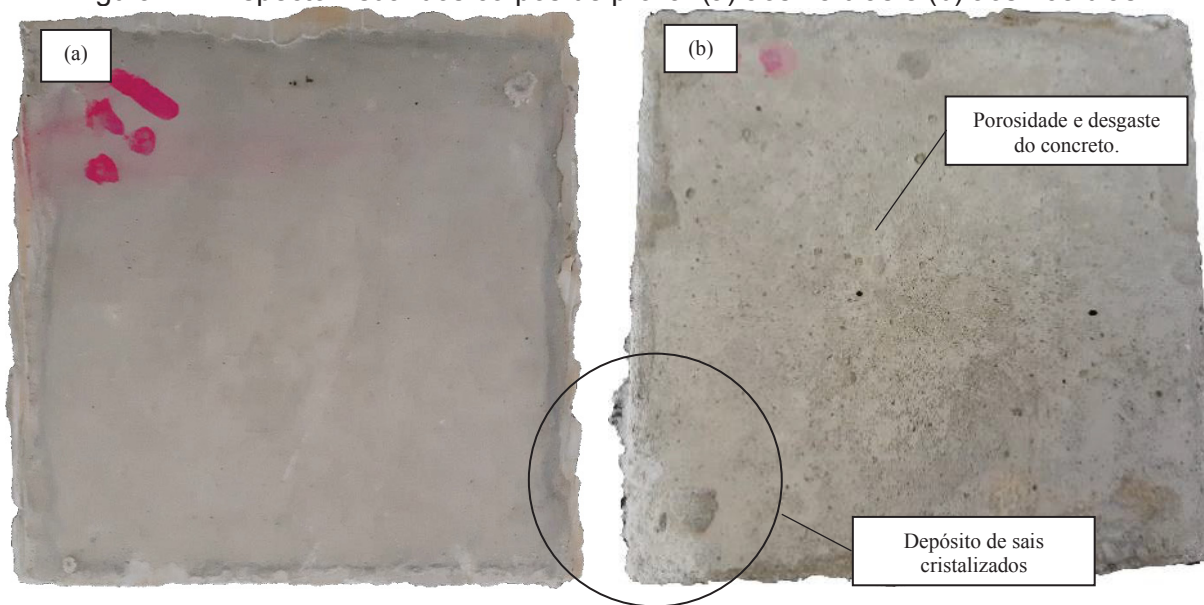
Figura 26 - Aspecto visual dos corpos de prova após o envelhecimento acelerado.



Em relação ao impermeabilizante aplicado nos corpos de prova, na Figura 28 é apresentada a aparência dos corpos de prova ao final do processo de envelhecimento acelerado em solução de sulfato de sódio. Da figura, pode ser observada uma grande incidência de manchas de cores escuras, depósitos de sais cristalizados e um leve desgaste superficial. O descolamento da camada de

impermeabilizante foi observada apenas em um pequeno número de corpos de prova (cerca de 1 a cada 30), e limitado a região da base, onde há a transição com a face não impermeabilizada.

Figura 27 - Aspecto visual dos corpos de prova: (a) aos 28 dias e (b) aos 168 dias.



Fonte: O autor.

Com base nas observações, conclui-se que o produto escolhido para a impermeabilização dos corpos de prova foi satisfatório, sendo capaz de proteger as faces laterais e de fundo dos corpos de prova, de forma que apenas uma das faces tivesse contato com a solução agressiva, permitindo que a difusão de sulfatos seja considerada como unidirecional.

As amostras de referência, submetidas ao processo de ciclagem em água, não apresentaram alterações em sua aparência durante o período de monitoramento. Na Figura 29 um corpo de prova de referência é apresentado, onde pode-se observar a inexistência de manchas, fissuras e depósitos de sais cristalizados.

Figura 28 - Aspecto visual da impermeabilização ao final do programa experimental.



Fonte: O autor.

Figura 29 - Aspecto visual das amostras de referência ao final do programa experimental.

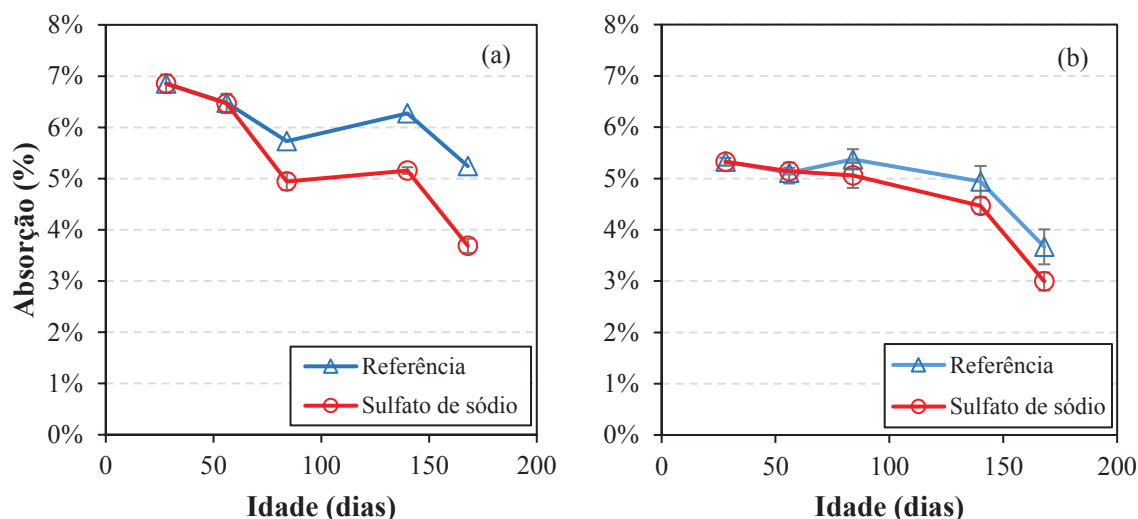


Fonte: O autor.

4.3 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

O ensaio de absorção foi realizado com o objetivo de se obter a capacidade de absorção de água, e consequentemente de solução, dos concretos. Além disso, esse ensaio pode dar um indicativo da porosidade dos concretos estudados. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 30. Os resultados da análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey são apresentados na Tabela 13 e na Tabela 14, respectivamente.

Figura 30 – Absorção por imersão: (a) Traço A e (b) Traço B



Fonte: O autor.

Aos 28 dias, o Traço A apresentou uma absorção por imersão de 6,85%, enquanto para o Traço B a absorção foi igual a 5,33%. Este resultado era esperado e pode ser explicado pela maior relação a/c do Traço A, que propicia uma maior porosidade ao concreto endurecido. Para ambos os traços, percebe-se uma redução da absorção do concreto de referência ao longo do período de estudo. Esta redução pode ser atribuída à hidratação e maturação da matriz cimentícia, que tende a refinar a microestrutura do concreto, reduzindo o tamanho de poros e fechando interconexões entre os mesmos (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para a absorção de água por imersão.

Fonte	F _{calc}	F _{tab}	Conclusão
A	168,95	2,61	Significativa
B	282,77	4,08	Significativa
C	55,51	4,08	Significativa
Interação: A x B	19,20	2,61	Significativa
Interação: A x C	12,80	2,61	Significativa
Interação: B x C	19,94	4,08	Significativa
Interação: A x B x C	3,97	2,61	Significativa

Nota: A = Idade
B = Traço
C = Condição de exposição

Fonte: O autor.

Tabela 14 – Comparação de médias para o ensaio de absorção de água por imersão.

Idades	Traço A		Traço B	
	Referência	Sulfato	Referência	Sulfato
28 dias	A – a	A – a	B – a	B – a
56 dias	A – ab	A – b	B – a	B – a
84 dias	A – cd	B – c	AB – a	B – a
140 dias	A – bc	B – c	B – a	C – b
168 dias	A – d	B – d	B – b	B – c

Nota: Médias seguidas de mesma letra maiúscula, na mesma linha, e médias seguidas de mesma letra minúscula, na mesma coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em nível de 95% de confiança.

Fonte: O autor.

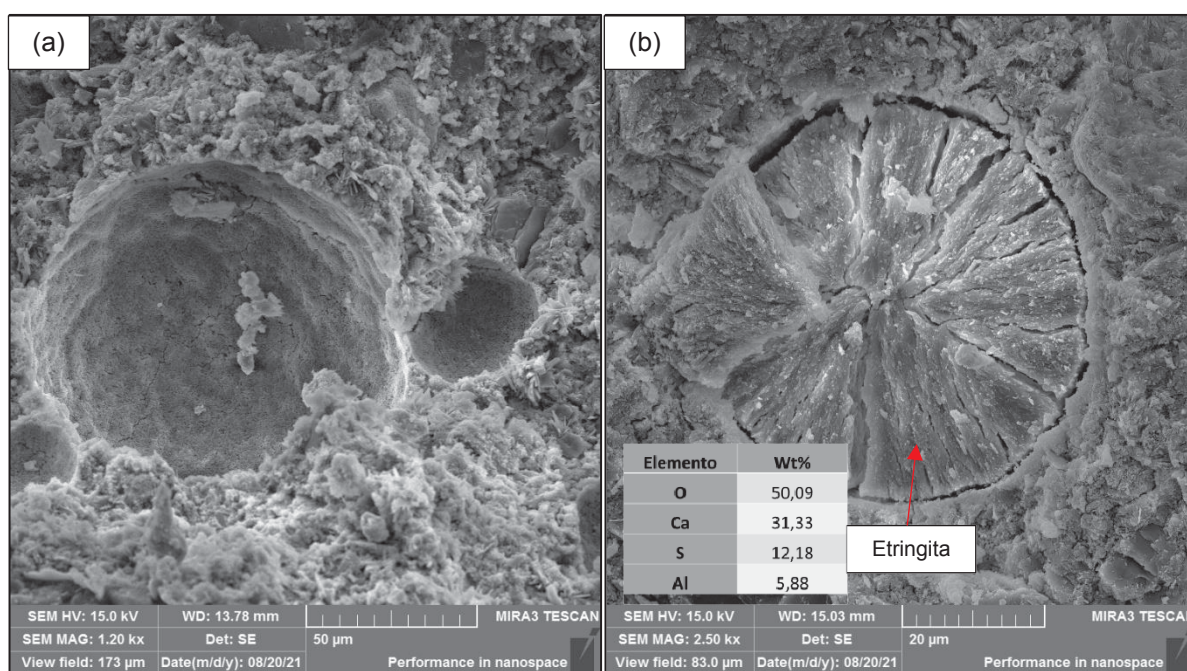
Para o Traço A, o concreto exposto ao ataque por sulfatos apresentou uma redução nos valores de absorção mais pronunciada em relação ao concreto de referência. Este processo pode ser explicado pela formação de subprodutos expansivos causada pelo ataque por sulfatos, que, ao serem formados na rede de poros do concreto, causam um refinamento de sua microestrutura (SKALNY; MARCHAND; ODLER, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Percebe-se que a diferença entre as curvas de referência e a de sulfatos tende a aumentar com o passar do tempo (sendo imperceptível na idade de 56 dias (apenas 0,1%), aumentando para 0,79%, 1,12% e 1,55% nas idades de 84, 140 e 168 dias, respectivamente), conforme mais subprodutos do ataque por sulfatos são formados na rede de poros.

No Traço B, a diferença entre as condições de exposição foi menos pronunciada, porém também é possível observar uma redução mais acentuada da

absorção para os concretos expostos à solução de sulfato de sódio. Enquanto não há diferença significativa para a idade de 56 dias, aos 84 dias a diferença passa para 0,31%, aumentando para 0,47% e 0,67% nas idades de 140 e 168 dias.

Como discutido na revisão bibliográfica, a formação de produtos expansivos é um dos principais mecanismos de degradação do ataque por sulfatos. A partir de reações com as fases da matriz cimentícia hidratada, a formação de gipsita e etringita preenche os vazios da pasta e, após o preenchimento dos poros, começa a gerar esforços internos no concreto. Um exemplo deste processo é apresentado na Figura 31, onde pode-se observar um poro completamente preenchido pela formação de etringita.

Figura 31 – Micrografias do Traço A: (a) poro aos 28 dias, sem a presença de subprodutos, e (b) poro aos 140 dias, preenchido por etringita. O EDS de caracterização do subproduto é apresentado juntamente à micrografia.



Fonte: O autor.

Da análise de variância, apresentada na Tabela 13, conclui-se que todas as fontes de variação foram significativas, corroborando as discussões dos parágrafos anteriores. De forma simplificada, a justificativa do efeito dos fatores pode ser definida como: da idade, pelo avanço das reações de hidratação e do ataque por sulfatos; os

traços, pela formação de diferentes microestruturas, em função das diferentes relações a/c; e a condição de exposição, pela formação de subprodutos do ataque por sulfatos. Além disso, a interação entre as fontes de variação também se mostrou significativas em todos os casos. Pelo teste de Tukey, pôde-se identificar as fontes de variação indicadas pela análise ANOVA, para cada um dos fatores avaliados.

4.4 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

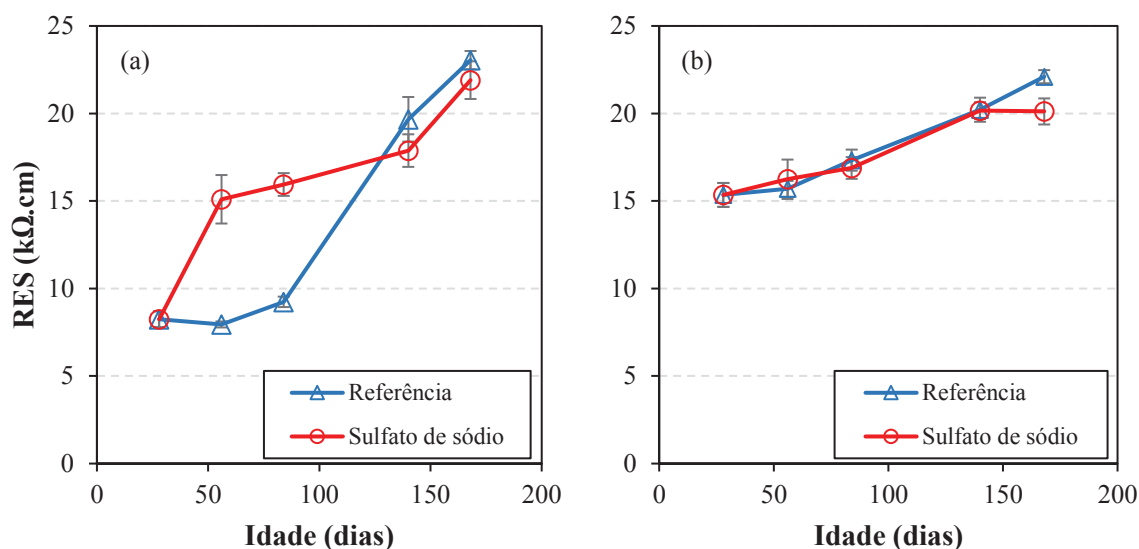
Medidas de Resistividade Elétrica Superficial foram conduzidas durante o período de estudo, buscando entender o efeito do ataque por sulfato nesta propriedade dos concretos. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 32, foram obtidos com as amostras saturadas, logo após o fim do ciclo de molhagem utilizado para o envelhecimento acelerado; cada ponto nos gráficos apresentados representa a média de leituras em três corpos de prova.

Aos 28 dias, o Traço A apresentou uma menor leitura de RES em comparação ao Traço B, de 8,2 k Ω .cm e 15,3 k Ω .cm, respectivamente. Pela maior relação a/c, os concretos do Traço A apresentaram uma maior porosidade, como comprovado pelos ensaios de absorção por imersão, e por isso foram menos resistivos que os concretos do Traço B. Ao longo do período de monitoramento, as leituras de RES apresentaram uma tendência crescente, justificado pela densificação da matriz cimentícia, causada tanto pelo avanço da hidratação quanto pela formação de subprodutos expansivos do ataque por sulfatos.

Para o Traço A, apresentado na Figura 32(b), as leituras de RES da condição de referência apresentaram um salto de 113% entre a leitura de 140 dias e a leitura predecessora, aos 84 dias. De forma similar, a RES das amostras expostas à solução e sulfato mostrou um salto de 84% já no primeiro intervalo de monitoramento, após 4 ciclos de molhagem e secagem.

Em relação as amostras de referência, pode-se supor que entre as idades de 140 e 84 dias a hidratação da matriz cimentícia causou o fechamento de interconexões entre os poros em uma escala suficiente para tornar o concreto tão resistivo quanto as amostras do Traço B, moldado com uma relação a/c inferior.

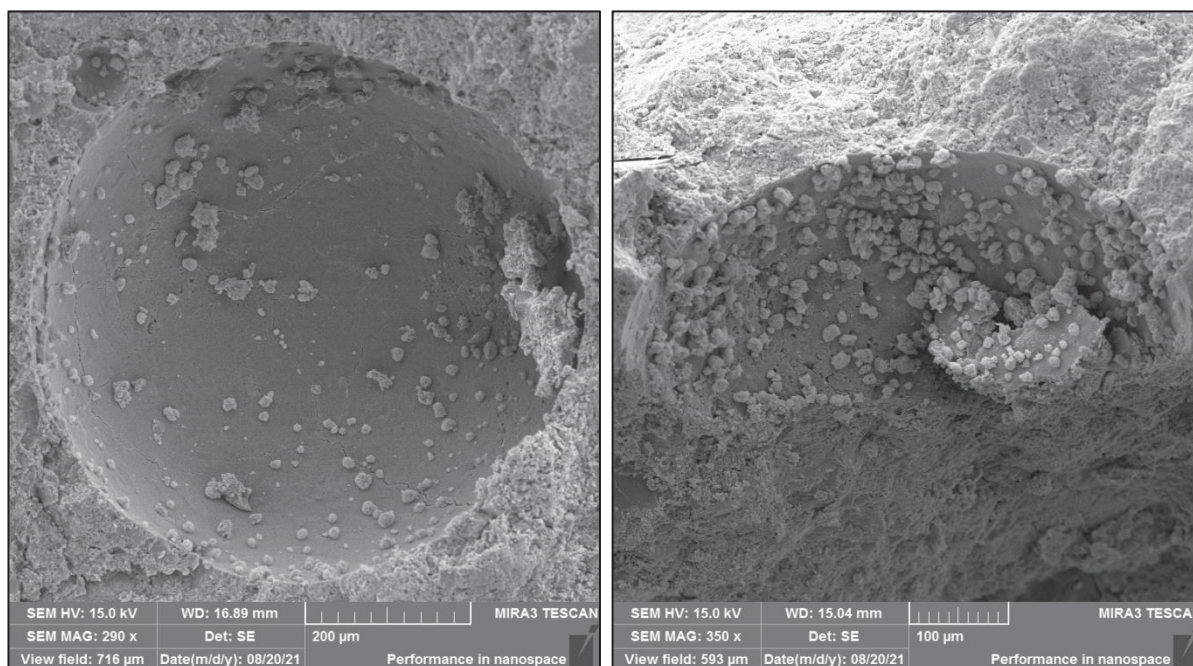
Figura 32 – Resistividade elétrica superficial: (a) Traço A e (b) Traço B.



Fonte: O autor.

Para as amostras expostas à solução agressiva, o salto nos valores de RES na primeira idade de monitoramento indica que a exposição aos íons sulfato tornou o concreto mais resistivo, comportamento este que não era esperado. Nesta idade, supõe-se que o mecanismo do ataque por sulfatos ainda esteja limitado a camada mais superficial do concreto, e ainda em sua fase mais inicial, a matriz cimentícia ainda possui uma ampla reserva de cálcio aluminatos, que prontamente reagem com os íons sulfatos, fixando-os na forma de gipsita e, consequentemente, limitando a presença de íons livres na solução da rede de poros. Uma vez que as leituras de resistividade elétrica estão sendo feitas de forma superficial, pode-se assumir que a formação de gipsita levou a densificação da camada de superfície, aumentando sua resistividade. Com a realização de análises de microscopia eletrônicas de varredura (MEV), foi possível identificar a formação de depósitos de gipsita na rede de poros do concreto, como apresentado na Figura 33, para amostras com 56 dias do Traço A.

Figura 33 - Microscopia de amostra do Traço A, aos 56 dias, apresentando a formação de gipsita nos poros do concreto.



Fonte: O autor.

Para o Traço B, apresentado na Figura 32(b), o comportamento entre as duas condições de monitoramento foi semelhante durante todo o tempo de estudo, indicando que a variação da RES foi controlada exclusivamente pelo processo de hidratação do cimento. Apenas para a idade de 168 dias foi observada uma diferença significativa entre as duas condições de envelhecimento, onde pode-se assumir que a concentração de íons sulfato livres na solução dos poros foi suficiente para causar uma mudança em sua condutividade, alterando as medidas de RES.

Como discutido na revisão bibliográfica (capítulo 2), o efeito que a presença de íons na solução dos poros causa na resistividade elétrica de concretos ainda é um assunto contraditório (SANTOS, 2006; LENCIONI, 2011; GANS, 2017). Enquanto alguns autores observaram uma redução na resistividade, como Saleem *et al.* (1996) e Medeiros-Junior *et al.* (2019), na presente pesquisa não foram encontradas evidências suficientes para concluir a ocorrência de reduções na RES dos concretos testados, apesar dos valores de RES aos 168 dias serem ligeiramente inferiores que as amostras de referência, a continuidade de estudos se faz necessária para a tomada de tal conclusão com maior segurança.

A análise ANOVA e o teste de Tukey utilizados para a análise estatística dos dados de RES são apresentados na Tabela 15 e Tabela 16, respectivamente. Sabe-se que o ensaio de RES é muito sensível à fatores intrínsecos e extrínsecos ao concreto testado. Da análise de variância, encontra-se que todos os fatores avaliados no presente estudo apresentaram uma influência significativa nos valores de RES medidos, da mesma forma que a interação entre os fatores. As fontes de variação são indicadas através da análise de médias, apresentada na Tabela 16.

Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA) para a Resistividade Elétrica Superficial.

Fontes	F _{calc}	F _{tab}	Conclusão
A	384,07	2,61	Significativa
B	325,00	4,08	Significativa
C	34,14	4,08	Significativa
Interação: A x B	87,58	2,61	Significativa
Interação: A x C	42,69	2,61	Significativa
Interação: B x C	55,49	4,08	Significativa
Interação: A x B x C	33,81	2,61	Significativa

Nota: A = Idade
B = Traço
C = Condição de exposição

Fonte: O autor.

Possuindo uma relação direta com a microestrutura do concreto, espera-se que a RES apresente uma boa correlação com a absorção de água por imersão das amostras testadas. Nas Figura 34 são apresentadas as comparações da RES com a absorção por imersão (ajuste linear).

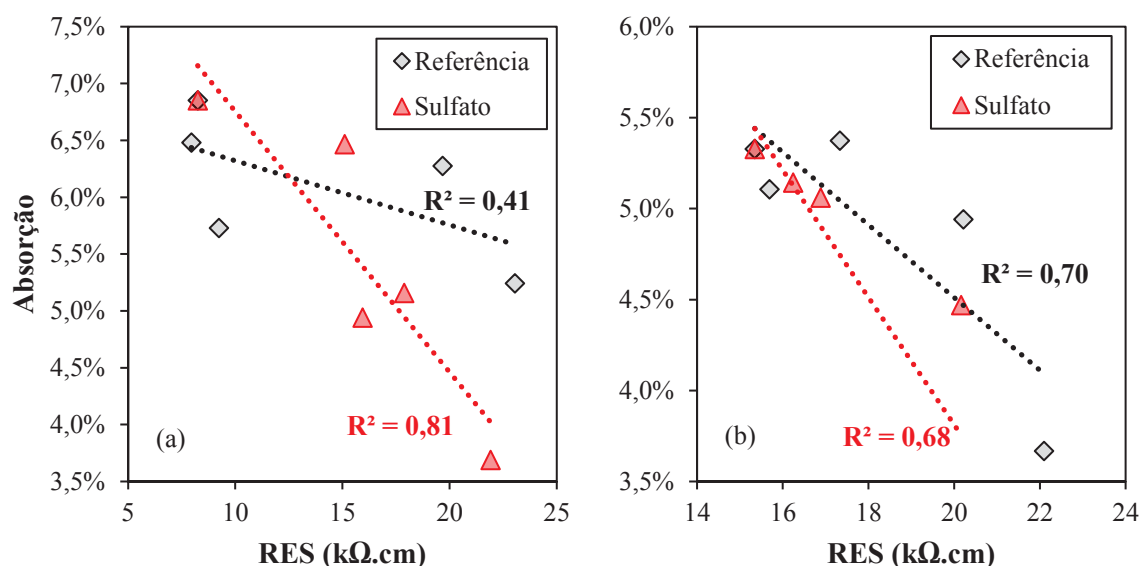
Tabela 16 – Comparação de médias para o ensaio de Resistividade Elétrica Superficial.

Idades	Traço A		Traço B	
	Referência	Sulfato	Referência	Sulfato
28 dias	A – a	A – a	B – a	B – a
56 dias	A – a	B – b	B – a	B – a
84 dias	A – a	B – bc	B – b	B – a
140 dias	A – b	A – c	A – c	A – b
168 dias	A – c	AB – d	A – d	B – b

Nota: Médias seguidas de mesma letra maiúscula, na mesma linha, e médias seguidas de mesma letra minúscula, na mesma coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, em nível de 95% de confiança.

Fonte: O autor.

Figura 34 – Análise da correlação entre a RES e a absorção por imersão: (a) Traço A e (b) Traço B.

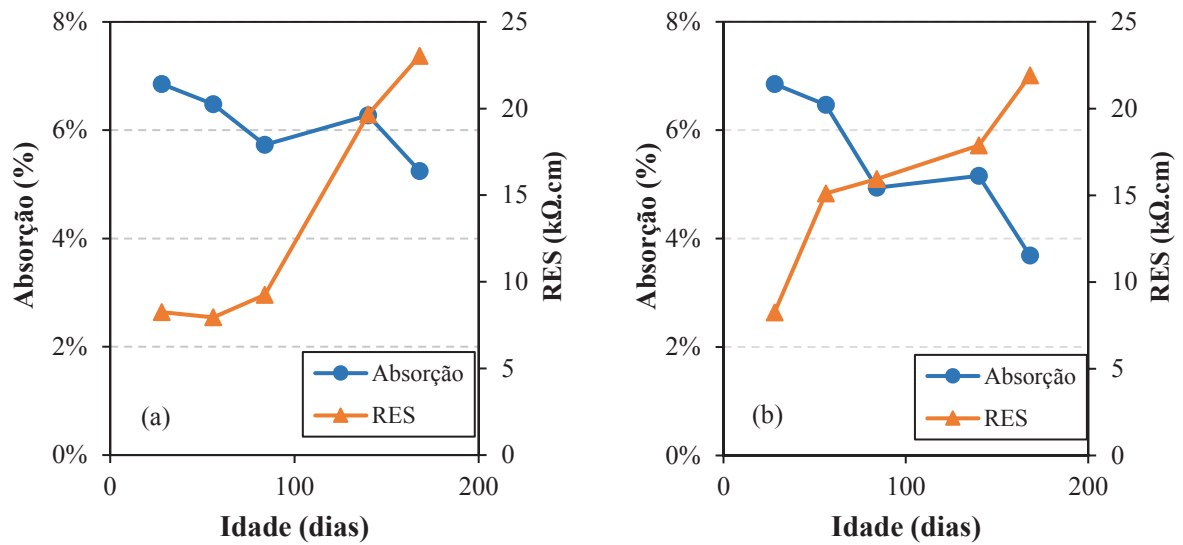


Nota: Destaca-se a diferença entre as escalas dos eixos.

Fonte: O autor.

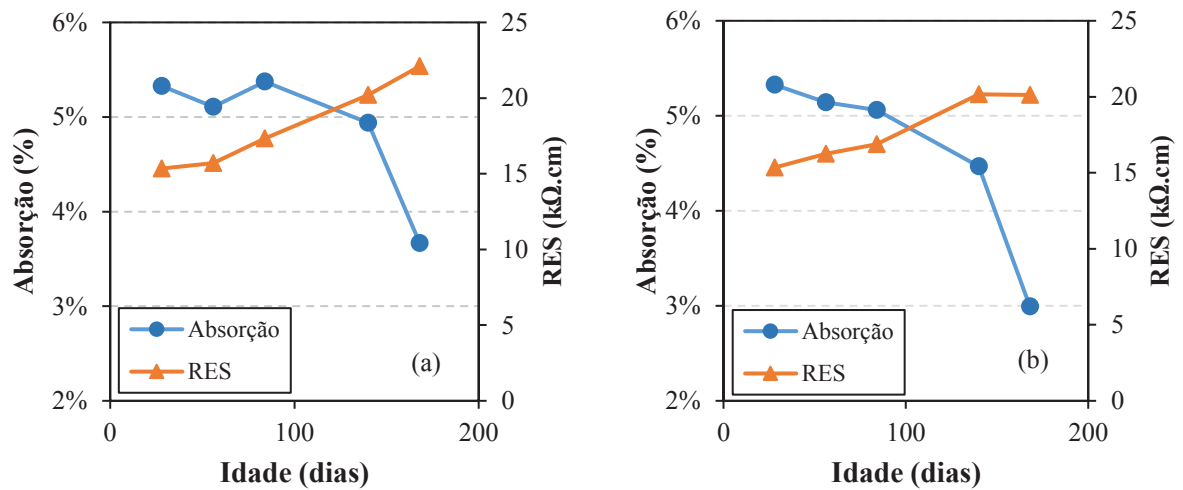
Da Figura 34, observa-se que os maiores valores do coeficiente de determinação foram obtidos para as amostras expostas à solução de sulfato de sódio, com valores de R^2 iguais a 0,81 e 0,68 para o Traço A e B, respectivamente. Estes valores indicam a existência de uma boa correlação entre estas propriedades. Porém, para as condições de referência, os valores de R^2 foram significativamente inferiores, iguais a 0,41 e 0,70, respectivamente para o Traço A e o Traço B. Isto indica que para a condição de referência a variação da RES não pode ser atribuída somente às mesmas modificações microestruturais que controlaram a variação da absorção, mas sim a uma sinergia entre vários processos. A relação inversa entre a RES e a absorção de água por imersão fica evidenciada na Figura 35 e na Figura 36, que apresentam a variação das propriedades ao longo do tempo.

Figura 35 - Relação entre a RES e a absorção por imersão para o Traço A: condições de (a) referência e (b) exposição a solução de sulfato de sódio.



Fonte: O autor.

Figura 36 - Relação entre a RES e a absorção por imersão para o Traço B: condições de (a) referência e (b) exposição a solução de sulfato de sódio.



Fonte: O autor.

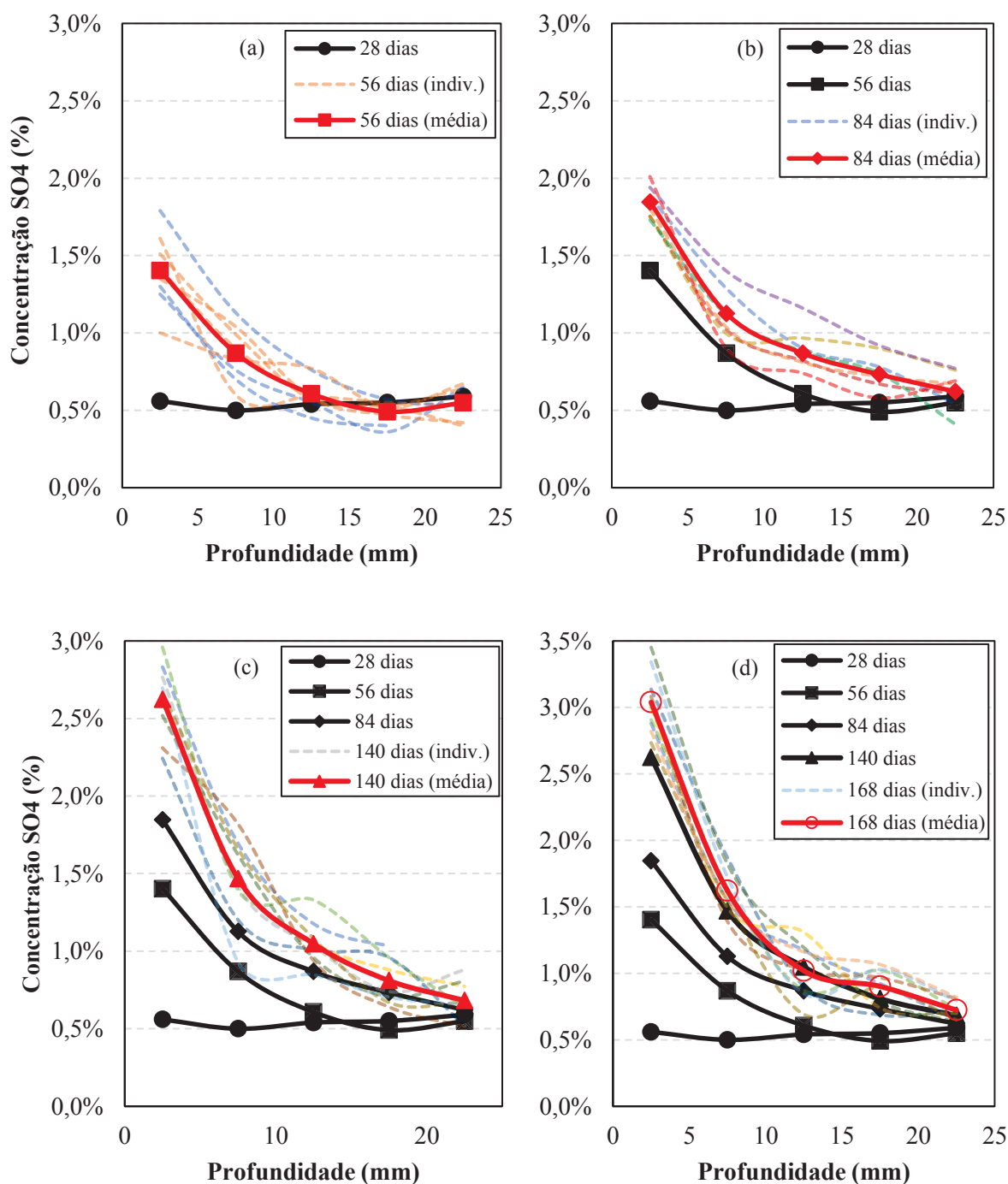
4.5 TITULAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE SULFATOS

De forma a entender o avanço do ataque por sulfatos, ensaios de titulação gravimétrica foram conduzidos nas amostras submetidas à ciclagem na solução agressiva. Os perfis obtidos para as amostras do Traço A e B são apresentados na Figura 37 e Figura 38, respectivamente. Nas figuras, o quadro (a) apresenta a leitura realizada aos 56 dias, 28 dias após as amostras serem submetidas ao ataque por sulfatos, bem como o perfil obtido para a idade de referência, aos 28 dias. Para os quadros seguintes, (b), (c) e (d), as idades seguintes são adicionadas aos gráficos, permitindo uma comparação entre cada ponto de monitoramento.

Para cada uma das datas, o perfil de sulfatos foi definido como a média de nove ensaios individuais, com exceção à idade de referência (28 dias), cujas curvas são resultado da média de 4 ensaios individuais. Na Figura 37 e na Figura 38, os ensaios individuais são apresentados pelas linhas com traçados pontilhados, enquanto a médias das curvas individuais é destacada pela linha na cor vermelha. Esta apresentação permite uma melhor visualização da variabilidade do ensaio, que pode se mostrar significativa caso o número de ensaios seja pequeno, uma vez que a amostra de ensaio de 1 g pode apresentar dificuldade em representar a totalidade de uma peça de concreto, dada a grande heterogeneidade do material.

Na idade de 28 dias, definiram-se perfis de sulfatos para os dois traços avaliados. Os perfis apresentaram um comportamento homogêneo na profundidade avaliada, cuja concentração média foi definida como 0,548% para o Traço A, e 0,428% para o Traço B, em relação à massa de concreto. Estas concentrações são inferiores aos valores comumente encontrados na literatura, que variam entre 0,76% e 1,18%, o que pode ser justificado pelo baixo consumo de cimento nos concretos moldados, uma vez que os traços citados na literatura possuem consumos de cimento variando entre 400 e 500 kg/m³ (ZHOU *et al.*, 2015; HUANG *et al.*, 2016; MIN *et al.*, 2019). A presença de sulfatos no concreto antes do contato com a solução agressiva deriva do teor de sulfatos presentes no cimento utilizado, cuja presença e concentração é apresentada na Tabela 4, de caracterização química de cimento.

Figura 37 – Concentração de sulfatos no Traço A: (a) 56 dias, (b) 84 dias, (c) 140 dias e (d) 168 dias.

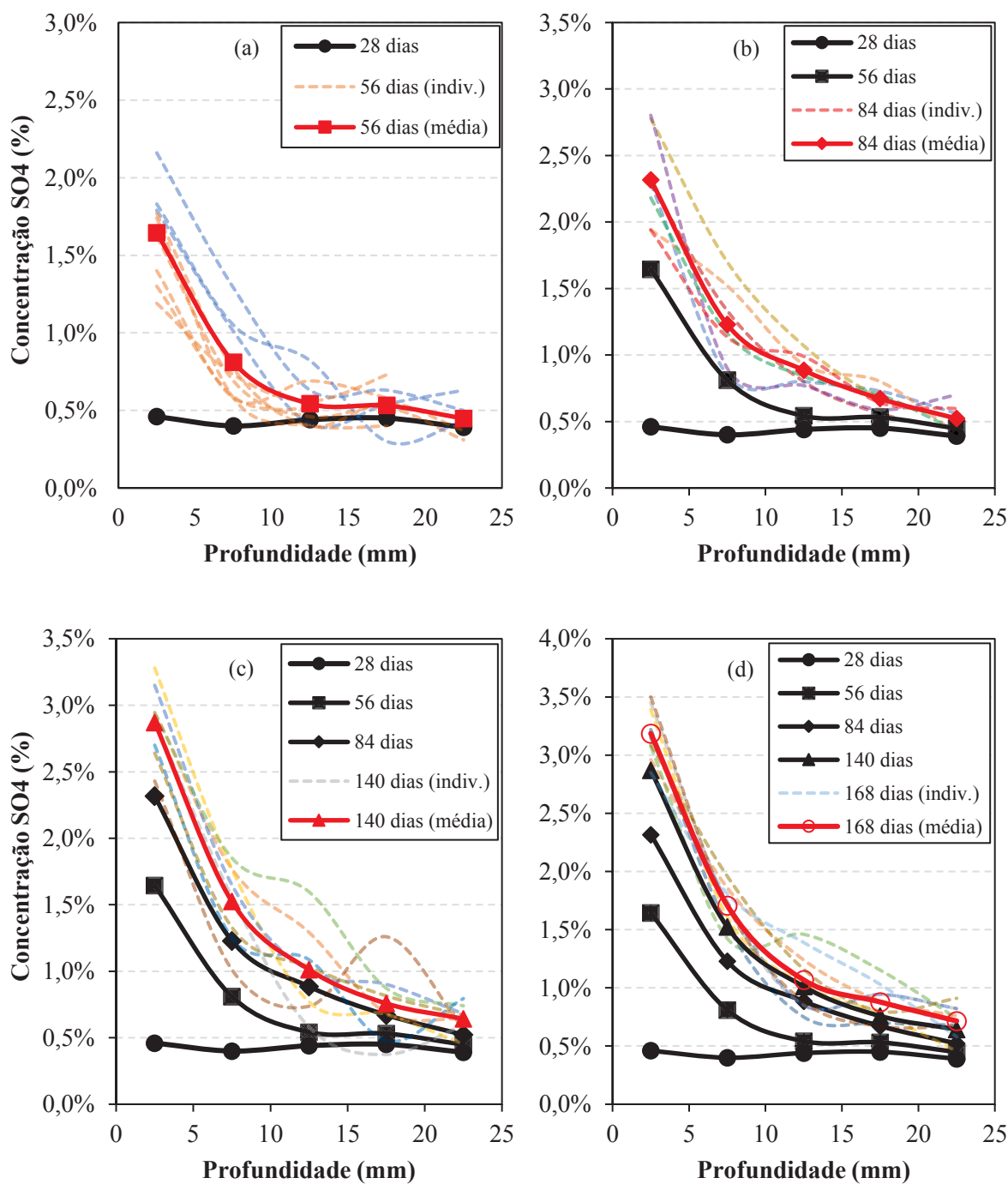


Fonte: O autor.

O teor de sulfatos no concreto aumentou gradualmente com as idades de exposição aos ciclos de molhagem e secagem em solução de sulfato de sódio. Nas camadas superficiais, o aumento da concentração é mais significativo, uma vez que é

mais facilmente alcançado pela solução agressiva que se difunde pela rede de poros. Uma menor variação é observada para as camadas mais profundas, permanecendo muito próxima da concentração natural do concreto, obtida aos 28 dias.

Figura 38 – Concentração de sulfatos no Traço B: (a) 56 dias, (b) 84 dias, (c) 140 dias e (d) 168 dias.



Fonte: O autor.

Nos gráficos da Figura 37 e Figura 38, pode-se adicionar a variação de tempo como uma terceira dimensão, obtendo as superfícies apresentadas na Figura 39 e Figura 40.

Figura 39 – Variação da concentração de sulfatos no Traço A.

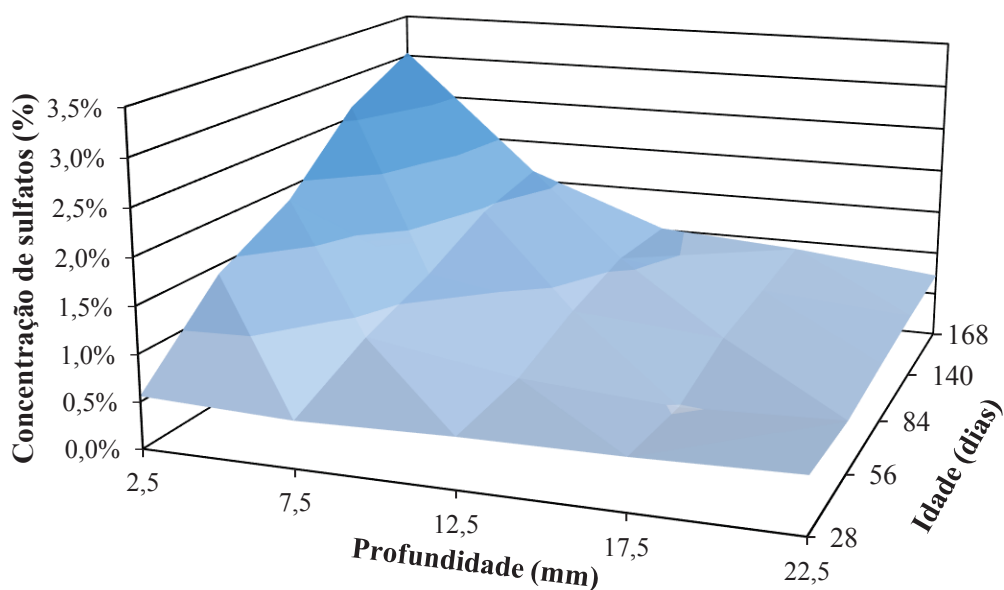
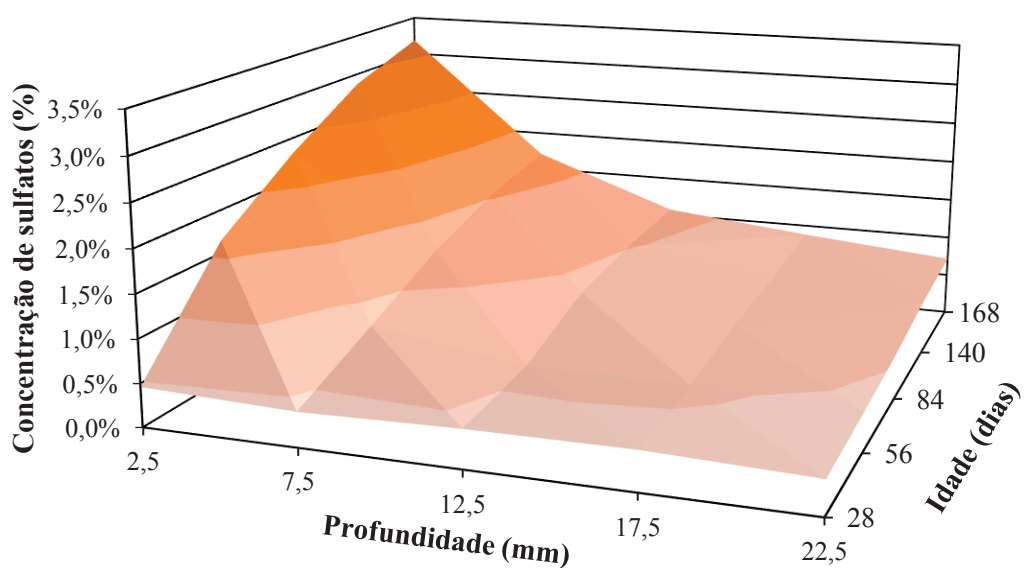
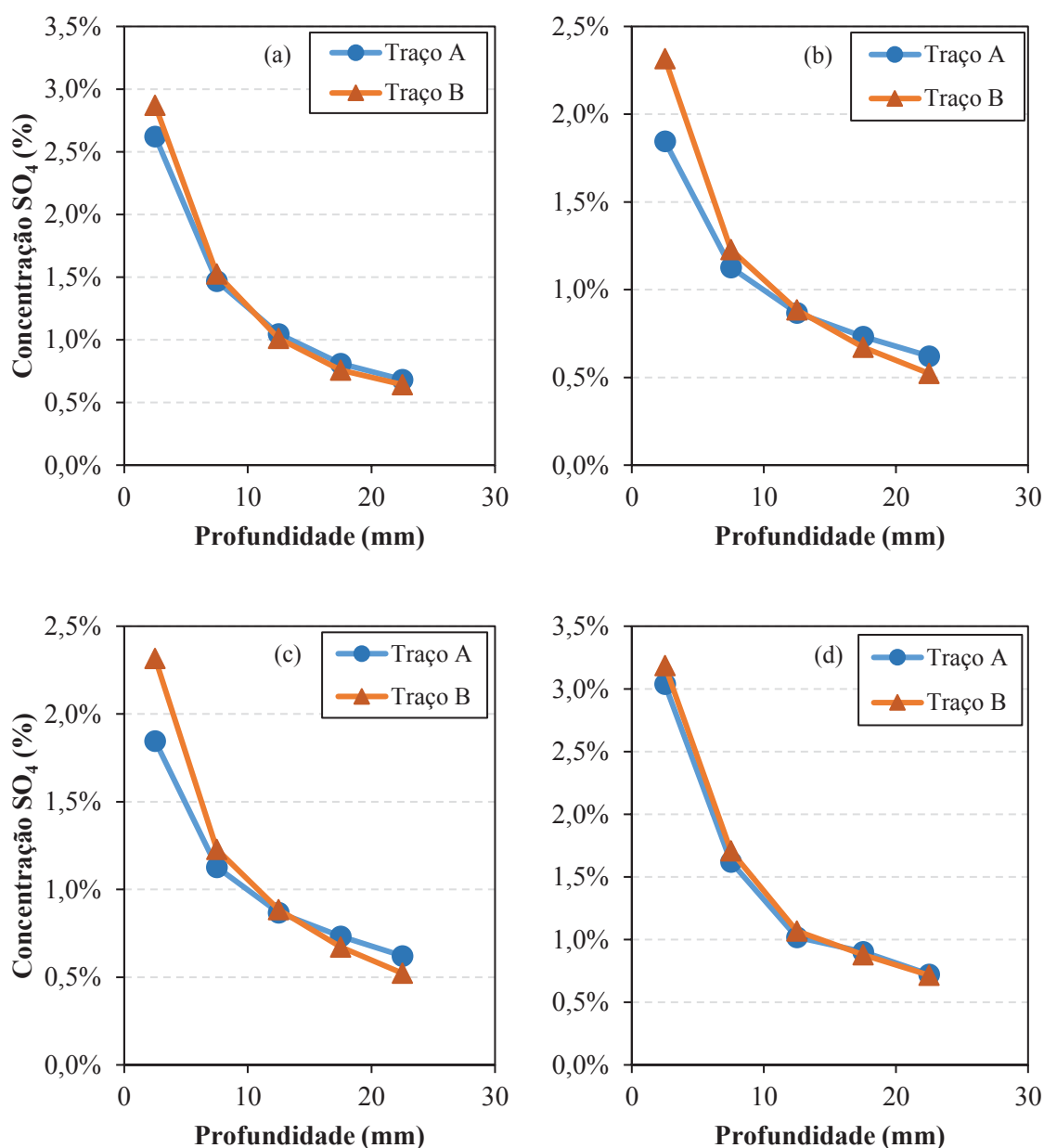


Figura 40 – Variação da concentração de sulfatos no Traço B.



Na Figura 41 os perfis de sulfato obtidos em cada idade são comparados. Da figura, percebe-se que o comportamento de difusão dos íons sulfato foi similar ao longo do período de estudo, apesar das diferentes relações a/c de cada concreto. Isso é um reflexo do mesmo consumo de cimento entre os dois materiais, que também resultou em semelhança estatística na resistência à compressão dos dois traços.

Figura 41 – Comparação entre os perfis de sulfato para o Traço A e o Traço B: (a) 56 dias, (b) 84 dias, (c) 140 dias e (d) 168 dias.

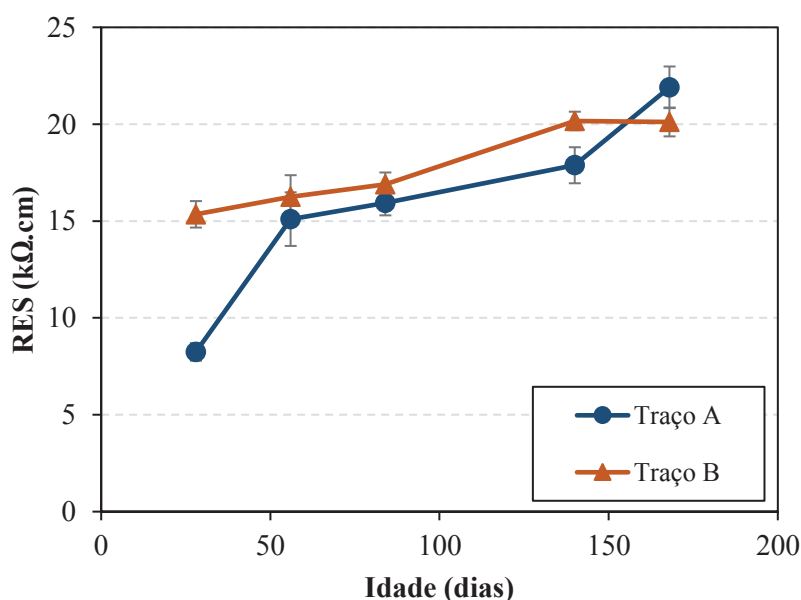


Nota: Destaca-se as diferenças de escala entre os eixos dos quadros.

Fonte: O autor.

A semelhança entre os perfis de concentração de sulfatos não condiz com as diferenças físicas do concreto percebidas no ensaio de absorção de água (Figura 30). Porém, ao se comparar a RES das amostras expostas ao ataque por sulfatos, pode-se perceber que apesar de valores iniciais diferentes, houve uma tendência de aproximação entre a resistividade dos dois traços avaliados. A Figura 42 apresenta a RES das amostras expostas aos ciclos de molhagem e secagem na solução de sulfato de sódio.

Figura 42 - RES das amostras expostas à solução de sulfato de sódio.



Fonte: O autor.

4.6 MODELAGEM DO ATAQUE POR SULFATOS

A partir dos resultados obtidos no programa experimental, foi verificado a aplicação do modelo de Zhou *et al.* (2015) buscando prever as profundidades de difusão dos íons sulfato nos concretos estudados. Na sequência o uso dos dados de RES como um parâmetro de modelagem será discutido tanto para o modelo de Zhou *et al.* (2015), como para o modelo de Andrade (2004).

4.6.1 Coeficiente de difusão

Antes da aplicação do modelo de Zhou *et al.* (2015), é necessário definir o coeficiente de difusão dos concretos estudados. No concreto, o coeficiente de difusão é a propriedade que indica a facilidade com que uma solução consegue se movimentar através de sua rede de poros (MEDEIROS-JUNIOR, 2014).

No presente estudo, os coeficientes de difusão foram obtidos de forma teórica, por meio do ajuste, através do método dos mínimos quadrados, da segunda lei de Fick nos perfis de sulfato obtidos nos ensaios de titulação. A forma clássica da segunda lei de Fick é apresentada na Equação (40) (CRANK, 1975).

$$C_{(x,t)} = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 * \sqrt{D * t}} \right) \right] \quad (40)$$

Onde “ $C_{(x,t)}$ ” é a concentração de sulfatos na profundidade “ x ” e no tempo “ t ”, “ C_s ” é a concentração de sulfatos na superfície do concreto, “ x ” é a profundidade, “ D ” é o coeficiente de difusão e “ t ” é o tempo de exposição.

Partindo dos perfis de concentração de sulfatos obtidos no programa experimental, a Equação (40) pode ser resolvida para obter o coeficiente de difusão “ D ”. Os coeficientes de difusão obtidos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Coeficientes de difusão definidos através da segunda lei de Fick

Idade	Traço A		Traço B	
	mm ² /ano	m ² /s	mm ² /ano	m ² /s
28 dias	-	-	-	-
56 dias	1236,0	3,92 * 10 ⁻¹¹	828,9	2,64 * 10 ⁻¹¹
84 dias	782,9	2,57 * 10 ⁻¹¹	523,8	1,66 * 10 ⁻¹¹
140 dias	352,1	1,12 * 10 ⁻¹¹	296,7	9,41 * 10 ⁻¹²
168 dias	260,7	8,27 * 10 ⁻¹²	247,9	7,86 * 10 ⁻¹²

Fonte: O autor.

Dos resultados da Tabela 17, percebe-se que o Traço A apresentou maiores coeficientes de difusão do que o Traço B, comportamento este que era esperado tendo em vista a maior relação a/c deste traço, que propicia a formação de uma rede de poros mais conectada, facilitando a penetração e movimentação de soluções externas. Os valores de coeficiente de difusão obtidos concordam com valores encontrados na literatura, comumente variando de 10^{-9} e 10^{-12} m²/s (TUMIDAJSKI; CHAN; PHILIPOSE, 1995; SUN *et al.*, 2013; ZHOU *et al.*, 2015; BREKAILO, 2019; MIN *et al.*, 2019).

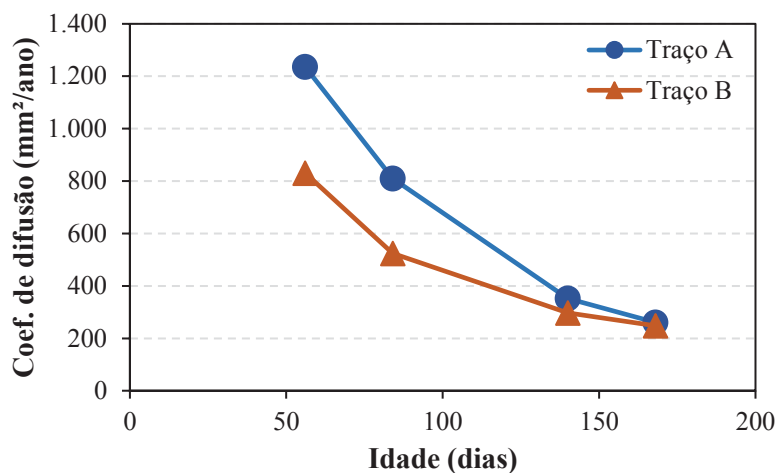
Para todas as condições de monitoramento, o coeficiente de difusão foi reduzido com o passar do tempo. Este fenômeno pode ser atribuído a densificação do concreto causada tanto pela hidratação da matriz cimentícia quanto pela formação de subprodutos do ataque por sulfatos. Esta densificação causa a redução do volume de vazios e, conseqüentemente, dificulta a movimentação iônica no interior do concreto (TIXIER; MOBASHER, 2003; IKUMI, 2018).

Como pode ser observado na Figura 43, a variação do coeficiente de difusão no tempo foi maior para o Traço A, sendo reduzido em 79% entre os 56 e 168 dias. Para o Traço B, esta redução foi de 70% para o mesmo período. Como discutido previamente, esta variação também foi observada nos demais ensaios realizados, onde o Traço A apresentou uma maior redução da absorção e um maior aumento da RES, fatores que assim como o coeficiente de difusão, são indicativos da mobilidade de soluções no interior do concreto.

Na literatura, a variação temporal do coeficiente de difusão é comumente definida pela Equação (41), onde um coeficiente “m” indica a atenuação do coeficiente de difusão causada pela densificação do concreto (a Equação (41) foi apresentada na Equação (39), porém é replicada para facilitar a continuidade da leitura)(ANDRADE, 2004; MEDEIROS-JUNIOR, 2014; ZHOU *et al.*; 2015).

$$D_e = D_{e,0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (41)$$

Figura 43 - Variação do coeficiente de difusão no tempo.

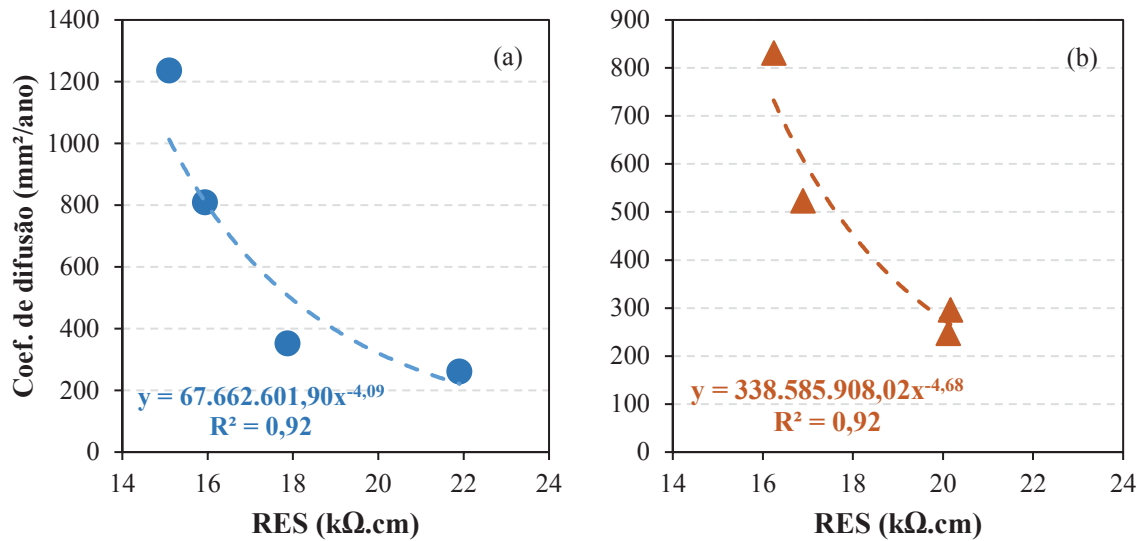


Fonte: O autor.

Ajustando por regressão não linear a Equação (41) para os dados experimentais, obtiveram-se coeficientes de correlação de 0,99 para valores de “m” iguais a 1,29 e 1,12, para o Traço A e B, respectivamente. Estes altos valores de correlação indicam a capacidade da Equação (41) de representar a variação do coeficiente de difusão devido ao avanço do ataque por sulfatos, e indicam a conformidade dos dados experimentais com o comportamento esperado dos processos de difusão.

Sendo o objetivo do presente estudo a avaliação da viabilidade de se utilizar a RES como um indicativo de mobilidade iônica na modelagem do ataque por sulfatos, a comprovação da correlação entre a RES e o coeficiente de difusão é uma etapa importante do trabalho. Na Figura 44 esta apresentada a comparação entre os resultados de RES e os coeficientes de difusão para ambos os traços; na figura, ajustes de linhas de tendência do tipo potência são aplicados para obter o maior coeficiente de correlação.

Figura 44 – Relação entre a RES e o coeficiente de difusão: (a) Traço A; (b) Traço B.



Nota: Destaca-se as diferenças de escala entre os eixos dos quadros.
Fonte: O autor.

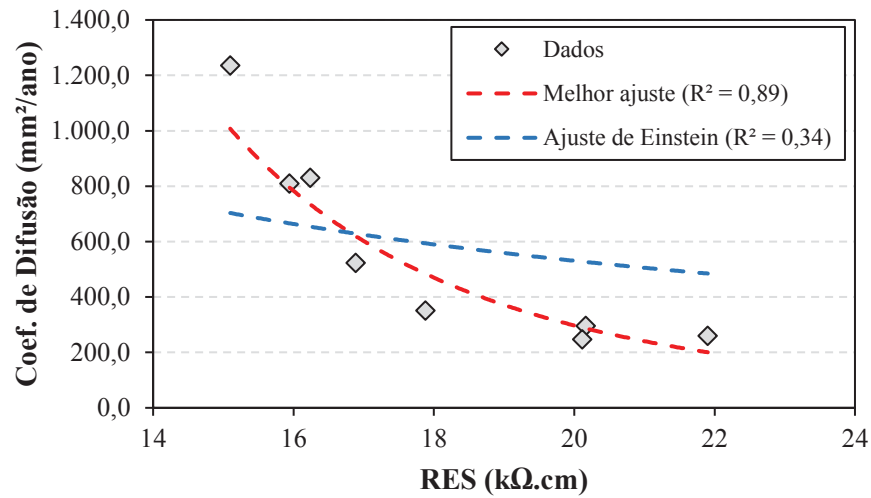
Na Figura 44, são apresentados os melhores ajustes para os dados experimentais. Todavia, como discutido previamente, a relação entre o coeficiente de difusão e a resistividade elétrica de materiais é definida por uma das leis de Einstein como seguindo um ajuste de potência do tipo “ $y = a/x$ ”. Aplicando uma regressão com o formato da equação de Einstein, se obtém os ajustes apresentados nas Equações (42) e (43), para o Traço A e B, respectivamente.

$$D = \frac{12136,34}{RES} \quad (R^2 = 0,37) \quad (42)$$

$$D = \frac{8929,67}{RES} \quad (R^2 = 0,35) \quad (43)$$

Da Figura 44 se percebe a existência de altos coeficientes de correlação entre o coeficiente de difusão e a RES; com um ajuste do tipo potência, os valores de R^2 foram de 0,87 e 0,94 para o Traço A e B, respectivamente. Na Figura 45, os dados de ambos os traços são unificados, de forma a se definir uma relação global entre a RES e o coeficiente de difusão.

Figura 45 - Correlação entre a RES e o coeficiente de difusão.



Fonte: O autor.

Como mostrado na Figura 45, mesmo com as diferenças entre os traços em estudo, ainda é possível determinar um coeficiente de correlação com ajuste igual a 0,89, indicando uma forte correlação entre as propriedades. Porém, os dados experimentais não apresentaram um bom ajuste para a relação de Einstein, com um valor de R^2 igual a 0,34. Um valor de R^2 similar é apresentado por Andrade *et al.* (2014), onde os autores encontraram um coeficiente de correlação igual a 0,38 ao comparar o coeficiente de difusão e a resistividade elétrica superficial de concretos.

A Equação (44) apresenta o ajuste que resultou na melhor correlação entre os dados experimentais, enquanto o ajuste de Einstein é apresentado na Equação (45), onde “ D ” é o coeficiente de difusão, em mm^2/ano , e “ RES ” é a resistividade elétrica superficial, em $\text{k}\Omega.\text{cm}$.

$$D = \frac{1,32 * 10^8}{RES^{4,341}} \quad (44)$$

$$D = \frac{10616,15}{RES} \quad (45)$$

É importante destacar de que a definição da relação apresentada nas Equações (44) e (45) foram obtidas com uma pequena amostra de dados experimentais, com um intervalo de valores de RES e de coeficientes de difusão variando em uma faixa limitada. Por carecer de refinamento e de validações extras, a aplicação desta relação para outros concretos deve ser feita com cautela. Essas equações serão aplicadas posteriormente nesta dissertação para implementar a RES na modelagem do ingresso de sulfatos no concreto.

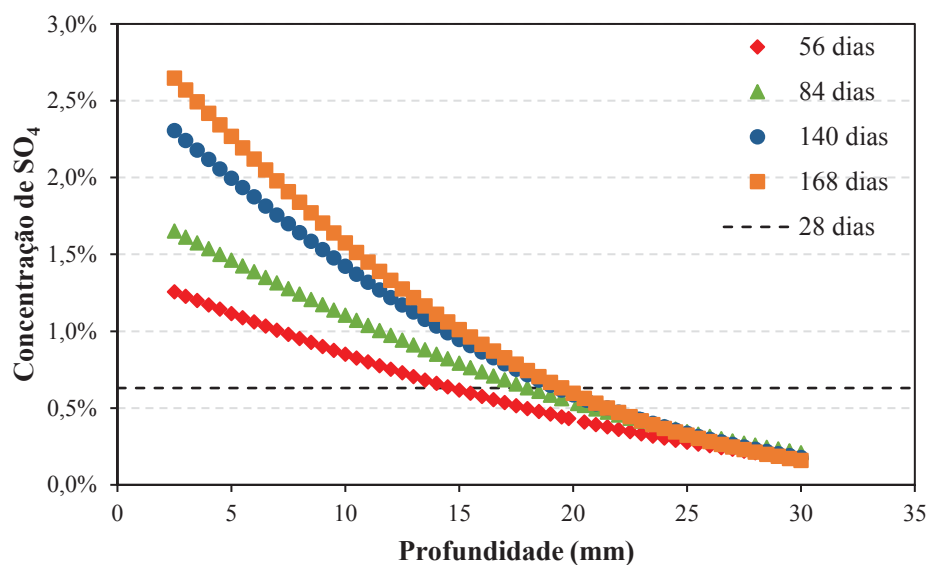
4.6.2 Profundidade de difusão nos perfis de sulfato.

No presente estudo, a modelagem do ataque por sulfatos é avaliada com o objetivo de prever a profundidade de difusão dos íons agressivos. Por esta razão, se faz necessário estabelecer uma metodologia clara para a identificação da profundidade alcançada pelos íons sulfato.

Avaliando os perfis de concentração de íons sulfato definidos no ensaio de titulação gravimétrica, apresentados na Figura 37 e Figura 38, nota-se que os mesmos apresentam uma grande variabilidade entre os ensaios individuais, uma vez que a amostra de ensaio é pequena e o concreto é um material com elevada heterogeneidade. Das figuras, pode-se também perceber que para algumas idades os perfis não atingem a marca de zero (concentração de sulfatos aos 28 dias), processo esse que é atribuído a variabilidade dos ensaios.

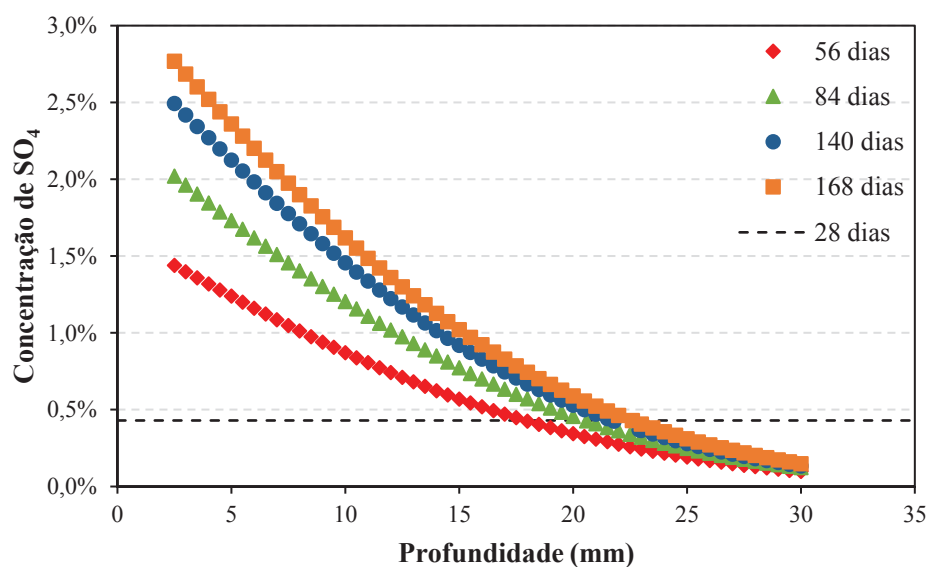
Por esta razão, a profundidade de difusão de sulfatos foi definida pela aplicação da segunda lei de Fick sobre os dados dos perfis obtidos no ensaio de titulação. Na Figura 46 e na Figura 47 são apresentados os perfis de difusão obtidos para os Traços A e B, respectivamente. A partir destas curvas, a profundidade de difusão dos íons sulfato é definida pelo ponto onde o perfil de sulfatos passa pela concentração definida aos 28 dias. Como apresentado previamente, a concentração de sulfatos no concreto aos 28 dias foi definida como 0,548% para o Traço A e 0,428% para o Traço B.

Figura 46 – Curvas de difusão definidas pela segunda lei de Fick: Traço A



Fonte: O autor.

Figura 47 – Curvas de difusão definidas pela segunda lei de Fick: Traço B



Fonte: O autor.

A partir das curvas de difusão definidas, foi possível estimar a profundidade de difusão dos íons sulfato para as idades de monitoramento da presente pesquisa. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Profundidades de difusão dos íons sulfato.

Idade	Traço A	Traço B
28 dias	-	-
56 dias	17,2 mm	17,9 mm
84 dias	20,2 mm	20,6 mm
140 dias	20,9 mm	21,8 mm
168 dias	21,1 mm	22,6 mm

Fonte: O autor.

Dessa forma, foi possível definir a profundidade atingida pelos íons sulfato em cada uma das idades de monitoramento do programa experimental. Com estes dados, é possível verificar a aplicação do modelo de Zhou *et al.* (2015) para as condições de ensaio do estudo.

4.6.3 Modelo de Zhou *et al.* (2015)

O modelo proposto por Zhou *et al.* (2015) é apresentado em detalhes no Capítulo 2. Por conveniência ao leitor, a Equação (46) reapresenta a forma final do modelo.

$$X = \eta \sqrt{\frac{2D_{e,0}t_0^m(C_S - C_0)q}{C_{CA}}} \sqrt{t^{1-m}} \quad (46)$$

Onde “X” é a profundidade de difusão dos íons sulfato, “ η ” é o fator de aceleração das reações devido ao método de exposição aos sulfatos, “ $D_{e,0}$ ” é o coeficiente de difusão, “ t_0 ” é a primeira idade de monitoramento, “ m ” é o coeficiente de atenuação da difusão, “ C_S ” é a concentração de sulfatos na solução agressiva, “ C_0 ” é a concentração de sulfatos no concreto aos 28 dias, “ q ” é uma constante estequiométrica das reações de formação de etringita, “ C_{CA} ” representa a concentração de cálcio aluminatos presentes no cimento, e “ t ” é o tempo de exposição à solução agressiva.

Definido os valores da variável “ m ” (Equação (36)) e ajustando o valor de “ η ”, o modelo foi aplicado para a previsão da profundidade de difusão na idade de 168 dias. Na Tabela 19 são apresentados os valores das variáveis da equação para o presente programa experimental.

Tabela 19 – Resumo das variáveis utilizadas no modelo de Zhou *et al.* (2015).

Variáveis	Valores		Observação
	Traço A	Traço B	
X	-		Profundidade de difusão, objetivo da análise.
η	0,71	0,92	Coeficiente definido empiricamente.
$D_{e,0}$	$3,92 \cdot 10^{-11}$	$2,64 \cdot 10^{-11}$	Coeficientes de difusão na idade de 56 dias (m^2/s).
t_0	28		Idade de 56 dias, representando 28 dias de exposição
m	0,536	0,595	Definido pela Equação (36)
C_s	6,76%		Concentração de SO_4^{2-} na solução agressiva
C_0	0,548%	0,428%	Ensaio de titulação na idade de 28 dias.
q	2,67		Constante estequiométrica
C_{CA}	6,84%		Calculado pelo método de Bogue
t	112 e 140 dias		Tempos de exposição nas idades de 140 e 168 dias.

Fonte: O autor.

Como discutido na revisão bibliográfica, o coeficiente “ η ” tem por objetivo ajustar a equação quando técnicas de envelhecimento acelerado são empregadas, tais como ciclos de molhagem e secagem e variações de temperatura, uma vez que a dedução dos processos de difusão considera apenas uma condição de saturação completa. Na presente pesquisa, apesar de ser utilizado um processo de envelhecimento único para todas as amostras, o ajuste de “ η ” indicou valores diferentes para os dois traços avaliados.

Esta diferença pode ser interpretada como uma variação na forma como cada concreto respondeu ao período de envelhecimento acelerado, em função das suas diferenças microestruturais. Por isso, sendo o coeficiente de difusão o único parâmetro presente na Equação (46) que atua como um indicativo da microestrutura do concreto, pode-se assumir que é esta a fonte das diferenças percebidas no valor da variável “ η ”.

Na Tabela 20 são apresentados os resultados da modelagem utilizando os valores de “ η ” obtidos para cada traço. Dos resultados, pode-se observar que o

modelo foi capaz de prever a profundidade de difusão com uma boa precisão, apresentando erros de 4,59% e 0,21% para os Traços A e B, respectivamente, na última idade. É importante destacar que não é possível calcular as profundidades para as idades de 56 e 84 dias, pois os dados referentes a essas idades foram utilizados para determinar o parâmetro m , conforme indicado por Zhou *et al.* (2015).

Tabela 20 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada. Considerando um valor de " η " diferente para cada traço.

Idade	Profundidade de difusão					
	Traço A – $\eta = 0,71$			Traço B – $\eta = 0,92$		
	Medido	Calculado	Erro	Medido	Calculado	Erro
28 dias	-	-	-	-	-	-
56 dias	17,2 mm	-		17,9 mm	-	
84 dias	20,2 mm	-		20,6 mm	-	
140 dias	20,9 mm	21,00 mm	0,47%	21,8 mm	21,65 mm	0,69%
168 dias	21,1 mm	22,12 mm	4,59%	22,6 mm	22,65 mm	0,21%

Fonte: o autor.

Tendo em vista a hipótese de que o parâmetro " η " é um indicativo do processo de envelhecimento acelerado, e deveria ser igual para os dois traços avaliados, o modelo foi aplicado novamente sobre os dados experimentais, desta vez considerando um valor de " η " igual a 0,81, representando a média dos valores de " η " obtidos para cada um dos traços. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 21.

Dos resultados da Tabela 21 percebe-se que mesmo utilizando um valor de " η " obtido através da média dos ajustes individuais dos traços, os erros de previsão foram de 16,88% e 12,64% na última idade, para os Traços A e B, respectivamente. Verificando sua modelagem, Zhou *et al.* (2015) obtiveram um erro médio de 5,2% para seus próprios dados experimentais, e de aproximadamente 15% em aplicações de dados coletados na literatura. Dessa forma, percebe-se que os erros obtidos na presente pesquisa foram similares aos apresentados pelos autores.

Tabela 21 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada. Considerando um valor médio de " η ".

Idade	Profundidade de difusão					
	Traço A			Traço B		
	Medido	Calculado	Erro	Medido	Calculado	Erro
28 dias	-	-	-	-	-	-
56 dias	17,2 mm	-		17,9 mm	-	
84 dias	20,2 mm	-		20,6 mm	-	
140 dias	20,9 mm	24,11 mm	13,30%	21,8 mm	19,18 mm	13,66%
168 dias	21,1 mm	25,39 mm	16,88%	22,6 mm	20,06 mm	12,64%

Fonte: o autor.

Considerando que a análise proposta por Zhou *et al.* (2015) representa um modelo simplificado de resolução analítica, assume-se que os erros de previsão obtidos são aceitáveis dentro do escopo do estudo, sendo da mesma ordem de grandeza da variabilidade de outras propriedades do concreto, dada a elevada heterogeneidade do material. A variabilidade das propriedades do concreto é discutida em detalhe por Aït-Mokhtar *et al.* (2013), que citam valores médios de aproximadamente 10% para a resistência a compressão e a tração, 15% para a resistividade elétrica volumétrica e de 19% para coeficientes de migração de cloretos.

4.6.4 Uso da RES no modelo de Zhou *et al.* (2015)

Sendo o objetivo da presente pesquisa o de explorar o uso da RES como um parâmetro da modelagem do ataque por sulfatos, uma nova equação foi formulada a partir da substituição da Equação (45) na Equação (46), resultando na Equação (47). Apesar da Equação (44) ter apresentado um melhor ajuste aos dados experimentais, a Equação (45) foi empregada uma vez que é a abordagem comumente adotada na literatura e é fundamentada pela teoria desenvolvida na lei de Einstein (ANDRADE, 2001; ANDRADE *et al.*, 2014; MEDEIROS-JUNIOR, 2014). Aplicar a Equação (44), apesar do melhor ajuste aos dados experimentais, representaria uma abordagem mais empírica, limitando a extrapolação da metodologia para condições similares ao estudo.

$$X = \eta \sqrt{\frac{21232,3 t_0^m (C_s - C_0) q}{RES * C_{CA}}} \sqrt{t^{1-m}} \quad (47)$$

Os dados experimentais foram então aplicados na Equação (47). Inicialmente, foram ajustados valores de “ η ” diferentes para cada um dos traços (0,935 e 1,04, para o Traço A e B, respectivamente), cujos resultados são apresentados na Tabela 22. Na sequência, o modelo foi reaplicado utilizando o valor médio de “ η ” igual a 0,987, como apresentado na Tabela 23.

Dos resultados, percebe-se que mesmo utilizando um valor médio para a variável “ η ”, é possível obter previsões com erros relativos na faixa de 5% a 10%, valores considerados aceitáveis, uma vez que o próprio material concreto apresenta uma variabilidade de suas características, devido a sua inerente heterogeneidade. Os erros obtidos representam uma diferença de cerca de 1 mm entre os valores previstos e medidos, que, de um ponto de vista prático, possuem pouca significância.

Tabela 22 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada utilizando a RES na modelagem. Considerando um valor de “ η ” diferente para cada traço.

Idade	Profundidade de difusão					
	Traço A – $\eta = 0,935$			Traço B – $\eta = 1,040$		
	Medido	Calculado	Erro	Medido	Calculado	Erro
28 dias	-	-	-	-	-	-
56 dias	17,2 mm	-		17,9 mm	-	
84 dias	20,2 mm	-		20,6 mm	-	
140 dias	20,9 mm	20,86 mm	0,21%	21,8 mm	21,71 mm	0,30%
168 dias	21,1 mm	21,96 mm	3,94%	22,6 mm	22,71 mm	0,60%

Fonte: o autor.

A aplicação da Equação (47) resultou em erros inferiores à modelagem utilizando a Equação (46), que faz uso do coeficiente de difusão. Este fenômeno pode ser atribuído ao fato de a RES ter se relacionado de forma melhor com as propriedades físicas dos concretos avaliados, e, dessa forma, melhor representar o concreto atacado.

Tabela 23 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada utilizando a RES na modelagem. Considerando um valor médio de " η " = 0,987.

Idade	Profundidade de difusão					
	Traço A			Traço B		
	Medido	Calculado	Erro	Medido	Calculado	Erro
28 dias	-	-	-	-	-	-
56 dias	17,2 mm	-		17,9 mm	-	
84 dias	20,2 mm	-		20,6 mm	-	
140 dias	20,9 mm	22,03 mm	5,12%	21,8 mm	20,62 mm	5,74%
168 dias	21,1 mm	23,20 mm	9,04%	22,6 mm	21,57 mm	4,78%

Fonte: o autor.

Assim, pode-se destacar a possibilidade de se utilizar da RES como uma variável da modelagem do ataque por sulfatos, mais especificamente como um indicativo da facilidade da movimentação de cargas iônicas através da rede de poros do concreto. A RES pode ser medida através de um ensaio rápido e não destrutivo, facilitando o monitoramento de estruturas expostas ao ataque por sulfatos, com um custo e tempo de operação menor do que a determinação dos coeficientes de difusão.

4.6.5 Modelo de Andrade (2004)

Buscando avaliar a viabilidade da aplicação do modelo de Andrade (2004) para o estudo da difusão de sulfatos no concreto, os dados experimentais da pesquisa foram utilizados nas equações do modelo por meio de uma metodologia similar ao realizado para o modelo de Zhou *et al.* (2015).

As equações do modelo de Andrade (2004), previamente apresentadas no Capítulo 2, são replicadas nas Equações (48) e (49) para conveniência do leitor. É importante salientar que a Equação (48) é uma proposta de adaptação da presente dissertação, tendo em vista que originalmente o modelo foi proposto para cloretos e carbonatação. Por esta razão, os parâmetros r e k foram adaptados para z_{SO_4} e k_{SO_4} . Na Tabela 24 são apresentados os valores das variáveis utilizadas para a modelagem.

$$t_i = \frac{x^2 \rho_t z_{SO_4}}{k_{SO_4}} \quad (48)$$

$$\rho_t = \rho_0 \left(\frac{t_i}{t_0} \right)^q \quad (49)$$

Onde t_i é o tempo (em anos), x é a profundidade de difusão (em cm), ρ_t é a resistividade elétrica no tempo t (em k Ω .cm), z_{SO_4} é um índice de atenuação da difusão causada pela fixação dos íons por meio de reações com a matriz cimentícia, k_{SO_4} é um índice de agressividade do meio, ρ_0 é a resistividade elétrica (k Ω .cm) no tempo t_0 , e q é um fator de idade relacionado ao tipo de cimento empregado.

Os valores de q são obtidos pelo ajuste de uma regressão do tipo “ $y=ax^b$ ” sobre os dados experimentais de RES, apresentados na Figura 32. Como listado na Tabela 24, foram encontrados os valores de 0,4814 e 0,1616 para o Traço A e B, respectivamente.

Na modelagem de Andrade (2004), o parâmetro r_{SO_4} (denominado de r_{CL} ou r_{CO} no trabalho original, para a ação de cloretos e da carbonatação, respectivamente) é entendido como um fator de reação dos íons com a matriz cimentícia. Enquanto valores teóricos e empíricos são encontrados na literatura para a ação da carbonatação e de íons cloreto (ANDRADE, 2004; ANDRADE; D’ANDREA; REBOLLEDO, 2014; MEDEIROS-JUNIOR, 2014), não são encontradas indicações para análises do ataque por sulfatos. Por este motivo, os valores de z_{SO_4} utilizados na presente pesquisa foram obtidos empiricamente a partir dos dados obtidos na campanha experimental.

Inicialmente, o Traço A e o Traço B foram avaliados individualmente, utilizando as variáveis k_{SO_4} , z_{SO_4} e q específicos para cada traço, com os resultados apresentados na Tabela 25.

Dos resultados da Tabela 25, percebe-se que mesmo sendo desenvolvido para análises de difusão de íons cloretos e carbonatação, o modelo de Andrade (2004) é capaz de representar o processo de difusão de íons sulfato, com erro de previsão média de 7,04%.

Tabela 24 – Resumo das variáveis utilizadas no modelo de Andrade (2004).

Variáveis	Valores		Observação
	Traço A	Traço B	
X	-		Profundidade de difusão, objetivo da análise.
t_i	56, 84, 140 e 168		Idades para a previsão da profundidade de difusão.
z_{SO}	0,564	0,307	Ajuste empírico.
k_{SO}	12136,34	8929,67	Ajuste de Einstein (Equações (42) e (43))
t_0	28		Idade de 28 dias.
p_0	8,2	15,3	RES medida aos 28 dias.
q	0,4814	0,1615	Ajuste da Equação (49)

Fonte: O autor.

Tabela 25 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada.

Idade	Profundidade de difusão					
	Traço A			Traço B		
	Medido	Calculado	Erro	Medido	Calculado	Erro
28 dias	-	-	-	-	-	-
56 dias	17,2 mm	16,93 mm	1,55%	17,9 mm	16,11 mm	9,99%
84 dias	20,2 mm	18,81 mm	6,88%	20,6 mm	19,08 mm	7,36%
140 dias	20,9 mm	21,47 mm	2,75%	21,8 mm	23,62 mm	8,35%
168 dias	21,1 mm	22,51 mm	6,70%	22,6 mm	25,49 mm	12,78%

Fonte: o autor.

Na sequência, as equações de Andrade (2004) são reaplicadas utilizando parâmetros k_{SO4} e q médios, iguais a 10616,15 (Equação (45)) e 0,314, respectivamente. Esta análise tem por objetivo verificar a viabilidade da generalização da equação. Os resultados são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Comparação entre a profundidade de difusão medida e calculada.

Idade	Profundidade de difusão					
	Traço A			Traço B		
	Medido	Calculado	Erro	Medido	Calculado	Erro
28 dias	-	-	-	-	-	-
56 dias	17,2 mm	16,78 mm	2,44%	17,9 mm	16,68 mm	6,80%
84 dias	20,2 mm	19,28 mm	4,53%	20,6 mm	19,17 mm	6,93%
140 dias	20,9 mm	22,98 mm	9,94%	21,8 mm	22,84 mm	4,78%
168 dias	21,1 mm	24,46 mm	15,93%	22,6 mm	24,32 mm	7,60%

Fonte: o autor.

Sendo k_{SO_4} um parâmetro relacionado à agressividade do meio ao qual o concreto está submetido, e m relacionado principalmente ao cimento utilizado (ANDRADE, 2004), tais variáveis devem ser iguais para ambos os traços estudados. A análise apresentada na Tabela 26 comprova esta hipótese, mostrando que são obtidos erros médios de 7,37%. Como discutido previamente, dada a alta heterogeneidade do concreto e a variabilidade intrínseca de suas características e propriedades, os erros de previsão obtidos são considerados satisfatórios. Também, os erros obtidos representam diferenças da ordem de 1 a 3 mm entre os resultados previstos e medidos, valores que podem ser considerados insignificantes para casos de obras reais, onde estes erros seriam facilmente compreendidos pelos processos de arredondamento e fatores de segurança empregados nos processos executivos de obras convencionais.

Dessa forma, percebe-se que o uso da RES foi satisfatório para a modelagem do processo de difusão de íons sulfato no concreto. O modelo de Andrade (2004), consolidado na literatura acadêmica e científica para análises dos processos de carbonatação e do ataque por cloretos, pôde ser adaptado para os íons sulfato de forma satisfatória, demonstrando a possibilidade do uso da RES para análises de durabilidade do concreto. O seu estudo e aplicação para outras misturas de concreto e condições de ensaio é estimulado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na sequência serão destacadas as principais conclusões que puderam ser tomadas a partir do trabalho desenvolvido. Da mesma forma, serão apresentadas sugestões de pesquisas futuras que podem dar continuidade a linha de pesquisa, ampliando o conhecimento acerca dos assuntos abordados.

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos objetivos da pesquisa, nos resultados e nas discussões apresentadas, pode-se destacar as seguintes considerações:

- Nos ensaios de absorção de água por imersão, as amostras expostas ao ataque por sulfatos apresentaram uma redução mais acelerada dos valores de absorção. Este processo pode ser explicado pela formação de subprodutos na rede de poros do concreto, reduzindo o tamanho dos poros e fechando conexões entre os mesmos. Ensaios microestruturais são necessários para comprovar essa hipótese.
- Ao final do período de envelhecimento acelerado, as amostras expostas à solução de sulfato de sódio apresentaram um significativo desgaste da superfície do concreto, assim como manchas, fissuras, e eventuais quebras nas bordas dos corpos de prova. Durante o período de secagem, depósitos de sais cristalizados podiam ser observados nas faces dos corpos de prova.
- Os valores de RES apresentaram uma tendência crescente ao longo do período de estudo. Este comportamento indica que esta propriedade foi controlada pelo aspecto físico de densificação do concreto, causado pela precipitação de subprodutos na rede de poros, tornando o concreto mais resistivo. A alteração da condutividade da solução dos poros pela entrada dos sulfatos não causou alterações significativas na RES dos concretos monitorados.

- Os valores de coeficientes de difusão foram da ordem de grandeza de 10^{-11} m²/s, condizentes com valores encontrados na literatura. Com o passar do tempo, e o avanço do ataque por sulfatos, os valores dos coeficientes de difusão foram reduzidos, evidenciando o refinamento da rede de poros, seguindo a equação teórica comumente aplicada na literatura.
- Apesar de uma boa correlação ser encontrada entre os coeficientes de difusão e a RES dos concretos avaliados ($R^2 = 0,8968$), confirmando a hipótese da existência de uma relação entre as propriedades, não se obteve um alto coeficiente de correlação para a relação proposta por Einstein ($R^2 = 0,34$). Como esperado, a relação entre a RES e o coeficiente de difusão é inversamente proporcional, onde quanto maior a facilidade de difusão de um agente agressivo, menos resistivo eletricamente será o concreto.
- A aplicação direta do modelo de Zhou *et al.* (2015) resultou em erros de previsão da ordem de 15%. Enquanto um maior número de dados é necessário para uma melhor aferição do modelo, os resultados mostram um caminho promissor para o uso de modelos simplificados no estudo do ataque por sulfatos.
- A incorporação da RES no modelo de Zhou *et al.* (2015) foi possível, apresentando erros de previsão dentro de uma faixa considerada aceitável (de 5 a 9%). Dessa forma, a RES apresenta uma interessante oportunidade para a avaliação de estruturas expostas ao ataque por sulfatos, permitindo boas previsões a partir de um modelo simplificado. Da mesma forma, o uso da RES no modelo de Zhou *et al.* (2015) resultou em erros inferiores do que quando o coeficiente de difusão foi empregado.
- A adaptação do modelo de Andrade (2004) para a avaliação do ataque por sulfatos foi satisfatória, resultando em erros médios de previsão de aproximadamente 7%. Estes resultados evidenciam a possibilidade do uso da RES como um parâmetro de durabilidade do concreto, estando intimamente ligada à movimentação iônica no interior do concreto.

- Para ambos os modelos avaliados, o uso da RES como um parâmetro da modelagem do processo de difusão de íons sulfato se mostrou possível. Praticamente, as medidas de RES são rápidas e não destrutivas, favorecendo sua utilização frente ao coeficiente de difusão, que requer longos e complexos ensaios laboratoriais.

5.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Durante o período de desenvolvimento da presente pesquisa, o autor participou do desenvolvimento da seguinte publicação:

- MELARA, E. K.; MENDES, A. Z.; ANDRECZEVECZ, N. C.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; CARRERA, G. T. MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Monitoring by electrochemical impedance spectroscopy of mortars subjected to ingress and extraction of chloride ions. **Construction and Building Materials**, v. 242, 2020.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração os resultados experimentais obtidos e as conclusões levantadas, bem como tendo observado as dificuldades e limitações da presente campanha experimental, a seguir são elencadas sugestões de trabalhos futuros que permitem a continuidade e a ampliação desta linha de pesquisa:

- Estudo focado na microestrutura do concreto submetido ao ataque por sulfatos, juntamente com análises de pH e condutividade da solução dos poros, permitindo melhor entender os processos envolvidos e como os mesmos afetam a RES e o coeficiente de difusão.
- Ampliação do campo amostral para a aferição das análises realizadas, através da moldagem de concretos com diferentes relações a/c, tipos de cimento, uso de adições e aditivos, etc.

- Estudo de concretos submetidos a diferentes condições de exposição aos íons sulfato, possibilitando um melhor entendimento do parâmetro “ η ” do modelo de Zhou *et al.* (2015).
- Explorar o parâmetro z_{SO4} do modelo de Andrade (2004), estabelecendo tabelas ou ábacos que permitam sua determinação de forma fácil e prática.
- Uma vez que o processo de difusão estudado na presente pesquisa representa apenas uma etapa do ataque por sulfatos, o uso da RES nas seguintes abordagens pode ser explorado futuramente:
 - Modelagem das reações químicas da matriz cimentícia com os íons sulfato;
 - Modelagem da resposta mecânica (perda de resistência) do concreto frente ao ataque por sulfatos;
 - Modelagem da expansão do concreto submetido ao ataque por sulfatos.

6 REFERÊNCIAS

AIT-MOKHTAR, A.; BELARBI, R.; BENBOUDJEMA, F.; BURLION, N.; CAPRA, B.; CARCASSES, M.; COLLIAT, J. B.; CUSSIGH, F.; DEBY, F.; JACQUEMOT, F.; LARRARD, T.; LATASTE, J. F.; BESCOP, P. L.; PIERRE, M.; POYET, S.; ROUGEAU, P.; ROUGELOT, T.; SELLIER, A.; YANEZ-GODOY, H. Experimental investigation of the variability of concrete durability properties. **Cement and Concrete Research**, v. 45, p. 21-36, 2013.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **Standard Specification for Portland Cement**. C150/C150M. Philadelphia, 2020.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement**. C114. Philadelphia, 2018.

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.** RILEM Symposium. Evanston, Illinois, USA, March 22-24, 2004.

ANDRADE, C., D'ANDRÉA, R. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. **Revista ALCONPAT**, v.1, n. 2, p. 93-101, 2011.

ANDRADE, C.; D'ANDRÉA, R. Electrical resistivity as microstructural parameter for the modeling of service life of reinforced concrete structures. In: 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure. **Anais**. Holanda, 2010. p. 379-388.

ANDRADE, C.; D'ANDREA, R.; REBOLLEDO, N. Chloride ion penetration in concrete: The reaction factor in the electrical resistivity model. **Cement & Concrete Composites**, n. 47, p. 41–46. 2014.

ANDRADE, J.J.O.; POSSAN, E.; FILHO, L.C.P.S.; GAMA, J.C.N. Previsão da vida útil de estruturas de concreto atacadas pela corrosão de armaduras: Panorama atual e perspectivas futuras. 51º IBRACON. **Anais**. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575** - Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

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

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, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117-1** – Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos. Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoeletrica. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211** – Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248** - Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30** – Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45** - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46** - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52** – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53** – Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ATKINSON, A.; HEARNE, J.A. An assessment of the long-term durability of concrete in radioactive waste repositories. **MRS Proceedings**, vol. 50, 1985.

BARY, B. Simplified coupled chemo-mechanical modeling of cement pastes behavior subjected to combined leaching and external sulfate attack. **International Journal of Numerical Analytical Methods in Geomechanics**, vol. 32, p. 1791-1816, 2008.

BARY, B.; LETERRIER, N.; DEVILLE, E.; BESCOP, P.L. Coupled chemo-transport-mechanical modeling and numerical simulation of external sulfate attack in mortar. **Cement and Concrete Composites**, vol. 49, p. 70-83, 2014.

BASISTA, M.; WEGLEWSKI, W. Chemically assisted damage of concrete: A model of expansion under external sulfate attack. **International Journal of Damage Mechanics**, v. 18, n. 2, p. 155–175, 2009.

BAUR, I.; KELLER, P.; MAVROCORDATOS, D.; WEHRLI, B.; JOHNSON, C. A. Dissolution-precipitation behaviour of ettringite, monosulfate, and calcium silicate hydrate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 341–348, 2004.

BISHARA, S. W. Rapid, accurate method for the determination of sulphur trioxide in hydraulic cement. **Transport Research Record**, v. 1301, p. 127-132, 1991

BRAMESHUBER, W.; RAUPACH, M. Non-destructive determination of the water-content in the concrete cover using the multiring-electrode. Em: **International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)**. Berlim, 2003.

BREKAILO, F. **Aplicação dos ensaios de migração e de difusão natural para cálculo do coeficiente de difusão de íons sulfato no estado estacionário e não estacionário no concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2019.

BROWN, P.W. Thaumasite formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, n. 24, p. 301-303. 2002.

CAMPOS, A.; LOPEZ, C.M.; BLANCO, A.; AGUADO, A. Effects of an internal sulfate attack and an alkali-aggregate reaction in a concrete dam. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 668-683, 2018.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part II: Different experimental conditions. Joint relations. **Materials and Structures**, vol.34, p.323-331. 2001.

CCAA – CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. **Chloride Resistance of Concrete**. Report, June, 37p, 2009.

CEFIS, N.; COMI, C. Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 93, p. 57-70, 2017.

CEFIS, N.; COMI, C. Damage modelling in concrete subject to sulfate attack, **Frattura ed Integrità Strutturale**, vol. 8, p. 222-229, 2014.

CHEN, Y.; GAO, J.; TANG, L.; LI, X. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 650-658, 2016.

CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, n. 1, 2002.

CLIFTON, J.R.; POMMERSHEIM, J.M. **Sulfate attack of cementitious materials: volumetric relations and expansions**. NISTIR 5390, Building and Fire Research Laboratory, 1994.

COPPIO, G. J. L.; LIMA, M. G.; LENCIONI, J. W.; CIVIDANES, L. S.; DYER, P. P. O. L.; SILVA, S. A. Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 514-521, 2019.

COUTINHO, J.S.; **Ataque por Sulfatos**. Faculdade de Engenharia do Porto. Porto, 2001.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Oxford University, Oxford, 1975.

D'ANDREA, R. **Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica**. Tese (Doutorado), Universidade Politécnica de Madrid, Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja CSIC, Madri, Espanha, 2010.

DONG, B.; ZHANG, J.; WANG, Y.; FANG, G.; LIU, Y.; XING, F. Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 16-20, 2016.

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.

FLATT, R. J.; SCHERER, G. W. Thermodynamics of crystallization stresses in DEF. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 325-336, 2008.

GANS, P. S. **Correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à compressão do concreto exposto à ciclos de molhagem e secagem com cloretos e sulfatos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

GESOĞLU, M.; ÖZBAY, E. Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems. **Materials and Structures**, v. 40, n. 9, p. 923-937, 2007.

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, No. 5, p. 536-541, 1999.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos da física. Eletromagnetismo**. 3ªed. Rio de Janeiro: LTC, 334p, 1994.

HAYNES, H.; BASSUONI, M.T. Physical salt attack on concrete. **Concrete International**, p. 38-42, 2011.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

HOBBS, D. W.; TAYLOR, M. G. Nature of the thaumasite sulfate attack mechanism in field concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 529–533, 2000.

HOPE, B. B.; IP, A. K. C.; MANNING, D. G. Corrosion and electrical impedance in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 15, 1985.

HOPPE, T. F. Resistividade Elétrica de Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

HOPPE-FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, K. F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, v. 61, 2015.

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.

HOSSACK, A. M.; THOMAS, M. D. A. Evaluation of the effect of tricalcium aluminate content on the severity of sulfate attack in Portland cement and Portland limestone cement mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 56, p. 115 – 120, 2015.

HOU, T.C.; NGUYEN, V.K.; SU, Y.M.; CHEN, Y.R.; CHEN, P.J. Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 397-408, 2017.

HUGHES, B. P., SOLEIT, A. K. O., BRIERLEY, R. W. New Technique for determining the electrical resistivity of concrete. *Magazine of Concrete Research*. v. 37, n. 133. (1985)

HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution – a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. **Construction and Building Materials**. V. 10, p. 381-389, 1996.

IDIART, A.E. **Coupled analysis of degradation processes in concrete specimens at the meso-level**. Tese (Doutorado), Universidade Polit cnica da Catalunha, Barcelona, 2009

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**, vol. 33, p. 411-423, 2011.

IKUMI, T. M. **New insights on the fundamentals and modeling of the external sulfate attack in concrete structures**. Tese (Doutorado). Universidade Polit cnica da Catalunha, Barcelona, 2017.

IKUMI, T. M.; CAVALARO, S. H. P.; SEGURA, I.; AGUADO, A. Alternative methodology to consider damage and expansions in external sulfate attack modelling. **Cement and Concrete Research**, vol. 63, p. 105-116, 2014.

IKUMI, T. M.; CAVALARO, S. H. P.; SEGURA, I.; DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A. Simplified methodology to evaluate the external sulfate attack in concrete structures. **Materials and Design**, vol. 89, p. 1147-1160, 2016.

IKUMI, T. M.; CAVALARO, S. H. P.; SEGURA, I. The role of porosity in external sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, vol. 97, p. 1-12, 2019.

IRASSAR, E.F.; DI MAIO, A.; BATIC, O.R. Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, vol. 26, p.113-123, 1996.

JAMBOR, J. **Sulfate Corrosion of Concrete**, 1998. (Manuscrito n o publicado devido ao falecimento do autor. Disponibilizado e comentado em Skalny, Machand e Odler (2002)).

KALOUSEK, G.L.; PORTER, L.C.; BENTON, E.J. Concrete for long-time service in sulfate environment. **Cement and Concrete Research**, vol. 2, p. 79–89, 1972.

KANG, S.; LLOYD, Z.; BEHRAVAN, A.; TYLER LEY, M. The relationship between the apparent diffusion coefficient and surface electrical resistivity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 299, 2021.

KOLEVA, D. A.; COPUROGLU, O.; VAN BREUGEL, K.; YE, G.; DE WIT, J. H. W. 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.

KUNTHER, W.; LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K. Influence of bicarbonate ions on the deterioration of mortar bars in sulfate solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 44, p. 77–86, 2013.

KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. Empirical models to predict concrete expansion caused by sulfate attack. **ACI Materials Journal**, vol. 97, p. 156-161, 2000.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil. Agência Nacional de Mineração**. Economia Mineral do Brasil - 2009, p. 602-635, 2009.

LEE, H.; CHO, M.S.; LEE, J.S.; KIM, D.G. Prediction Model of Life Span Degradation under Sulfate Attack Regarding Diffusion Rate by Amount of Sulfate Ions in Seawater. International Journal of Materials, **Mechanics and Manufacturing**, vol. 1, 2013.

LENCIONI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios**. Tese de doutorado em Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2011.

LIU, X.; LIU, W.; WANG, S.; XU, F.; HAN, J. Recent development on theoretical models of sulfate attack on concrete. **Materials Reviews**, vol. 28, no. 7, pp. 89–100, 2014 (Em chinês).

LOTHENBACH, B.; BARRY, B.; LE BESCOP, P.; SCHMIDT, T.; LETERRIER, N. Sulfate ingress in Portland cement, **Cement and Concrete Research**, vol. 40, p. 1211-1225, 2010.

LÜBECK A. **Resistividade elétrica de concretos de cimento Portland branco e elevados teores de escória de alto forno**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

LÜBECK, A.; GASTALDINI, A. L. G.; BARIN, D. S.; SIQUEIRA, H. C. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 392-399, 2012.

MALTAIS, Y.; SAMSON, E.; MARCHAND, J. Predicting the durability of Portland cement systems in aggressive environments - Laboratory validation. **Cement and Concrete Research**, vol. 34, p. 1579–1589, 2004.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; GANS, P. S.; PEREIRA, E.; PEREIRA, E. Electrical Resistivity of Concrete Exposed to Chlorides and Sulfates. **ACI Materials Journal**, 116-M40. Maio, 2019.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**, vol. 107, p. 11-16, 2016.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS, M. H. F.; REAL, L. V. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista Alconpat**, 2014.

MEDEIROS-JUNIOR, R.; HINO-JUNIOR, J. R.; MONTEIRO, A. J. A. E.; BILL, G. H.; KAWANAMI, I. Y. Accelerated carbonation effect on electrical resistivity and sorptivity of concrete. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**. 2018.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; MUNHOZ, G. S.; MEDEIROS, M. H. F. Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with diferente contents of pozzolan. **Revista ALCONPAT**, v. 9 (2), p. 152-166, 2019.

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

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Segunda ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEHTA, P.K. Sulfate attack on concrete: Separating the myth from reality. **Concrete International**, v. 22, p. 57-61, 2000.

MENDES, E. S.; OLIVEIRA, R. L. N.; CREMONEZ, C.; PEREIRA, E.; PEREIRA, E.; MEDEIROS-JUNIOR, R.A. 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.

MILLARD, S. G. Reinforced concrete resistivity measurements techniques. **Proceedings of Institute of Civil Engineers**, v. 91, p. 71-88, 1991.

MIN, H.; SUI, L.; XING, F.; TIAN, H.; ZHOU, Y. An effective transport model of sulfate attack in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 2016, p. 365-378, 2019.

MINDESS, S. Resistance of Concrete to Destructive Agencies. Em: Hewlett, P.C.; Liska, M. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5^a ed., p.251-285. Cambridge, 2019.

MONFORE, G. E. The electrical resistivity of concrete. **Journal of PCA Research and Development Laboratories**, v. 10, p. 35-48, 1968.

MANGAT, P. S.; EL-KHATIB, J. M. Influence of initial curing on sulfate resistance of blended cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 22, p. 1089-1100, 1992.

MÜLLAUER, W.; BEDDOE, R. E.; HEINZ, D. Sulfate attack expansion mechanisms. **Cement and Concrete Research**, vol. 52, p.208-215, 2013.

NEHDI, M. L.; SULEIMAN, A. R.; SOLIMAN, A. M. Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 42–53, 2014.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. London: Pearson, 2012.

NEVILLE, A. The confused world of sulfate attack on concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1275–1296, 2004.

PEREIRA, E. **Investigação e monitoramento do ataque por sulfatos de origem interna em concretos nas primeiras idades**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2015.

PETRONILHO, E; SÍGOLO, C. **Princípios fundamentais para projetar e executar estruturas duráveis**, Rev. 01., 2011.

PING, X.; BEAUDOIN, J. J. Mechanism of sulphate expansion I. Thermodynamic principle of crystallization pressure. **Cement and Concrete Research**, v. 22, p. 631–640, 1992.

PINKOSKI, I. M. **Identificação de produtos formados a partir da deterioração do concreto por cloretos e sulfatos e a sua influência nas propriedades mecânicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, 2019.

PINTO, S. R.; GRADIN, F. L.; TORRES, F. N.; CAMPOS, G. H.; TRENTIN, P. O.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Behavior of mortars exposed to attack by sodium and magnesium sulfate. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, p. 5-14, 2020.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete: a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, n. 15, p. 125-131, 2001.

PRESUEL, F.; LIU, Y. Temperature Effect on Electrical Resistivity Measurement on Mature Saturated Concrete. Em: NACE - International Corrosion Conference Series. **Anais**. Janeiro, 2012.

PRINCIGALLO, A; VAN BREUGEL, K; LEVITA, G. Influence of the aggregate on the electrical conductivity of Portland cement concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1755-1763, 2003.

QIN, S.; ZOU, D.; LIU, T.; JIVKOV, A. A chemo-transport-damage model for concrete under external sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 132, 2020.

QUARCIONI, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; PILVAR, A.; MAHDIKHANI, M.; MOODI, F. Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2472-2479, 2011.

REAL, L. V. **Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial**. Dissertação

(Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

REDAELLI, E.; BERTOLINI, L.; PEELEN, W.; POLDER, R. FEM-models for the propagation period of chloride induced reinforcement corrosion. **Materials and Corrosion**, n.8, p. 628-635, 2006.

RILEM TC 154-EMC. Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. **Materials and Structures**, v. 33, p. 603-611, 2000.

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, No.3, p.209-214, 1996.

SAMSON, E.; MARCHAND, J. Modelling the transport of ions in unsaturated cement-based materials. **Computers and Structures**, vol. 85, p. 1740–1756, 2007.

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**, n.32, p.585-592, 2002.

SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK J. Mechanism of sulfate attack: A fresh look. Part 1: Summary of experimental results. **Cement and Concrete Research**, n.32, p.915-921, 2003.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SCHMIDT, T.; LOTHENBACH, B.; ROMER, M.; NEUENSCHWANDER, J.; SCRIVENER, K. Physical and microstructural aspects of sulfate attack on ordinary and limestone blended Portland cements. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 12, p. 1111–1121, 2009.

SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 434-441, 2014.

SHEKARCHI, M.; MORADI-MARANI, F.; PARGAR, F. Predicting chloride penetration into concrete containing silica fume, with measuring the electrical resistivity of concrete. Em: **Proceeding of Fourth Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading**. Seoul, South Korea, p. 369-376, 2004.

SCHERER, G.W. Factors affecting crystallization pressure. Em: K.L. Scrivener, J. Scrivener (Eds.), **Internal Sulfate Attack: Proceedings of RILEM Workshop on Delayed Ettringite Formation, RILEM publications**, Paris, 2004.

SHUMAN, R.; ROGERS, V.C.; SHAW, R.A. The barrier code for predicting long-term concrete performance. **Waste Management**, vol. 89, p. 701-705, 1989.

SILVA, P. C.; FERREIRA, R. M.; FIGUEIRAS, H. Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure. Em: Freitas, FREITAS, V. P.; CORVACHO, H.; LACASSE, M. **XII International Conference on Durability of Building Materials and Components**, FEUP Edições, Porto: Distrito de Porto (PT), 8 p, 2011.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. **Sulfate attack on concrete**. 2002.

SOIVE, A.; QUAN TRAN, V. 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.

SUN, C.; CHEN, J.; ZHU, J.; ZHANG, M.; YE, J. A new diffusion model of sulfate ions in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 39, p. 39-45, 2013.

SUN, D.; WU, K.; SHI, H.; MIRAMINI, S.; ZHANG, L. Deformation behaviour of concrete materials under the sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 232-241, 2019.

TANGANOV B.B. About sizes of the hydrated salt ions – the components of sea water. **Modern problems of science and education**, n.1, p. 36-37, 2013.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London, Academic Press, 1997.

TAYLOR, H. F. W. Modification of the Bogue calculation. **Advances in Cement Research**, v. 2, p. 73-77, 1989.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENNER, K. L. Delayed ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 683-693, 2001.

TIAN, B.; COHEN, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 1, p. 117–123, 2000.

TIXIER, R.; MOBASHER, B. Modeling of Damage in Cement-Based Materials Subjected to External Sulfate Attack. I: Formulation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 15, p. 305-313, 2003.

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**, vol. 15, p. 314-322, 2003.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

TUMIDAJSKI, P. J.; CHAN, G. W.; PHILIPPOSE, K. E. An effective diffusivity for sulfate transport into concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 6, p. 1159-1163, 1995.

UNE 83988-2. **Durabilidad del hormigón – determinación de la resistividade – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner**. Norma Española, 2014.

USGS. **United States Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2020**. Disponível em: < <https://www.usgs.gov/centers/nmic/mineral-commodity-summaries>>. Acesso em 18/05/2020.

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

WANG, Z.; ZENG, Q.; WANG, L.; YAO, Y.; LI, K. Characterizing blended cement pastes under cyclic freeze–thaw actions by electrical resistivity. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 477-486, 2013.

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.

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

WHITING, D. A.; NAGI, M. A. Electrical resistivity of concrete-a literature review. **R&D Serial**, v. 2457, 2003.

XIONG, C.; LINHUA, J.; ZHANG, Y.; CHU, H.; JIANG, P. Characterization of sulfate diffusion into cement paste by low frequency impedance spectroscopy. **Materials Letters**, v. 174, p. 234-237, 2016.

YI, C.; CHEN, Z.; BINDIGANAVILE, V. A non-homogeneous model to predict the service life of concrete subjected to external sulphate attack. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 254-265, 2019.

YOUSUF, F.; XIAOSHENG, W. Investigation of the early-age microstructural development of hydrating cement pastes through electrical resistivity measurements. **Case Studies in Construction Materials**, v.13, 2020.

YU, C.; SUN, W.; SCRIVENER, K. Mechanism of expansion of mortars immersed in sodium sulfate solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 43, n. 1, p. 105–111, 2013.

YU, Y.; ZHANG, Y.X. Numerical modelling of mechanical deterioration of cement mortar under external sulfate attack. **Construction and Building Materials**, vol. 158, p. 490-502, 2018.

YU, Y.; ZHANG, Y.X., KHENNANE, A. Numerical modelling of degradation of cement based materials under leaching and external sulfate attack. **Computers and Structures**, vol. 158, p. 1-14, 2015.

YUAN, J.; LIU, Y.; TAN, Z.; ZHANG, B. Investigating the failure process of concrete under the coupled actions between sulfate attack and drying–wetting cycles by using X-ray CT. **Construction and Building Materials**, v. 108, p. 129-138, 2016.

ZACCARDI, Y. A. V.; GARCÍA, J. F.; HUÉLAMO, P.; DI MAIO, Á. A.; **Influence of temperature and humidity on Portland cement mortar resistivity monitored with inner sensors. Materials and Corrosion**, 2009.

ZENG, X.; LIU, H.; ZHU, H.; LING, C.; LIANG, K.; UMAR, H. A.; XIE, Y.; LONG, G.; MA, C. Study on damage of concrete under uniaxial compression based on electrical resistivity method. **Construction and Building Materials**, 2020.

ZHOU, Y.; TIAN, H.; CUI, H.; XING, F.; SUI, L. Model for sulfate diffusion depth in concrete under complex aggressive environments and its experimental verification. **Hidawi Publishing Corporation**, vol. 2015, 11p, 2015.

ZOU, D.; QIN, S.; LIU, T.; JIVKOV, A. Experimental and numerical study of the effects of solution concentration and temperature on concrete under external sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 139, 2021.

ZUO, X.B.; SUN, W.; YU, C. Numerical investigation on expansive volume strain in concrete subjected to sulfate attack. **Construction and Building Materials**, vol. 36, p. 404-410, 2012.