

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO CURSO**  
**DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

Henrique Resende dos Santos

**CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E A**  
**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS SUBMETIDOS AOS**  
**DIFERENTES ATAQUES DE SULFATOS**

Belo Horizonte  
Novembro/202

Henrique Resende dos Santos

**CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E A  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS SUBMETIDOS AOS  
DIFERENTES ATAQUES DE SULFATOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Chahud

Belo Horizonte  
Novembro/2022

Santos, Henrique Resende dos.  
S237a Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à  
compressão de concretos submetidos aos diferentes ataques de sulfatos.  
[recurso eletrônico] / Henrique Resende dos Santos. - 2022.  
1 recurso online (126 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Adriano de Paula e Silva.  
Coorientador: Eduardo Chahud.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 113-126.

1. Construção civil - Teses. 2. Resistividade elétrica - Teses.  
3. Concreto. 4. Sulfato de magnésio - Teses. 5. Secagem - Teses. I. Silva,  
Adriano de Paula e. II. Chahud, Eduardo. III. Universidade Federal de  
Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)



## ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO **HENRIQUE RESENDE DOS SANTOS**

Realizou-se, no dia 22 de novembro de 2022, às 14:00 horas, Online, da Universidade Federal de Minas Gerais, a 243ª defesa de dissertação, intitulada *CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS SUBMETIDOS AOS DIFERENTES ATAQUES DE SULFATOS*, apresentada por HENRIQUE RESENDE DOS SANTOS, número de registro 2020665870, graduado no curso de ENGENHARIA CIVIL, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em CONSTRUÇÃO CIVIL, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Adriano de Paula e Silva - Orientador (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS), Prof(a). Eduardo Chahud (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS), Prof(a). Maria Teresa Paulino Aguilar (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS), Prof(a). Antônio Alves Dias (EESC-USP).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 22 de novembro de 2022.

Assinado de forma digital  
por Adriano de Paula e  
Silva: 36512460600  
Dados: 2022.12.05  
14:10:36 -03'00'

Prof(a). Adriano de Paula e Silva (Doutor)

Eduardo  
Chahud  
Assinado de forma digital  
por Eduardo Chahud  
Dados: 2023.08.16 13:46:49  
-03'00'

Prof(a). Eduardo Chahud (Doutor)

Prof(a). Maria Teresa Paulino Aguilar (Doutora)

Prof(a). Antônio Alves Dias (Doutor)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a oportunidade de conquistar mais uma etapa importante na minha vida. Em seguida, agradeço aos meus pais, Alexander e Odete, pela formação que me proporcionaram e pelo amor e apoio que recebo. Obrigado ao meu irmão, Bernardo, pelo companheirismo a todo momento. Sou grato também a todos os meus tios e tias, primos e primas, pelos conselhos e por estarem sempre juntos comigo, fortalecendo cada vez mais a nossa união. Gostaria de agradecer a todos os meus amigos por estarem comigo em mais uma vitória.

Sou grato aos professores Dr. Adriano de Paula e Silva, Dr. Eduardo Chahud e Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes pela confiança, orientação e apoio. Agradeço pela oportunidade por dividirem seus conhecimentos e incentivarem meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço à Martins Lanna, Lafarge Holcim, pelos materiais fornecidos, e à LabCon Consultare pelo suporte na realização dos ensaios do concreto e toda a assistência durante o trabalho.

Por fim, aqueles que não foram citados diretamente, mas que de alguma forma contribuíram, muito obrigado!

## RESUMO

Um dos principais parâmetros utilizados atualmente para o monitoramento da corrosão é a resistividade elétrica, que é um ensaio não destrutivo, e é tema de várias pesquisas científicas na atualidade. Já a resistência à compressão, ensaio destrutivo, é considerada a principal propriedade do concreto armado. Sabe-se que a resistividade elétrica e a resistência à compressão são propriedades do concreto que necessitam da constante hidratação do cimento e alteram de acordo com a estrutura dos poros. Assim, analisar em conjunto o desempenho e a durabilidade do concreto quando submetido a diferentes condições de agressividade é importante para realizar inspeções periódicas sem realizar testes invasivos que podem danificar a estrutura, que muitas vezes, pode estar precária. Neste trabalho foram moldados corpos de prova cilíndricos no tamanho 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura com o traço 1:1,4:2,1 (cimento, areia e brita) com cimento CPV-RS e com a relação água/cimento de 0,42 sem o uso de aditivos. Foram avaliados dois tipos de ataques: interno e externo. O ataque interno foi realizado de duas formas. A primeira, consistiu na substituição de 1% do sulfato de magnésio em relação ao agregado miúdo. A segunda, foi a substituição de 10% do sulfato de magnésio em relação ao agregado miúdo. O ataque externo foi feito pela exposição ao ciclo de molhagem e secagem que também foi realizado de duas maneiras. A primeira, com a inserção de 150 mg/L. E a segunda, com a inserção de 50.000 mg/L. Após a cura de 28 dias em câmara úmida, grupos de corpos de prova foram expostos aos ciclos de molhagem e secagem. Os ensaios de resistividade elétrica superficial foram realizados aos 31, 150, 272 dias de idade. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 34, 154, 273 dias de idade. Analisando os resultados identificou-se que a resistividade elétrica superficial cresceu ao longo do tempo para todas as amostras, porém, a que teve menor evolução foi a série com 10% de sulfato de magnésio inserido no traço. Em relação à resistência à compressão, houve um aumento nas idades iniciais e, após os 150 dias, ocorreu o decréscimo dos valores, exceto na amostra que não foi submetida ao ataque de sulfato. Ao correlacionar as duas propriedades, foi encontrado o maior coeficiente de determinação na série de referência.

Palavras-chave: resistência à compressão; resistividade elétrica superficial; sulfato de magnésio; ciclos de molhagem e secagem; ataque interno.

## ABSTRACT

One of the main parameters currently used for the monitoring of electrical resistance paint, which is not a decent test, and is a topic of scientific research at present. On the other hand, the construction resistance is considered a destructive test, considered the main one. It is known that it is a structure of resistance to the concrete structure that is maintained and constant from the maintenance of electric cement and constant according to the structure of the electric pores. Thus, analyze in concrete and the durability of the aggressiveness when carrying out tests of aggressiveness conditions to carry out periodic inspections that can customize the unimportant structure, which can often be precarious. In this work, cylindrical specimens are molded in size 100 mm in diameter and 200 mm in height with the trace 1:1,4:2, 1 (cement, sand and gravel) with CPV-RS cement and with a water/cement ratio of 0.42 without the use of additives. There are two types of attacks: internal and external. The internal attack was carried out in two ways. The first consists of replacing 1% of magnesium sulfate in relation to the fine aggregate. The second was the replacement of 10% of magnesium sulfate in relation to the fine aggregate. The external attack was done by exposure to the wetting and drying cycle which was also carried out in two ways. The first, with the insertion of 150 mg/L. And the second, with an insertion of 50.000 mg/L. After curing for 28 days in a humid chamber, groups of specimens were exposed to wetting and drying cycles. Surface electrical resistivity tests were performed at 31, 150, 272 days of age. Age resistance tests were performed at 34, 154 days. Analyzing the evolution time for a series of surface results that the electrical resistance increased over the analysis time of all versions, however, the one that had the evolution of all the series, however, the one that had 10% of annex sulfate serial with 10% attached on dash. In after resistance to resistance, one in the first 50 days, due to the resistance of the initial values and, except for the values that were not changed from the original values, the values of sulfates were changed. By correlating as two properties, the highest coefficient of determination was found in the reference series.

Keywords: resistance to; surface electrical resistivity; magnesium sulfate; wetting and drying cycles; internal attack.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regra de Sitter relacionado ao tempo de corrosão. (Real, 2015) .....	17
Figura 2 - Mostra uma imagem da etringita no interior do concreto. ....	22
Figura 3 - Mecanismo de ataque por sulfatos devido à formação de etringita. ....	22
Figura 4 - Representação dos efeitos do ataque por sulfatos sobre o concreto...	27
Figura 5 - Formação de monosulfoaluminato de cálcio e etringita, de acordo com a escassez e disponibilidade de sulfato. ....	29
Figura 6 - Monosulfoaluminato de cálcio (1) e a etringita (2). ....	30
Figura 7 - Mostra o preenchimento do poro do concreto devido ao ataque de sulfatos. ....	31
Figura 8 - Diagrama da formação e ataque da taumasita. ....	32
Figura 9 - Souza (2016). ....	34
Figura 10 - Expansão da argamassa submetida ao ataque de sulfato de magnésio em função do tempo.....	35
Figura 11 - Processo de ataque da solução de sulfatos de magnésio. ....	36
Figura 12 - Efeitos do ataque de sulfatos. ....	37
Figura 13 - Avanço dos sulfatos, indicada por teste químico via fenolftaleína. ....	37
Figura 14 - Formação de fases expansivas (gipsita e etringita tardia) no concreto de uma barragem. A figura da esquerda é a barragem Graus e a da direita é a Tabescán. ....	38
Figura 15 - Representação esquemática do ataque de sulfatos externos.....	40
Figura 16 - Elemento uniformemente atacado (a) e elemento sob o ataque externo de sulfatos (b).....	41
Figura 17 - Efeito do ataque por sulfato pelo ciclo de molhagem e secagem na resistência à compressão.....	42
Figura 18 - Resistência à compressão dos concretos submetidos à diferentes ciclos de molhagem e secagem. ....	43
Figura 19 - Resistência à compressão em relação às diversas concentrações de sulfato de sódio em dois meses. ....	44
Figura 20 - Resistência à compressão em relação às diversas concentrações de sulfato de sódio em quatro meses.....	45
Figura 21 - Passagem da corrente elétrica no material.....	46
Figura 22 - Mostra a resistividade elétrica de acordo com a relação água/cimento.	49



Figura 23 - Efeitos da carbonatação em relação à resistividade elétrica para vários tipos de concreto. ....	50
Figura 24 - Mostra a variação da resistividade elétrica com a substituição da cinza casca de arroz. ....	51
Figura 25 – Resultados de resistividade elétrica superficial para condição de ciclos de molhagem e secagem com solução de sulfatos. ....	53
Figura 26 - Resultados de resistividade elétrica superficial para condição de ciclos de molhagem e secagem com solução em água. ....	53
Figura 27 - Teores de contaminação e proporções estudadas. ....	54
Figura 28 - Equipamento de medição de impedância. ....	59
Figura 29 - (a) Circuito equivalente usado para o ajuste dos espectros de impedância obtidos pelo método de contato. (b) Circuito equivalente usado para o ajuste dos espectros de impedância obtidos usando o método sem contato. ....	59
Figura 30 - Medição de resistividade elétrica de uma amostra de sílica ativa a 10% feita usando o método de quatro eletrodos “Wenner”. ....	60
Figura 31 - Variação da resistividade em argamassas contendo 0% de sílica ativa.60	
Figura 32 - Variação da resistência R1 com a argamassa contendo 5% de sílica ativa. ....	61
Figura 33 - Variação da resistividade em argamassas contendo 5% de sílica ativa.62	
Figura 34 - Variação da resistência R1 com a argamassa contendo 10% de sílica ativa. ....	63
Figura 35 - Variação da resistividade em argamassas contendo 10% de sílica ativa. ....	63
Figura 36 - Amostra estudada. ....	64
Figura 37 – Séries de ensaios com teores contaminantes em SO3 e em pirita utilizados na moldagem dos concretos. ....	65
Figura 38 – Resistividade elétrica X Idade. ....	66
Figura 39 - Equipamento para auferir a resistividade elétrica. ....	69
Figura 40 - Relação entre a umidade, resistividade elétrica e a contaminação de sulfatos. ....	70
Figura 41 - Fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto... 72	
Figura 42 - Resultado da resistência à compressão para os ciclos de molhagem e secagem. ....	75

Figura 43 - Resistência à compressão aos 28 dias (condição de cura úmida) e 56 dias (condição de ciclo semanal).....	76
Figura 44 - Mostra a correlação da resistência à compressão e a resistividade elétrica para diferentes tipos de cimento. ....	77
Figura 45 - Mostra os modelos utilizados para obter os coeficientes de determinação ( $r^2$ ). ....	77
Figura 46 - Mostra a curva de correlação entre os ensaios para cada classe do concreto.....	78
Figura 47 - Mostra a correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à compressão nas mesmas idades. ....	79
Figura 48 - Resistividade elétrica do concreto com a indicação do risco de corrosão. ....	81
Figura 49 - Fluxograma ilustrativo do procedimento experimental.....	82
Figura 50 - Mostra as formas dos corpos de prova. ....	83
Figura 51 - Mostra os corpos de prova moldados. ....	84
Figura 52 - Mostra o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	85
Figura 53 - Certificado de Qualidade do Cimento CP V-RS.....	86
Figura 54 - Mostra a curva granulométrica da areia.....	87
Figura 55 - Mostra a pesagem da areia para realização do ensaio de granulometria. ....	88
Figura 56 - Mostra a curva granulométrica da brita.....	89
Figura 57 - Ensaio de granulometria. ....	89
Figura 58 - Mostra a água utilizada no traço e no ciclo de molhagem e secagem.....	90
Figura 59 - Mostra os corpos de prova cilíndricos utilizados no trabalho. ....	91
Figura 60 - Mostra a pesagem do sulfato de magnésio. ....	92
Figura 61 - Mostra os corpos de prova durante a cura úmida.....	93
Figura 62 - Recomendações das normas nacionais e internacionais para o uso de agregados contaminados por sulfetos.....	96
Figura 63 - Aparelho de medição de resistividade elétrica superficial.....	98
Figura 64 - Medições a serem realizadas nos corpos de prova cilíndricos. ....	98
Figura 65 - Mostra a prensa hidráulica da SoloCap. ....	99
Figura 66 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 91 – Referência. ....	101

Figura 67 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série de referência em relação ao tempo.....	102
Figura 68 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série com 150 mg/L de MgSO <sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem em relação ao tempo. ....	103
Figura 69 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série com 50.000 mg/L de MgSO <sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem em relação ao tempo.	104
Figura 70 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série com 1% de MgSO <sub>4</sub> inserido no traço em relação ao tempo. ....	105
Figura 71 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série com 10% de MgSO <sub>4</sub> inserido no traço em relação ao tempo. ....	106
Figura 72 - Gráfico do resultado da resistividade elétrica superficial de todas as séries em relação ao tempo.....	106
Figura 73 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série de referência em relação ao tempo.....	108
Figura 74 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série com 150 mg/L de MgSO <sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem em relação ao tempo. ....	109
Figura 75 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série com 50.000 mg/L de MgSO <sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem em relação ao tempo. ....	110
Figura 76 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série com 1% de MgSO <sub>4</sub> inserido no traço em relação ao tempo. ....	111
Figura 77 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série com 10% de MgSO <sub>4</sub> inserido no traço em relação ao tempo. ....	112
Figura 78 - Gráfico do resultado da resistência à compressão de todas as séries em relação ao tempo.....	112
Figura 79 - Mostra o corpo de prova CP 95 rompido aos 273 dias. ....	114
Figura 80 - Mostra outro corpo de prova CP 95 rompido aos 273 dias. ....	114
Figura 81 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série de referência - CP 91.....	115
Figura 82 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série de referência - CP 91.....	116
Figura 83 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série CP 92 – 150mg/L de MgSO <sub>4</sub> . ....	116
Figura 84 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série CP 92 – 150mg/L de MgSO <sub>4</sub> . ....	117

Figura 85 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série CP 93 – 50.000 mg/L de MgSO4. ...	117
Figura 86 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série CP 93 – 50.000 mg/L de MgSO4. ....	118
Figura 87 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série CP 94 – 1% de MgSO4 no traço....	118
Figura 88 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série CP 94 – 1% de MgSO4 no traço. ....	119
Figura 89 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série CP 95 - 10% de MgSO4 no traço...	119
Figura 90 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série CP 95 - 10% de MgSO4 no traço. ....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentrações dos íons no Oceano Atlântico. ....	23
Tabela 2 - Características dos sais seletinosos. ....	23
Tabela 3 - Concentração de sulfatos em solução de água a 20°C.....	24
Tabela 4 - Valores limites para avaliação da agressividade do solo. ....	24
Tabela 5 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos. ....	25
Tabela 6 - Comparação entre o sulfato anidro de cálcio, sódio e magnésio. ....	33
Tabela 8 - Valores de resistividade elétrica na temperatura de 20°C.....	47
Tabela 9 - Resistividade elétrica dos corpos de prova contaminados e o de referência. .....	55
Tabela 10 - Resistividade elétrica do concreto das séries nas três idades estudadas (condição acelerada de molhagem e secagem).....	56
Tabela 11 - Resultados estatísticos da correlação entre o ensaio de resistividade elétrica e os teores de contaminação empregados. ....	57
Tabela 12 - Materiais utilizados.....	67
Tabela 13 - Resultados da resistividade elétrica nos corpos de prova.....	68
Tabela 14 - Fatores de forma para diferentes tamanhos de corpos de prova e distância (a) entre eixos dos eletrodos. ....	80
Tabela 15 - Relação entre o risco de corrosão e a resistividade elétrica. ....	81
Tabela 16 - Relação dos materiais e traço. ....	84
Tabela 17 - CP's a serem confeccionados no trabalho. ....	96
Tabela 18 - Quantidade de medições. ....	99
Tabela 19 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 92 - 150 mg/L de MgSO <sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem. ....	102
Tabela 20 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 93 - 50.000 mg/L de MgSO <sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem. ....	103
Tabela 21 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 94 - 1% de MgSO <sub>4</sub> inserido no traço.....	104
Tabela 22 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 95 -10% de MgSO <sub>4</sub> inserido no traço.....	105
Tabela 23 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 91 – Referência. ....	108

Tabela 24 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 92 - 150 mg/L de MgSO <sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem. ....	109
Tabela 25 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 93 - 50.000 mg/L de MgSO <sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem. ....	110
Tabela 26 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 94 - 1% de MgSO <sub>4</sub> inserido no traço.....	110
Tabela 27 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 95 - 10% de MgSO <sub>4</sub> inserido no traço.....	111

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVO</b> .....	<b>20</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1 Ataque por sulfatos</b> .....	<b>20</b>
3.1.1 <i>Mecanismos de ataque por sulfatos</i> .....	28
3.1.2 <i>Reações químicas no ataque por sulfatos de magnésio</i> .....	32
3.1.3 <i>Condições de exposição em função da agressividade</i> .....	38
3.1.4 <i>Consequências mecânicas do ataque por sulfatos</i> .....	42
<b>3.2 Resistividade elétrica</b> .....	<b>45</b>
3.2.1 <i>Influência dos parâmetros na medição da resistividade elétrica do concreto</i> .....	48
3.2.1.1 <i>Relação água/cimento</i> .....	48
3.2.1.2 <i>Hidratação da pasta de cimento</i> .....	49
3.2.1.3 <i>Carbonatação</i> .....	50
3.2.1.4 <i>Adições Minerais</i> .....	50
3.3 <i>Resistência a Compressão do Concreto</i> .....	70
3.3.1 <i>Relação água/cimento</i> .....	72
3.3.2 <i>Tipo e finura do cimento</i> .....	72
3.3.3 <i>Forma, textura e dimensão máxima do agregado graúdo</i> .....	73
3.3.4 <i>Adições minerais</i> .....	73
3.3.5 <i>Consequências mecânicas do ataque por sulfatos</i> .....	73
3.4. <i>Correlação entre a Resistividade Elétrica Superficial e a Resistência à compressão</i> .....	76
3.5 <i>Formato corpo de prova</i> .....	79
3.6 <i>Valores de referência</i> .....	80

<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>82</b>
<b>4.1 Materiais</b> .....	<b>83</b>
4.1.1 <i>Caracterização dos materiais</i> .....	85
4.1.1.1 <i>Cimento</i> .....	85
4.1.1.2 <i>Agregado miúdo</i> .....	87
4.1.1.3 <i>Agregado graúdo</i> .....	88
4.1.1.4 <i>Água</i> .....	90
4.2 <i>Dimensões dos corpos de prova</i> .....	90
4.3 <i>Método</i> .....	91
4.4 <i>Ensaio</i> .....	97
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>100</b>
5.1 <i>RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL</i> .....	101
5.2 <i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</i> .....	108
5.3 <i>CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</i> .....	115
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>121</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>125</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>126</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A urbanização e industrialização das regiões do Brasil faz com que haja uma forte agressividade ambiental, então as estruturas de concreto armado constantemente são afetadas por algumas manifestações patológicas. Essas manifestações patológicas fazem com que o concreto tenha um envelhecimento precoce, então, é importante estudar as maneiras que garantam sua vida útil. Isso está relacionado com a durabilidade, que, segundo Ribeiro *et al.*, (2014), corresponde a capacidade dos elementos estruturais suportarem a agressividade ambiental. Este último, tem condições externas e internas de umidade e temperatura, além da existência ou não de substâncias danosas. Sobre este tema, a ABNT NBR 6118 (2014) apresenta uma classificação, de uma forma resumida, da avaliação das condições de exposição da estrutura.

Durante o uso do sistema construtivo das estruturas de concreto armado, estas devem apresentar desempenhos satisfatórios para o qual foram projetadas e construídas (Ferreira Jr *et al.*, 2020). Deste modo, ao longo da sua vida útil, é necessário apresentar solidez, mesmo em condições de operação e condições ambientais adversas (Ferreira Jr *et al.*, 2020). Entretanto, existem inúmeros fatores que são capazes de favorecer significativamente a deterioração de uma estrutura e conseqüentemente a perda da sua durabilidade. Esses fatores, sejam eles intrínsecos e / ou extrínsecos, que vão desde a fase de projeto, a execução (materiais e métodos utilizados), o uso e a manutenção periódica (Ferreira Jr *et al.*, 2020).

A falta de controle da durabilidade e conseqüentemente a redução da vida útil é um dos maiores problemas do concreto armado. Muitas normas de dimensionamento empregadas na prática se restringe a indicar o mínimo teor de aglomerante, cobrimento mínimo da armadura ou relação água/cimento (GJØRV, 2013).

Com o envelhecimento das estruturas compostas por concreto armado, iniciou-se a engenharia de reparos, que tem um custo elevado, e normalmente de difícil execução. Segundo Helene (1993), a análise da durabilidade das estruturas de

concreto armado está progredindo devido ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos nos meios porosos como o concreto.

Com a recuperação das estruturas, surgiram então, os métodos de restaurações que tratavam as manifestações patológicas, tornando a corrosão das armaduras a maior incidência na degradação do concreto armado (Nascimento *et al.*, 2020).

Os investimentos com as intervenções das armaduras corroídas estão associados com as etapas de iniciação e propagação, e crescem de forma gradual a medida em que as atitudes não são efetivadas. Conforme a figura abaixo, verifica-se que, se as recuperações ou reparos sejam realizados no final do período de iniciação, os custos para tal reabilitação serão 25 vezes maiores que se apropriadas técnicas construtivas houvessem sido utilizadas ao longo da execução da obra. Segundo Real (2015), caso a corrosão passar do tempo de iniciação, ou seja, já estiver no período de propagação, os custos são multiplicados por 125.

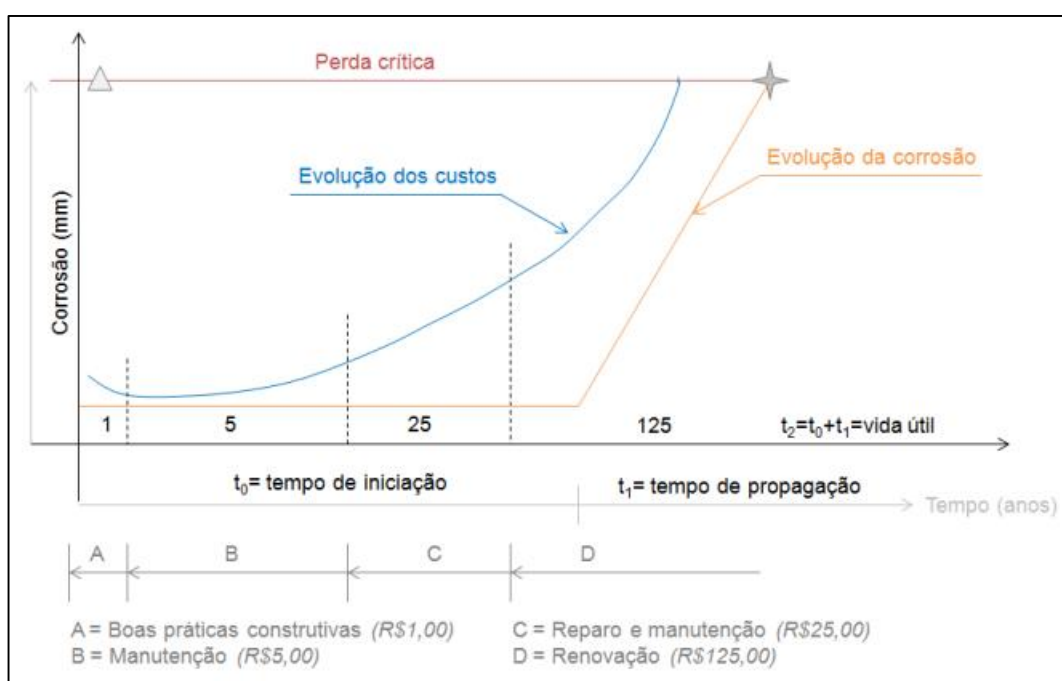


Figura 1 - Regra de Sitter relacionado ao tempo de corrosão. (Real, 2015)

A resistividade elétrica superficial pode detectar o processo corrosivo da armadura, tendo em vista que a sua verificação possibilita presumir o fluxo de acesso dos íons que difundem no concreto por meio da solução aquosa existente nos seus poros (Helene, 1993). Este último, está relacionado com a permeabilidade, e por

consequência, com a resistência do concreto à penetração de agentes agressivos (Andrade e D'Andrea, 2011).

Assim sendo, a resistividade elétrica superficial do concreto é um fator essencial para avaliar sua vida útil e durabilidade (Hornbostel *et al.*, 2013). De tal modo, a concordância entre a resistividade elétrica e a taxa de corrosão permitiria auferir o estado de corrosão (Hornbostel *et al.*, 2013). Esse ensaio não destrutivo, normalmente, é realizado *in loco* na região do concreto apresentando as propriedades da superfície (Mota, 2016). Além disso, este ensaio pode ser realizado também em corpos de prova sob a condição de manter a distância entre os eletrodos. A resistividade elétrica superficial não é redigida por nenhuma norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), porém, existem regulamentos técnicos e normas internacionais que padronizam a sua utilização (Azzi, 2020).

Outro ensaio, porém destrutivo, que pode ser realizado para verificar as propriedades do concreto no estado endurecido é a resistência à compressão. Segundo Tutikian *et al.*, (2020), essa é a característica mais conhecida do concreto servindo de parâmetro para os projetos estruturais.

Este ensaio destrutivo é utilizado com frequência na engenharia para controle de obra e constatação do dimensionamento do concreto (Medeiros, 2014). Para o recebimento e aceitação do concreto a ser colocado em uma estrutura, a NBR 12.655 (ABNT, 2015) estabelece o ensaio de resistência à compressão como um dos critérios de anuência.

Para estabelecer o valor da resistência à compressão, a NBR 5738 (ABNT, 2015) preconiza que devem ser moldados e preparados corpos de prova, e para ser ensaiados, a NBR 5739 (ABNT, 2018) determina os respectivos métodos. Os concretos são classificados, segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), como estruturais aqueles que possuem a resistência característica à compressão superiores a 20 MPa.

A resistência à compressão do concreto está submetida as variações aleatórias da composição, da cura e das condições de fabricação (MATIAS, 2019). Ademais, há

outros fatores que influenciam no resultado deste ensaio, tais como: mudança de origem de fornecimento das matérias primas, turmas de trabalho, bem como interferência atmosférica (verão/inverno) (Bessa, 2017).

Segundo Coutinho e Gonçalves (1994), a resistência e a durabilidade são duas propriedades importantes que envolvem os materiais. Nesse sentido, a NBR 6118 (ABNT, 2014) reúne em uma tabela os tipos de estrutura, componente ou elemento, relacionando com a classe de agressividade ambiental.

A resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão do concreto são alterados conforme as condições ambientais à qual a estrutura está exposta. Nos locais onde há operação de minas e indústrias químicas encontra-se sulfatos solúveis, sobretudo aqueles de cálcio, sódio e magnésio. Sódio e cálcio são os sulfatos mais comuns nos solos, águas e processos industriais (PEREIRA, 2019). Sulfatos de magnésio são mais atípicos, entretanto, mais destrutivos. Os ataques por sulfatos podem provocar avarias no concreto e nos materiais cimentícios, tais como: desintegração, perda de resistência, expansão, lascamento das camadas superficiais e desintegração (Souza, 2006).

Assim, a resistividade elétrica superficial é um dos meios de identificar as etapas da vida útil de uma estrutura por estar ligada a corrente e a taxa de corrosão, e também, por servir como um indicador do grau de umidade presente nos poros. Quanto à resistência à compressão, por se destacar na avaliação da qualidade do concreto (Quadros, 2014), é de extrema importância verificar a sua resistência à ruptura.

Este trabalho será dedicado para obter maiores informações sobre a análise da influência dos diferentes ataques de sulfatos na resistividade elétrica superficial e na resistência à compressão do concreto, e nos próximos tópicos serão apresentados: objetivos (item 2), revisão bibliográfica (item 3), materiais e métodos (item 4), apresentação e análise dos resultados (item 5) e as considerações finais (item 6)

## **2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é analisar a influência do ataque de sulfatos na resistência à compressão e na resistividade elétrica superficial. Dentre os objetivos específicos podem ser citados os seguintes:

- Estudar a influência do teor de sulfatos na resistividade elétrica superficial do concreto;
- Avaliar a resistência à compressão de corpos de prova de concreto expostos ao ataque de sulfatos interno e externamente;
- Estudar a influência do ciclo de molhagem e secagem na resistividade elétrica superficial do concreto;
- Estudar a influência do ciclo de molhagem e secagem na resistência à compressão do concreto;

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Foram realizadas pesquisas sobre a influência do ataque de sulfatos na resistividade elétrica do concreto e na resistência à compressão. Além disso, foi realizado uma relação entre as duas propriedades sob o ataque de sulfatos. Desse modo, foram divididas abaixo em: ataque por sulfatos, resistividade elétrica e resistência à compressão do concreto.

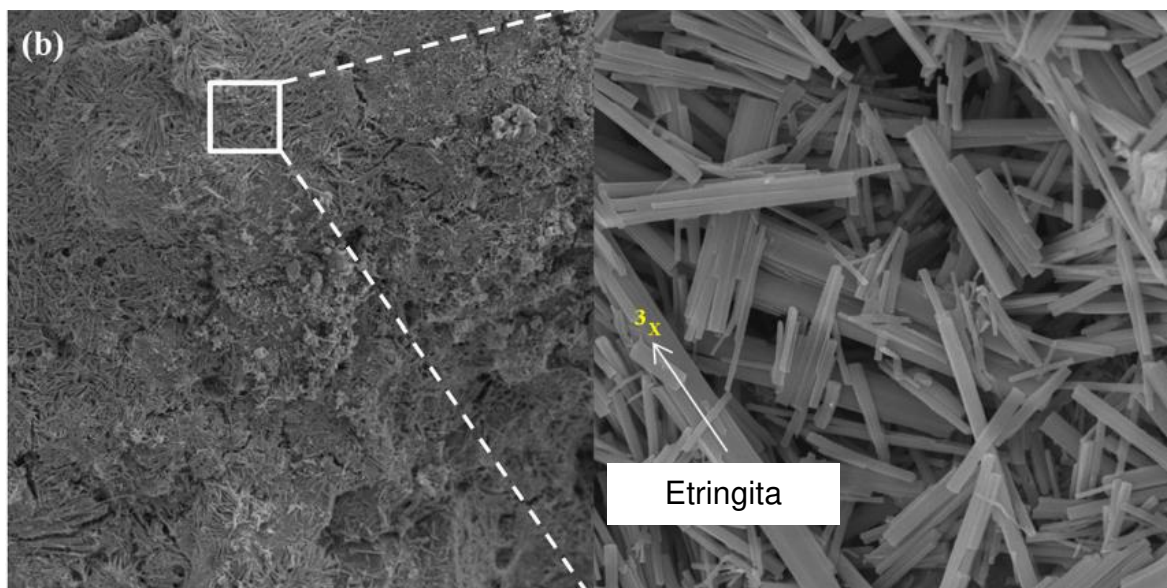
### **3.1 Ataque por sulfatos**

As combinações físicas e químicas podem causar deteriorações no concreto. As reações químicas entre os íons sulfatos e os compostos hidratados do concreto endurecido da pasta de cimento retratam o ataque de sulfatos (RIBEIRO, 2014). A longo prazo, o ataque de sulfatos é uma das deteriorações que mais afetam a durabilidade das estruturas de concreto (AKHRAS, 2006), e quando comparado com o ataque de cloretos, a agressividade dos sulfatos é maior devido aos

compostos expansivos (METHA e MONTEIRO, 2008). Esse ataque pode ocorrer por diversas maneiras e a origem dos sulfatos pode ser interna ou externa. A maneira mais usual de acontecer o ataque por sulfatos é por meio de uma fonte externa, a qual irá introduzir o agente agressivo no interior da pasta de cimento (SOUZA, 2006). Conforme Jiang e Niu (2016), o ataque externo de sulfato causa a degradação de fora para dentro no concreto, desta forma, as camadas externas são as mais afetadas.

Segundo Brown (2002), a literatura identifica as seguintes formas de ataque de sulfatos: formação de etringita e/ou formação de gesso; ataque físico de sulfatos associado a cristalização do acúmulo dos sais de sulfato na superfície do concreto; formação da etringita tardia; ataque de sulfatos associado com a formação de monossulfato de aluminato de ferrita (*AFm phases*); e formação de taumasita. A formação de gesso e etringita necessita de uma fonte de alumina, já a taumasita depende de uma fonte de sílica e carbonato (JALALI *et al.*, 2007). Com a constituição da etringita no interior da matriz, fenômeno químico, bem como a cristalização dos sulfatos, fenômeno físico, há o aumento do volume de 1.2 a 2.2 vezes em relação ao volume inicial, conseqüentemente, ocorre a formação de tensões internas, as quais geram expansões, fissuras e danos (AI-AKHRAS, 2006; HOOTON, 1993; ZHANG *et al.*, 2017). A figura a seguir mostra uma imagem aproximada da etringita no interior do concreto. É importante ressaltar que as formas de ataque de sulfatos aumentam em conjunto com o avanço do conhecimento sobre o tema.

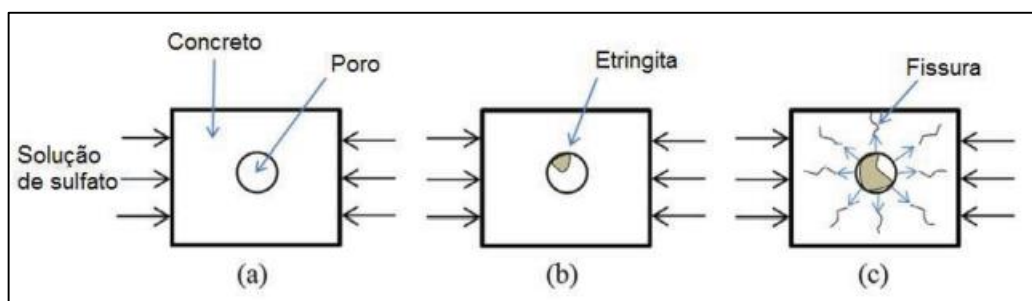
Figura 2 - Mostra uma imagem da etringita no interior do concreto.



Fonte: Medeiros *et al.*, (2020).

No processo de hidratação, as temperaturas podem superar os 70°C devido aos altos teores de cimento, ocasionando a instabilidade da etringita, que, conseqüentemente, irá se formar nos poros da pasta de cimento (Whittaker, 2015). Quando existe uma grande quantidade de gipsita ou sulfatos solúveis nos poros da matriz, seja de origem externa ou interna, existe uma tendência para a formação da etringita (SKALNY *et al.*, 1996). A figura abaixo mostra o esquema de desenvolvimento do mecanismo de fissuração pelo ataque da etringita.

Figura 3 - Mecanismo de ataque por sulfatos devido à formação de etringita.



Fonte: Gans, 2017.

O sulfato, íon  $SO_4^{2-}$ , de acordo com Santos (2012), pode ser encontrado em diversos lugares, são eles: nas águas agrícolas, nas águas naturais (do mar, da chuva e de lençóis freáticos), no solo, nos efluentes industriais e sanitários. No ambiente marinho, existe uma concentração bem significativa de  $SO_4^{2-}$ ,

aproximadamente 2.800 mg/l, conforme tabela abaixo que mostra os teores médios dos íons encontrados no Oceano Atlântico.

Tabela 1 - Concentrações dos íons no Oceano Atlântico.

Íons	Teores médios
Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	2.800 mg/L
Cloreto ( $\text{Cl}^-$ )	20.000 mg/L
Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ )	1.400 mg/L
Sódio ( $\text{Na}^+$ )	11.000 mg/L

Fonte: Ribeiro (2014).

Segundo Moyses (2019), os principais sulfatos que atacam o concreto são: o Sulfato de Cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), o Sulfato de Magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ), o Sulfato de Potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), o Sulfato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e Sulfato de Amônia ( $\text{NH}_4\text{SO}_4$ ). Conforme Santos (2012), os sulfatos de sódio e de cálcio podem ser encontrados nas água naturais, nos efluentes industriais e nos solos.

Filho (1994) relacionou os sais seletinosos conforme as suas características, tais como: tipo, cátion, cor, solubilidade, origem e agressividade. Essa relação pode ser vista na tabela abaixo.

Tabela 2 - Características dos sais seletinosos.

Tipo	Cátion	Cor	Solubil.	Origem	Agressividade
$\text{K}_2\text{SO}_4$	Potássio	branca	baixa	água do mar / subterrânea	elevada
$\text{NH}_4\text{SO}_4$	Amônia	branca	alta	fáb.explosivos / coque ind. quím. / águas subt.	elevada
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Sódio	branca	alta	ind. quím / leite de mar / água do mar	elevada
$\text{CaSO}_4$	Cálcio	branca	baixa	águas subterrâneas / escória de carbono	elevada
$\text{MgSO}_4$	Magnésio	branca	alta	água do mar / subterrânea	elevada
$\text{CuSO}_4$	Cobre	branca	alta	conservação de madeiras / galvanotecnia	elevada
$\text{FeSO}_4$ / $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Ferro	verde/ branca	alta	desinfetante / tinturaria / tratamento de água	elevada
$\text{ZnSO}_4$	Zinco	branca	baixa	ind. químicas/ tinturarias	média
$\text{KAlSO}_4$	Potássio/ Alumínio	branca	baixa	indústrias químicas	média
$\text{PbSO}_4$	Chumbo	branca	muito baixa	indústrias químicas	reduzida
$\text{CoSO}_4$	Cobalto	vermelha	baixa	-	reduzida
$\text{NiSO}_4$	Níquel	verde	baixa	indústrias químicas	reduzida

Fonte: Filho (1994).



A tabela a seguir mostra a solubilidade dos sais em águas a 20 °C dos sulfatos de cálcio, sódio e magnésio. Nota-se que a solubilidade do sulfato de cálcio é muito menor que os outros dois. Segundo Ikumi (2019), a alta estabilidade do sulfato de cálcio faz com que haja uma redução de concentração em solução para 1,5 g/l, diminuindo os danos causado por este ataque. Segundo Siqueira (2008), as águas paradas que contém mais de 500 mg de sulfato de cálcio/litro, e águas correntes com mais de 300 mg podem, geralmente, ser classificadas como agressivas.

Tabela 3 - Concentração de sulfatos em solução de água a 20°C.

Sulfatos	Solubilidade (g/L)	$[SO_4^{2-}]_{aq}$ (g/l)
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	195.0	131.9
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	2.6	1.5
MgSO <sub>4</sub>	337.0	268.9

Fonte: Adaptado de Dean (1985).

Bauer (2019) relata que uma análise química fornece referências sobre a natureza e a quantidade dos elementos presentes na água ou nos solos. Este último, Bauer (2019) apresenta uma tabela com valores-limite como parâmetro da agressividade dos solos, conforme tabela abaixo. O conhecimento dessas informações serve como instrução para a definição dos materiais e características dos concretos.

Tabela 4 - Valores limites para avaliação da agressividade do solo.

Exame		Intensidade da agressividade	
		Fraca agressividade	Forte agressividade
1	Grau de acidez, segundo Baumann-Gully	Acima de 20	—
2	Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) em mg/kg de solo seco ao ar	2000 a 5000	Acima de 5000

Fonte: Bauer (2019).

A norma NBR 12.655:2015 (Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento), também apresenta parâmetros com relação à presença de sulfatos na água e no solo, conforme tabela a seguir. De acordo com esta norma, concretos expostos a solos ou a soluções contendo

sulfatos devem ser preparados com cimento resistente a sulfatos e seguir as diretrizes da tabela 5, demonstrada abaixo. Segundo Neville (2015), o cimento resistente a sulfatos deve ter um baixo teor de  $C_3A$  para que não ocorra a formação de sulfoaluminato de cálcio e gipsita, o que irá proporcionar desagregação no concreto devido ao acréscimo de volume dos compostos resultantes.

Destaca-se que os principais compostos constituintes do cimento são: silicato tricálcico ( $3CaO.SiO_2$ ), silicato dicálcico ( $2CaO.SiO_2$ ), aluminato tricálcico ( $3CaO.Al_2O_3$ ), ferroaluminato tetracálcico ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ). A velocidade de hidratação desses compostos é afetada quando todos estão presentes no cimento devido à interação entre eles.

Tabela 5 - Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água ( $SO_4$ ) presente no solo % em massa	Sulfato solúvel ( $SO_4$ ) presente na água ppm	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal <sup>a</sup>	Mínimo $f_{ck}$ (para concreto com agregado normal ou leve) MPa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	Conforme Tabela 2	Conforme Tabela 2
Moderada <sup>b</sup>	0,10 a 0,20	150 a 1 500	0,50	35
Severa <sup>c</sup>	Acima de 0,20	Acima de 1 500	0,45	40

<sup>a</sup> Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

<sup>b</sup> A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de  $SO_4$  seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.

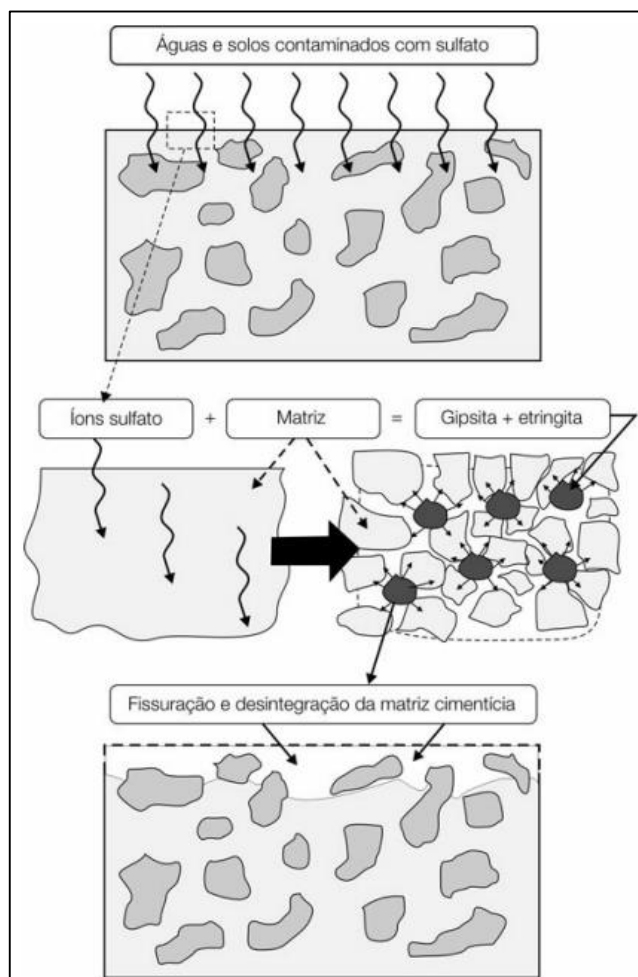
<sup>c</sup> Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: NBR 12.655:2015 (Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento).

Santos (2016) cita os sulfatos que são considerados solúveis: de sódio, magnésio e cálcio. E estes estão presentes em locais como áreas de mineração e de indústrias de papel, químicas e de celulose. O sulfatos solúveis, de acordo com Moyses (2019), são considerados os mais agressivos devido à facilidade de atacar o concreto.

Para ocorrer o ataque de sulfatos, segundo Whittaker (2015), os ânions sulfatos têm que entrar em contato com a pasta de cimento, caso este ataque seja mais que superficial, os íons são transportados da superfície para dentro da massa do concreto. Através desse contato com a pasta cimentícia, o sulfato precisa encontrar os aluminatos e cálcios para reagir (WHITTAKER, 2015). A medida que os sulfatos ingressam, vai ocorrendo a lixiviação do cálcio e do hidróxido, além dos álcalis (Adenot and Buil, 1992; Kamali *et al.*, 2003, 2008; Planel *et al.*, 2006; Revertegat *et al.*, 1992; Roziere and Loukili, 2011). Assim, com a lixiviação, o pH do concreto vai diminuindo e acarretando na descalcificação do C-S-H (Adenot and Buil, 1992), além da queda do pH. A duração da lixiviação depende de alguns fatores, como por exemplo: pH (Roziere *et al.*, 2009) e temperatura da solução; fator água/cimento; fonte de sulfato e o uso de adições minerais (WHITTAKER, 2015). O concreto, quando atacado por sulfatos, apresenta um aspecto típico de cor esbranquiçada, com a degradação geralmente iniciando-se pelas laterais e depois ocorrendo fissuração e lascamento (NEVILLE, 2015). O motivo dessa aparência é devido à formação do sulfato de cálcio (gesso) e do sulfoaluminato de cálcio (etringita), sendo que estes dois resultados da reação gerado pelo ataque de sulfatos ocupam um volume maior que os compostos que eles substituíram (NEVILLE, 2015). Esse ataque pode ser visualizado na imagem a seguir.

Figura 4 - Representação dos efeitos do ataque por sulfatos sobre o concreto.



Fonte: Ribeiro (2014).

Com os íons agressivos no concreto, cresce a concentração iônica da solução aquosa dos poros, aumentando a condutividade elétrica, resultando em uma menor resistividade elétrica superficial. Assim, quanto mais saturados os poros estiverem e com uma maior quantidade de poros com maiores diâmetros (maior fator água/cimento), a resistividade será menor (POLDER e PEELEN, 2002). E com a fissuração e deslocamento no interior do concreto devido aos efeitos dos compostos expansivos, ocorre a perda da resistência à compressão (COSTA, 2004).

Segundo Liu *et al.*, (2020), já foram realizadas diversos estudos sobre o ataque de sulfatos no concreto, como por exemplo: relação água/cimento; concentrações de sulfatos; aditivos, adições, entre outros. Sobre as adições, Alapour *et al.*, (2017) estudaram os efeitos da escória no ataque de sulfatos em concretos durante 38 anos de exposição ao sulfato de sódio. E obteve como resultado que a substituição

de 65% de escória sobre o cimento, aumenta a durabilidade do concreto exposto a este sulfato.

Apesar de se ter diversos conhecimentos sobre o ataque de sulfatos, existe ainda muitos problemas que não estão esclarecidos, como os mecanismos de erosão, as formas de erosão e as variações de desempenho do concreto (Cohen *et al.*, 2003).

### 3.1.1 Mecanismos de ataque por sulfatos

Segundo Biczók (1972), entre os sais de sulfatos mais agressivos ao concreto estão:

- $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  (gipsita)
- $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  e  $K_2SO_4$
- $MgSO_4 \cdot 7H_2O$

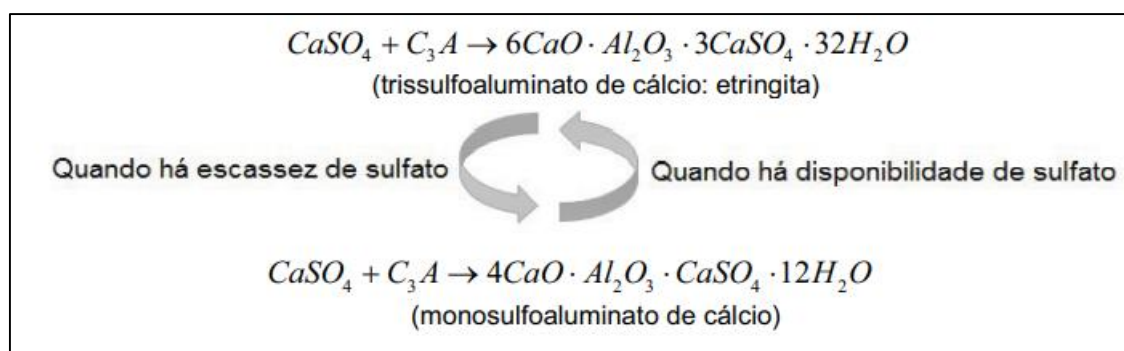
Para o ânion  $SO_4^{2-}$ , o sistema de ataque ocorre de maneira divergente conforme os cátions ( $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ , etc..) que estão ligados, tendo em vista que as formas de atuação com a matriz cimentícia são particulares de cada sal (SOUZA, 2006). Segundo Moyses (2004), a classificação de agressividade dos sulfatos começa com o sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ), depois os sulfatos de sódio e magnésio e finalizando com o sulfato de amônio ( $NH_4SO_4$ ).

Segundo Gans (2017), as condições de exposição que tem o pH inferior a 12,5 são consideradas agressivas, a título de exemplo, as soluções de sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Com o pH alto na estrutura de concreto, favorece a presença de monossulfato ao invés da etringita (TAYLOR, FAMY e SCRIVENER, 2001), porém a diminuição da alcalinidade resultante do contato das soluções agressivas (BROWN, 1981), da lixiviação, carbonatação (PIASTA, 2017), ajuda na formação e estabilidade da etringita.

A gipsita tem a função de controlar a pega da pasta de cimento Portland ao longo da sua hidratação, associando-se com os aluminatos para formar a etringita, sendo que essa formação ocorre nas primeiras 24 horas (etringita primária). Após o

consumo da gipsita, a etringita vai, progressivamente, sendo convertida em monossulfoaluminato, isto é, o produto final de hidratação. No entanto, quando o concreto já está endurecido e há contato com ambientes ricos em sulfatos, a condição de equilíbrio é alterada, assim a reação tem a tendência de voltar ao estado original, com a possibilidade de acontecer a recristalização da etringita (etringita secundária), conforme mostrado na figura abaixo.

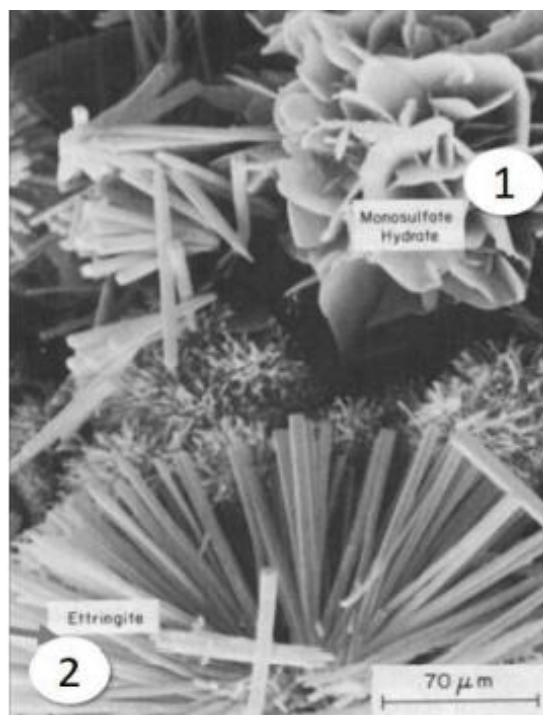
Figura 5 - Formação de monossulfoaluminato de cálcio e etringita, de acordo com a escassez e disponibilidade de sulfato.



Fonte: GANS (2017).

O monossulfoaluminato de cálcio (1) detém uma morfologia em forma de rosácea, já a etringita (2) apresenta uma configuração semelhante a agulhas intertravadas, com isso preenchem um maior espaço, provocando fissuras e tensões internas (HONGYAN, 2013). A diferença entre os cristais é mostrada na imagem a seguir.

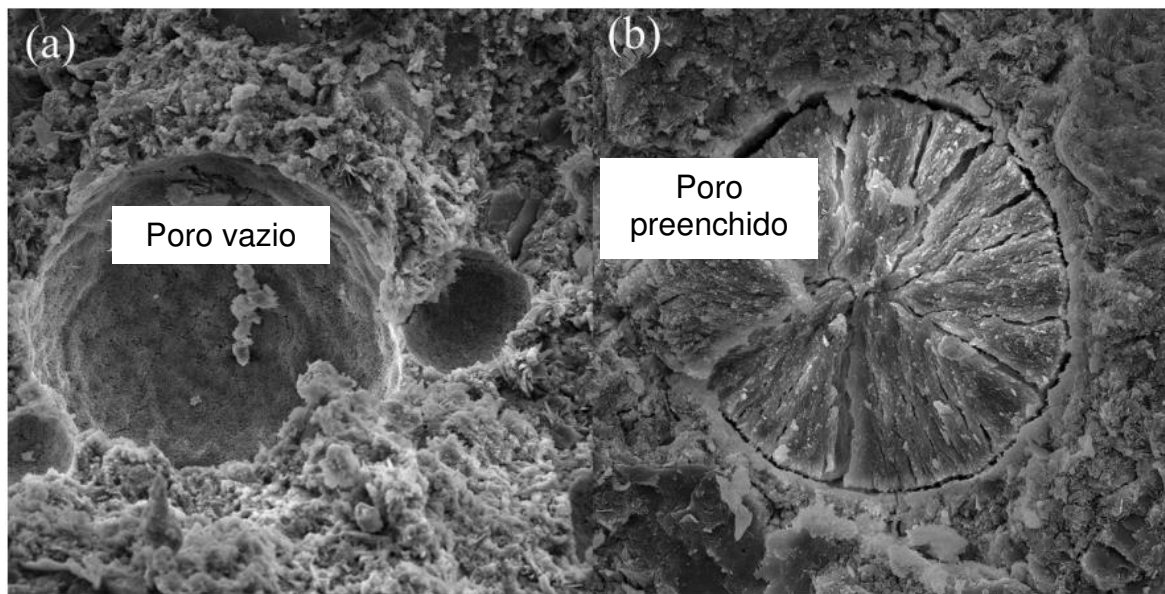
Figura 6 - Monosulfoaluminato de cálcio (1) e a etringita (2).



Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

A perda de adesão e resistência, lascamento e expansão está relacionado à formação de gipsita, por isso a redução da resistência à tração dos concretos; a formação de etringita está ligada com a expansão e a fissuração; já a formação da taumasita tem um efeito mais prejudicial, pois pode modificar o concreto endurecido em uma massa não coesa, em razão dissolução do silicato de cálcio hidratado (principal responsável pela resistência do concreto) (WERITZ *et al.*, 2009). Este último tem um comportamento típico: um leve aumento na resistência nos estágios iniciais do ataque, como consequência da densificação da estrutura, e em seguida, a perda da coesão, resistência e rigidez (PEREIRA, 2015).

Figura 7 - Mostra o preenchimento do poro do concreto devido ao ataque de sulfatos.



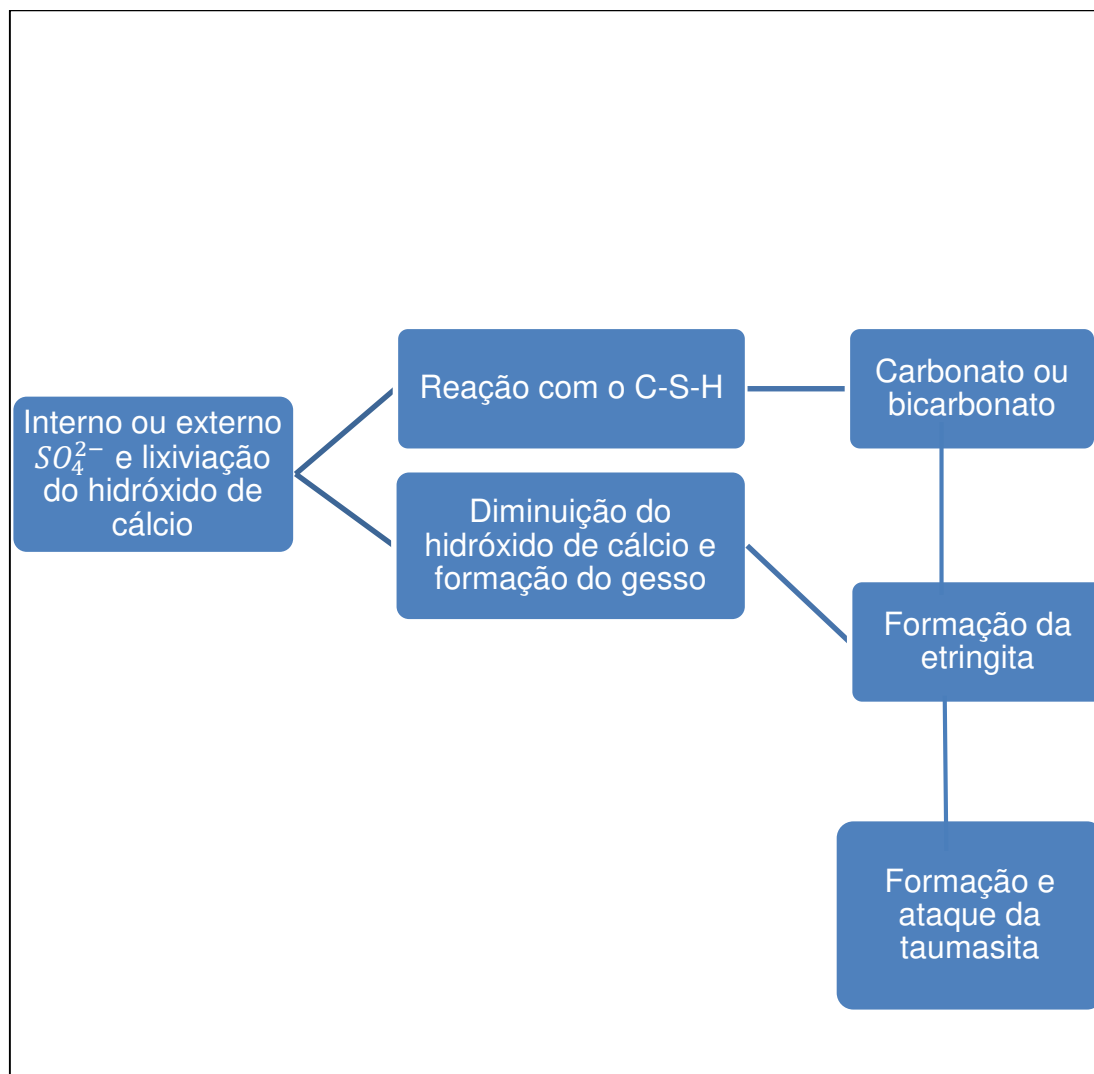
Fonte: Adaptado de Medeiros *et al.*, (2022).

A taumasita é uma maneira singular de ataque de sulfatos que ocorre geralmente com a disponibilidade de carbonatos e bicarbonatos na matriz cimentícia com a uma quantidade elevada de umidade e principalmente em baixas temperaturas (BASSUONI, 2014). Como já é sabido, no ataque de sulfatos ocorre a formação do gesso e este provoca a produção da etringita.

Há uma correspondência entre a taumasita e a etringita, pois são encontradas com frequência juntas deteriorando o concreto, por isso tem-se discutido se elas fazem parte da mesma mistura ou se a solução é estabelecida nas mesmas condições (BROWN, 2002). Outra semelhança entre ambas é do ponto de vista estrutural, onde a alumina é substituída por íons silicato (Bensted, 1999; Collepari, 1999; Macphee and Diamond, 2003). Segundo Whittaker (2015), a presença de etringita antecede a formação da taumasita. Kohler *et al.*, (2006) encontraram uma ligação entre a etringita e a taumasita, qual seja: a etringita controla a taxa de formação da taumasita. Gaze *et al.*, (2000) e Taylor, (1997) relataram que o progresso de formação da taumasita está ligado à extinção da etringita. A formação da taumasita é mostrada na figura a seguir.



Figura 8 - Diagrama da formação e ataque da taumasita.



Fonte: Adaptado BASSUONI (2014).

Segundo Elahi *et al.*, (2021), as três principais estratégias recomendadas para evitar o ataque de sulfatos são: (i) limitar o teor de  $C_3A$ ; (ii) reduzir o hidróxido de cálcio utilizando adições minerais e; (iii) reduzir a permeabilidade do concreto diminuindo a relação água/cimento.

### 3.1.2 Reações químicas no ataque por sulfatos de magnésio

Todos os sulfatos são potencialmente danosos ao concreto, reagindo com a pasta de cimento hidratado, conforme supracitado. Porém, o sulfato de magnésio demonstra uma certa singularidade (MOYSÉS, 2004) por ser mais solúvel, o que

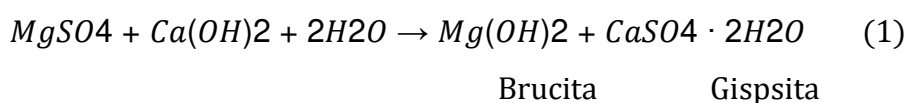
aumenta o potencial de ataque. Além disso, segundo Neville (2004), o sulfato de magnésio reage com todos os produtos de hidratação do cimento. Segundo Souza (2016), o sulfato de magnésio anidro tem uma massa molar igual a 120,42 g/mol composta de 20,19 % de  $Mg^{2+}$  e 79,81% de  $SO_4^{2-}$ , com uma solubilidade de 26,9 g/100 ml de água a uma temperatura de 0° C, sendo assim, é proximadamente 5,5 vezes mais solúvel que o sulfato de sódio e em torno de 100 vezes mais solúvel que os sulfato de cálcio, conforme mostrado na tabela a seguir.

Tabela 6 - Comparação entre o sulfato anidro de cálcio, sódio e magnésio.

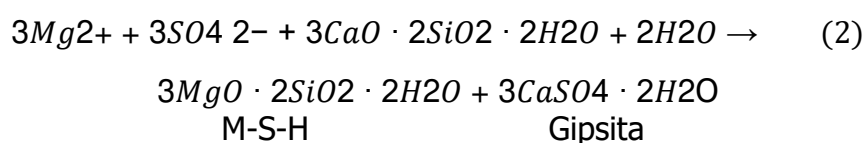
Molécula	Massa molar (g/mol)	Cátion (%)	Ânion (%)	Solubilidade à 0 °C (g/100mL de H <sub>2</sub> O)	Teor máximo em 100 mL de H <sub>2</sub> O a 0 °C (g)	
					Cátion	Ânion (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
CaSO <sub>4</sub>	136,14	29,44%	70,56%	0,19	0,06	0,13
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142,04	32,37%	67,63%	4,76	1,54	3,22
MgSO <sub>4</sub>	120,42	20,19%	79,81%	26,9	5,43	21,47

Fonte: Souza (2016).

Segundo Skalny *et al.*, (2002), o início do contato da solução do sulfato de magnésio e a pasta de cimento hidratada é a reação do sulfato com a portlandita, dando origem a brucita ( $Mg(OH)_2$ ) e a gipsita ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), conforme demonstrado na equação abaixo.



A formação de hidróxido de magnésio, segundo Ikumi (2019), faz com que haja a diminuição do pH, assim transforma o gel C-S-H em M-S-H, que não tem propriedades ligantes, conforme equação 2. Além disso, na reação química ocorre a formação da gipsita.



Na figura abaixo, mostra a interação entre a solução de sulfatos de magnésio com os produtos de hidratação do cimento Portland.

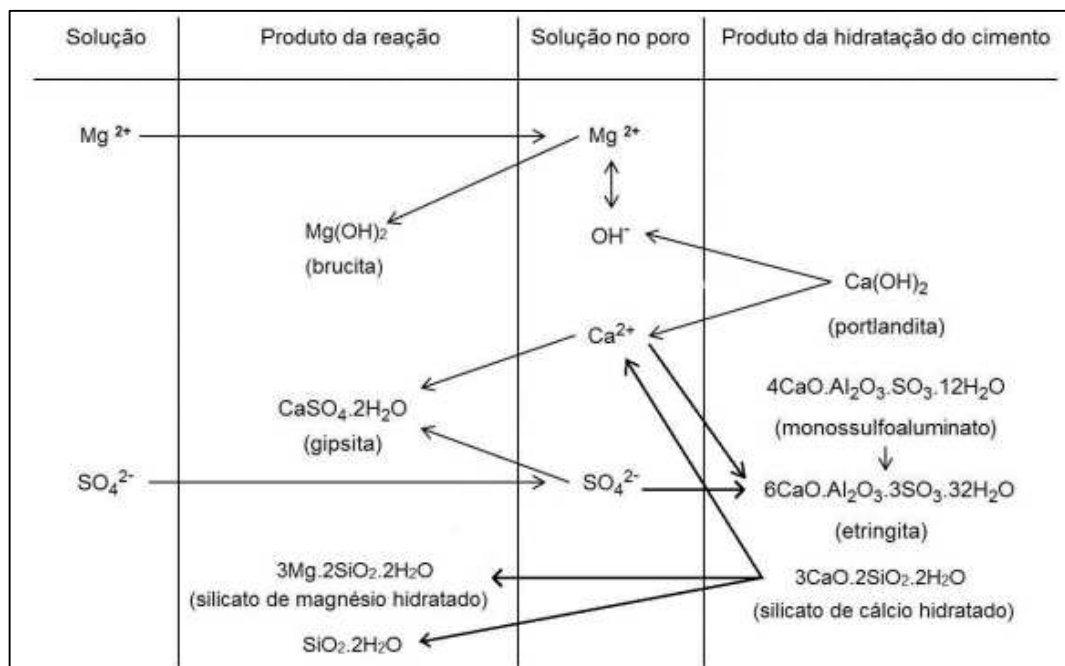
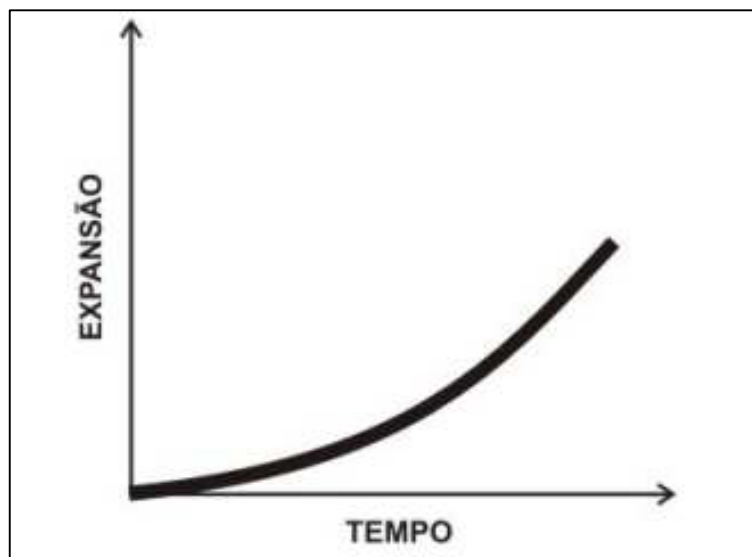


Figura 9 - Souza (2016).

As barras de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos de magnésio sofrem uma variação dimensional mais distribuída ao longo do tempo, se comparado com o sulfato de sódio, conforme demonstrado na figura a seguir.

Figura 10 - Expansão da argamassa submetida ao ataque de sulfato de magnésio em função do tempo



Fonte: Santhanan; Cohen; Olek, 2003.

O ataque de sulfato de magnésio nos materiais cimentícios pode ser dividido em seis passos (Santhanan; Cohen; Olek, 2003):

Passo 1 – A solução de sulfato de magnésio espalha-se no interior do material;

Passo 2 – Na superfície do corpo de prova é formado a brucita ( $Mg(OH)_2$ ), como consequência da reação do sulfato de magnésio com a portlandita ( $(Mg(OH)_2)$ ). A gipsita também é formada junto à camada de brucita.

Passo 3 – O pH diminui devido à formação de brucita, que consome muita portlandita. Dessa forma, o C-S-H libera portlandita para manter o equilíbrio, elevando novamente o pH. Assim, vai ocorrendo a descalcificação da estrutura.

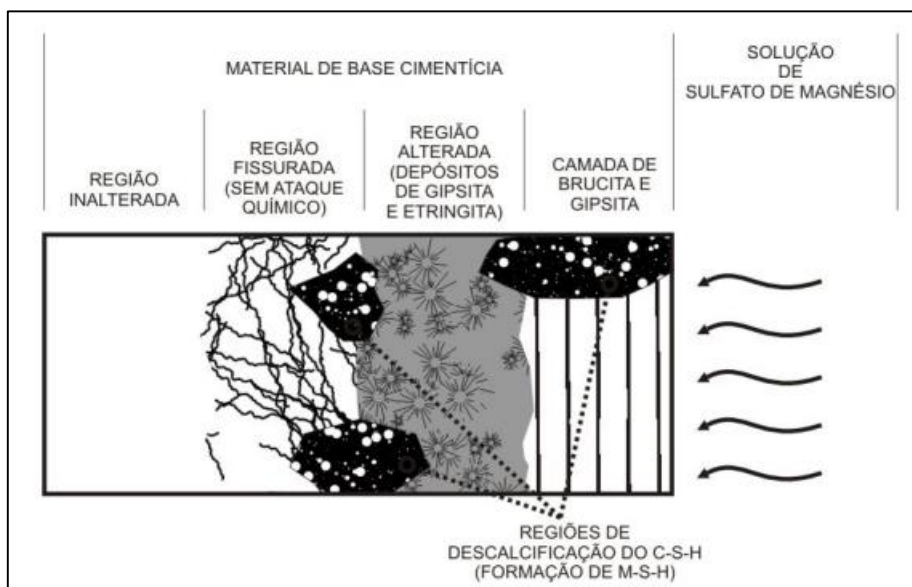
Passo 4 – A camada de brucita vai difundindo no interior do material cimentante.

Passo 5 – A formação de gipsita e etringita ocorre nas regiões inferiores a camada de brucita, e como consequência, gera expansão e tensão interna nas camadas abaixo.

Passo 6 – Em algumas regiões de agressão ao corpo de prova, o cátion  $Mg^{2+}$  ataca diretamente o C-S-H, provocando perda de resistência e desintegração da pasta.

A figura abaixo mostra o processo de ataque da solução de sulfatos de magnésio.

Figura 11 - Processo de ataque da solução de sulfatos de magnésio.



Fonte: Souza (2006).

No trabalho realizado por Huang *et al.*, (2021), o concreto quando atacado pela solução de sulfato de magnésio apresenta um aumento de massa contínuo na fase inicial, entre 9 a 12 meses, apresentando uma baixa deterioração, tendo em vista que ainda estavam na fase de absorção da solução de sulfato. Ao passar do tempo, os corpos de prova diminuíam a quantidade de solução absorvida conforme as amostras saturavam, porém, a deterioração aumentava, tendo como resultado a desintegração, conseqüentemente, a perda de massa. Dessa forma, ao longo do tempo os corpos de prova foram diminuindo gradativamente.

Em um estudo realizado por Lima e Silva *et al.*, (2018), observou-se que os corpos de prova com o cimento do tipo CPIII 40 RS (resistente a sulfato) submetidos à um processo de corrosão acelerada por meio de sulfato de magnésio, apresentaram uma coloração avermelhada mais intensa quando exposto à aspensão de fenoftaleína na ocasião em que foram comparadas com as amostras elaboradas com o cimento CPII 32. A fenoftaleína funciona como um indicador de pH, a região acometida pelo ataque de sulfato, apresenta aspecto incolor, enquanto a região não acometida possui aspecto rosado, conforme figura a seguir. A figura 12 mostra a relação entre a coloração do concreto, o seu pH e o risco de corrosão das armaduras.

Figura 12 - Efeitos do ataque de sulfatos.

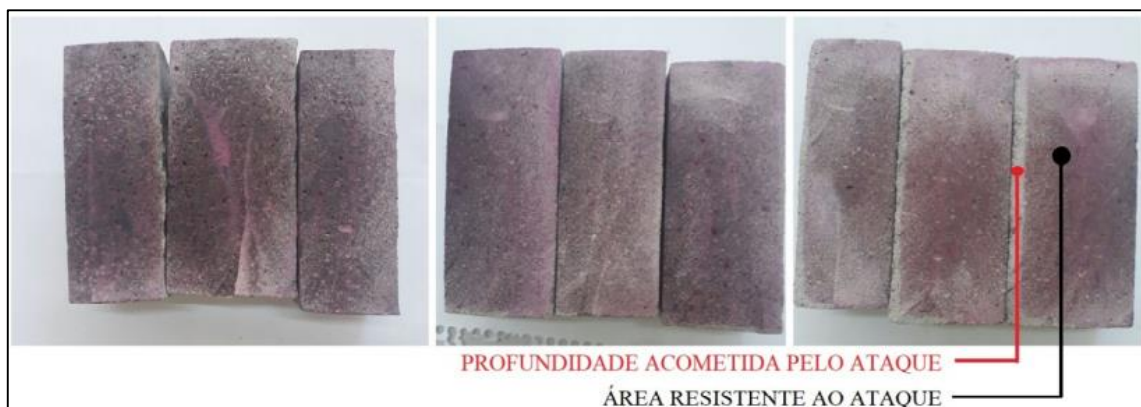
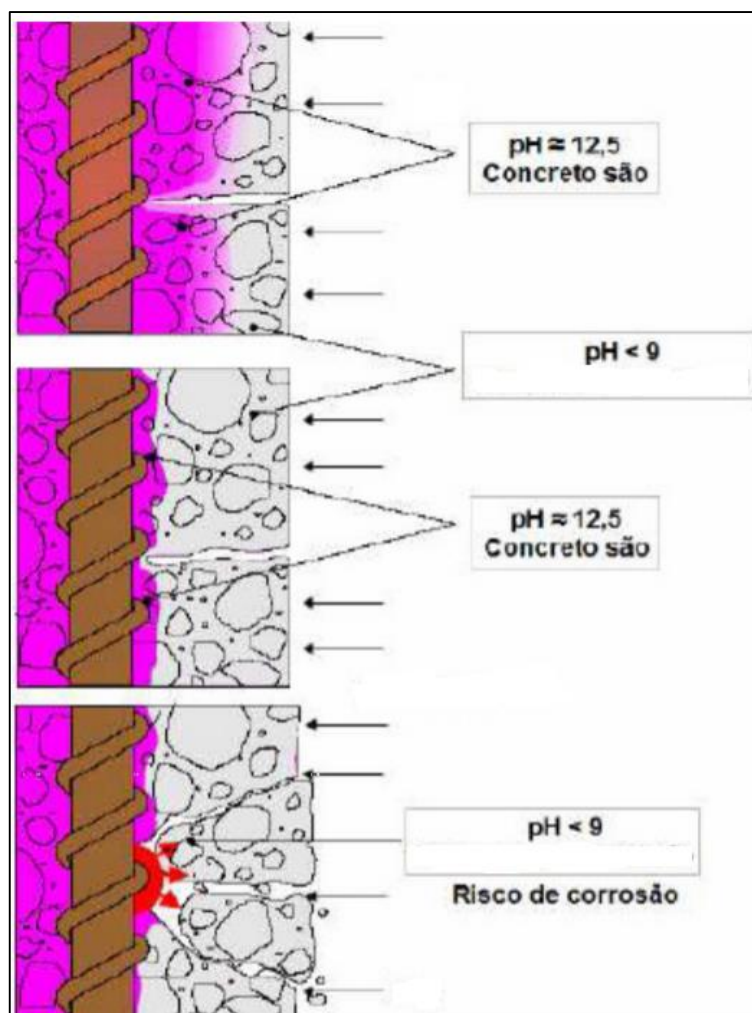
Fonte: Lima e Silva *et al.* (2018).

Figura 13 - Avanço dos sulfatos, indicada por teste químico via fenolftaleína.



Fonte: Adaptado de Santos (2014).

### 3.1.3 Condições de exposição em função da agressividade

Como já discutido, o concreto pode ser exposto a sulfatos de origem interna e externa. A fonte interna pode ser na mistura do concreto, como por exemplo na água de amassamento, nos agregados e nos aditivos (Amoudi *et al.*, 2002). De acordo com Chinchón *et al.*, (1995), as reações de oxidação dos sulfetos existentes no agregado fazem com que a água de amassamento torna-se ácida. Assim, existe a possibilidade de ocorrer a reação entre o ácido sulfúrico, não neutralizado pela cal livre do cimento, e o sulfato de ferro hidratado com a portlandita, originando como produto dessa reação a formação de etringita e gipsita.

Segundo os autores Vasquez *et al.*, (1984); Chinchón *et al.*, (1989); Martinez *et al.*, (1991); Chinchón *et al.*, (1995); e Bromley *et al.*, (1997), a oxidação de agregados com a presença de sulfetos manifesta-se nas estruturas de concreto por meio de desagregação, eflorescências, fissuras superficiais, deslocamento estruturais, alterações de coloração e intumescimento. A figura abaixo mostra o concreto das barragens Graus e Tabescán (Espanha) com a durabilidade comprometida pelo ataque de sulfatos.

Figura 14 - Formação de fases expansivas (gipsita e etringita tardia) no concreto de uma barragem. A figura da esquerda é a barragem Graus e a da direita é a Tabescán.



Fonte: Aguado *et al.*, (1993).

O ataque de sulfato externo pode ocorrer por meio do ciclo de molhagem e secagem em solução de sulfato, sob temperatura e umidade relativa cíclicas e imersão total numa solução de sulfato (NAJJAR *et al.*, 2017). A deterioração da massa cimentícia provocada pelo ataque depende da concentração da solução em

que o concreto está submetido, sendo o cátion associado ao  $SO_4^{-2}$  tem impacto na natureza e magnitude na deterioração do concreto (AMOUDI *et al.*, 2002). Os concretos inseridos no ambiente marinho, onde estão submetidos aos ciclos de molhagem e secagem pela zona de respingo e a zona de variação de maré, são atacados com mais agressividade. Segundo a NBR 12.655 (ABNT, 2015), o risco de deterioração da estrutura em ambientes submetidos à respingos de maré é elevado, sobretudo, quando exposto à solução de sulfato que acelera severamente a degradação do concreto (GAO *et al.*, 2013; YUAN *et al.*, 2016; JIANG e NIU, 2016).

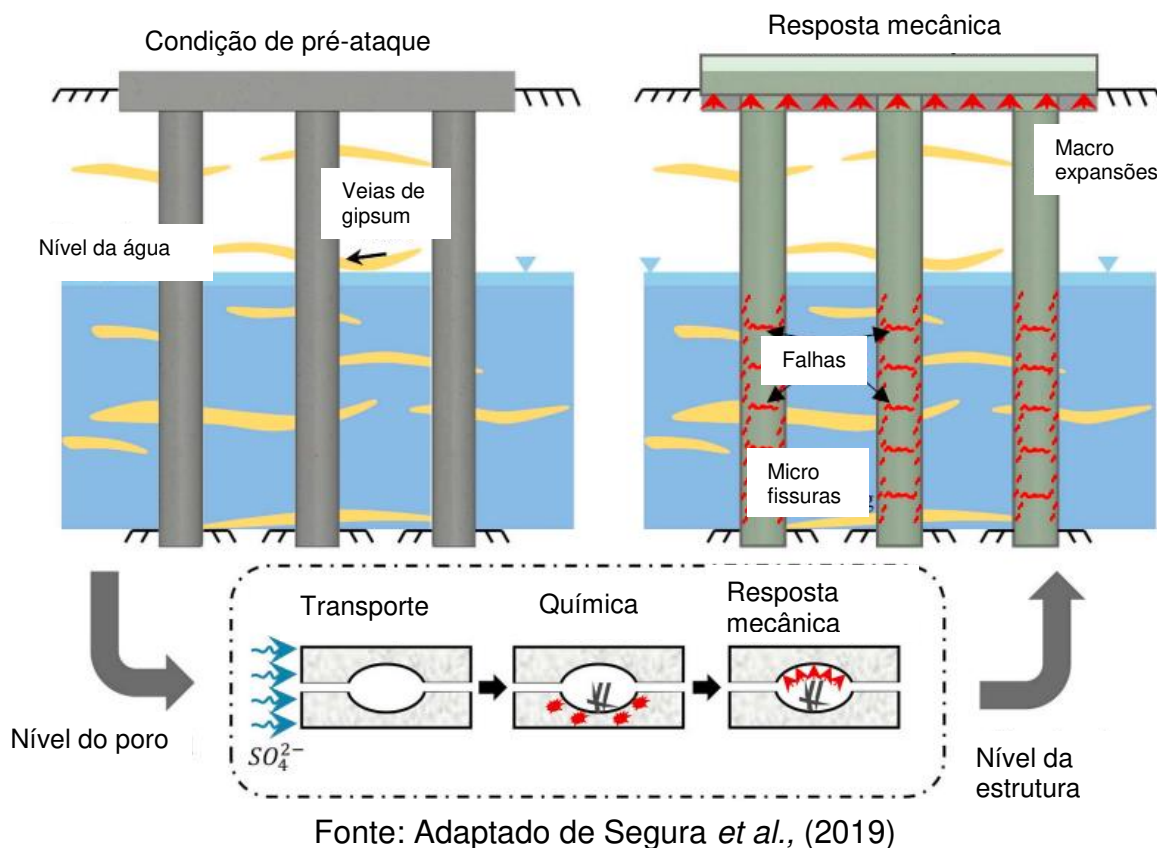
Segundo Shao *et al.*, (2020), nos ciclos de molhagem e secagem, quando acontece a evaporação, aumenta a concentração de sais bem como a pressão nos poros devido à cristalização, através de gradiente de umidade e a absorção por capilaridade (QI *et al.*, 2017), provocando o aumento da expansão e fissuração, resultando na deterioração acelerada do concreto (Shao *et al.*, 2020).

Rahman *et al.*, (2014) relatam que um ano de exposição acelerada do ciclo de molhagem e secagem causa deteriorações semelhantes em corpos de prova com oito anos de exposição contínua.

A figura a seguir ilustra o ataque em um grupo de estacas mostrando o antes e depois, sendo que este ataque pode ser dividido em quatro processos: transporte, reações químicas, forças expansivas e resposta mecânica.



Figura 15 - Representação esquemática do ataque de sulfatos externos.



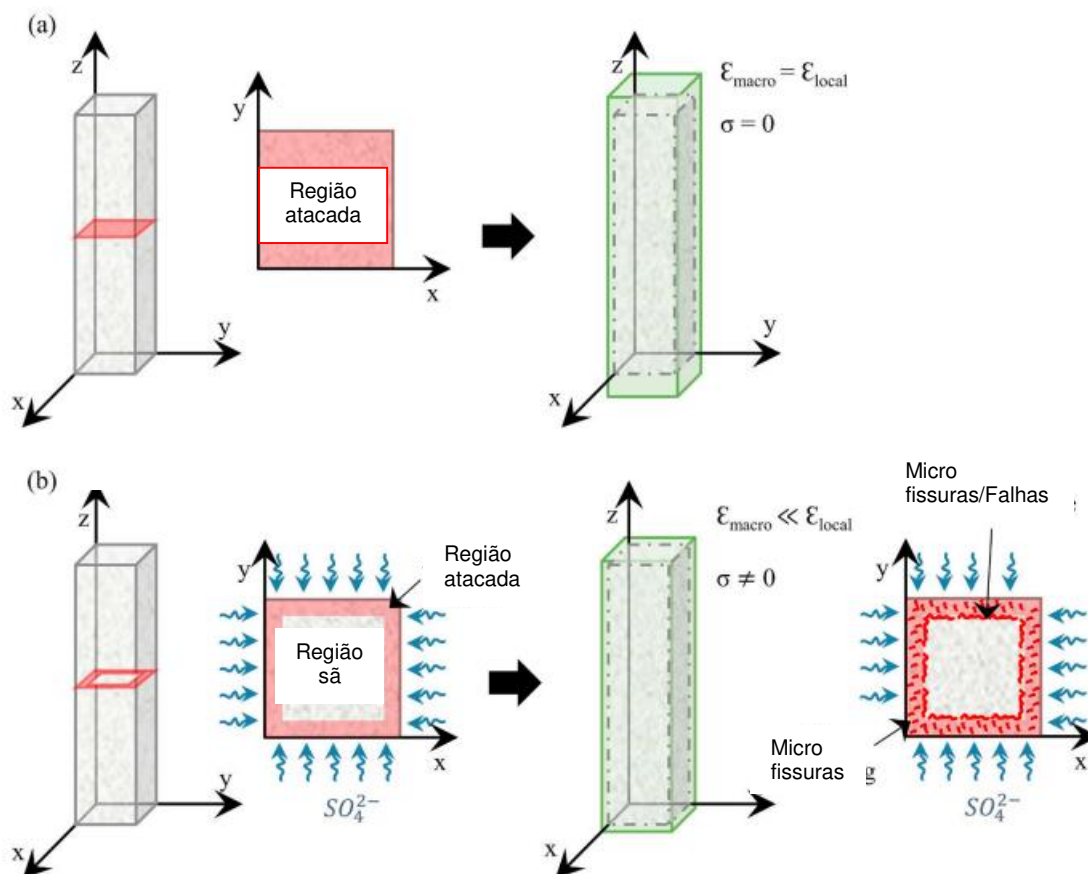
Segundo Najjar *et al.*, (2017), a exposição do concreto pode ser por meio de imersão total em solução de sulfato, ciclos de molhagem e secagem em solução de sulfato, ou imersão parcial, com umidade e temperaturas cíclicas.

Conforme Mosavi *et al.*, 2019; Ragoug *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2014, os ciclos de molhagem e secagem estão recebendo atenção de pesquisadores devido aos danos causados por este processo, porém, segundo Soliman *et al.*, 2014, não há um consenso sobre a contribuição dos danos físicos e químicos na degradação do concreto.

Segura *et al.*, (2019) mostram que se a forma de ataque externo de sulfatos fosse interna, iria afetar uniformemente a estrutura ou elemento, fazendo com que a deformação fosse por igual. Porém, no ataque externo a degradação progride gradualmente das camadas externas para as internas, à medida que os íons sulfatos vão penetrando e reagindo com os compostos da pasta de cimento

hidratada. Desta forma, ocorrem as fissuras no elemento atacado externamente por sulfatos, conforme demonstrado na figura a seguir.

Figura 16 - Elemento uniformemente atacado (a) e elemento sob o ataque externo de sulfatos (b).



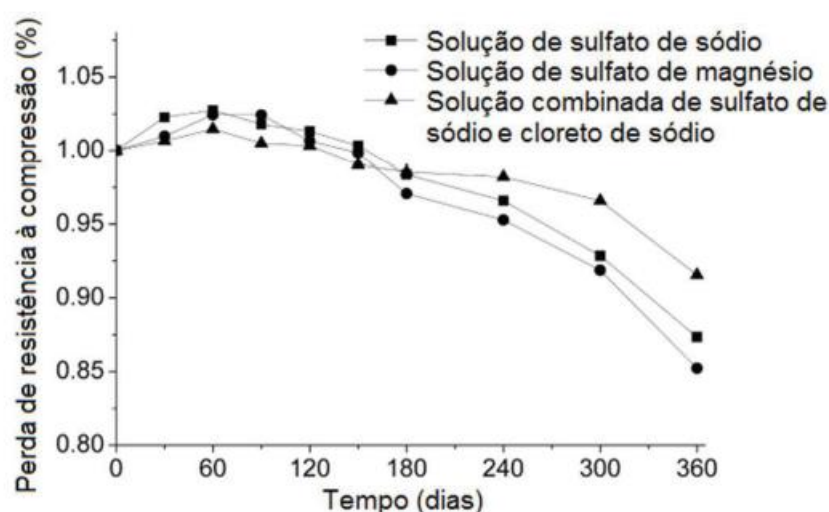
Fonte: Adaptado de Segura *et al.*, (2019).

A evolução dos danos causados pelo ataque de sulfatos tipicamente depende das propriedades (Scrivener *et al.*, 2015) do concreto e condições de exposição, tais como: temperatura (Thomas *et al.*, 2015), umidade (Liu *et al.*, 2015), condições de carregamento (Wang *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2017) e composição química da solução (Dulaijan, 2007).

### 3.1.4 Consequências mecânicas do ataque por sulfatos

Segundo Jiang e Niu (2016), o concreto exposto ao ataque de sulfatos apresenta três períodos, em ordem cronológica, em relação a resistência à compressão, são elas: período de acréscimo, período de redução e período acelerado de redução. Os pesquisadores relatam no trabalho que houve um aumento inicial nos primeiros 60 dias na resistência à compressão, mostrando um acúmulo nos poros. Depois desse período, a resistência vai decaindo progressivamente. Foi identificado que a resistência à compressão é reduzida em torno de 15% após 360 dias e, depois dos 180 dias, a degradação do concreto é acelerada, conforme figura abaixo. Os concretos foram moldados com 20% de cinza volante com a relação a/c de 0,45 e expostos a ciclos de molhagem e secagem com soluções com concentração em massa de sulfato de magnésio a 10%, de sulfato de sódio a 10% e solução de sulfato de sódio a 10% e cloreto de sódio a 3,5%.

Figura 17 - Efeito do ataque por sulfato pelo ciclo de molhagem e secagem na resistência à compressão

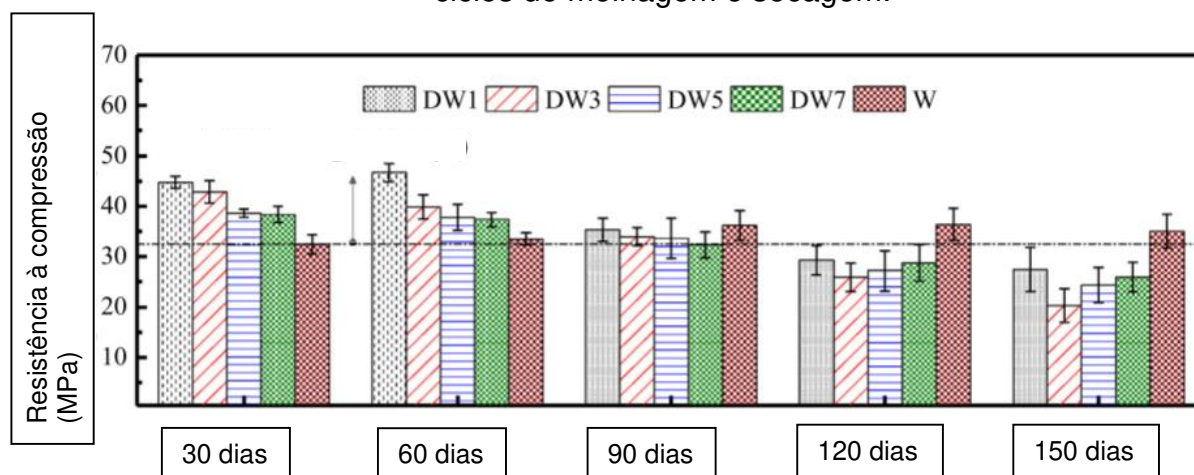


Fonte: Traduzido de Jiang e Niu (2016).

Wang *et al.*, (2020) realizaram um experimento com ataque acelerado com 5% de sulfato de sódio com diferentes ciclos de molhagem e secagem, sendo: 1:1, 3:1, 5:1, 7:1. A série de referência foi imersa na solução e não passou pelo ciclo de molhagem e secagem. O concreto foi elaborado com 20% de cinza volante e a relação a/c foi de 0,54. Os resultados encontrados pelos autores são mostrados na

figura abaixo. Nos primeiros 60 dias, a resistência à compressão aumentou significativamente, principalmente para as amostras submetidas aos ciclos mais longos. A resistência à compressão nas séries 3, 5 e 7 atingiram o maior valor aos 30 dias, e depois houve um declínio. A série de referência aumentou cerca de 2% devido à formação de gesso, etringita e ternadita nos poros, fazendo o refinamento dos mesmos, diminuindo a porosidade e melhorando a propriedade da estrutura.

Figura 18 - Resistência à compressão dos concretos submetidos à diferentes ciclos de molhagem e secagem.



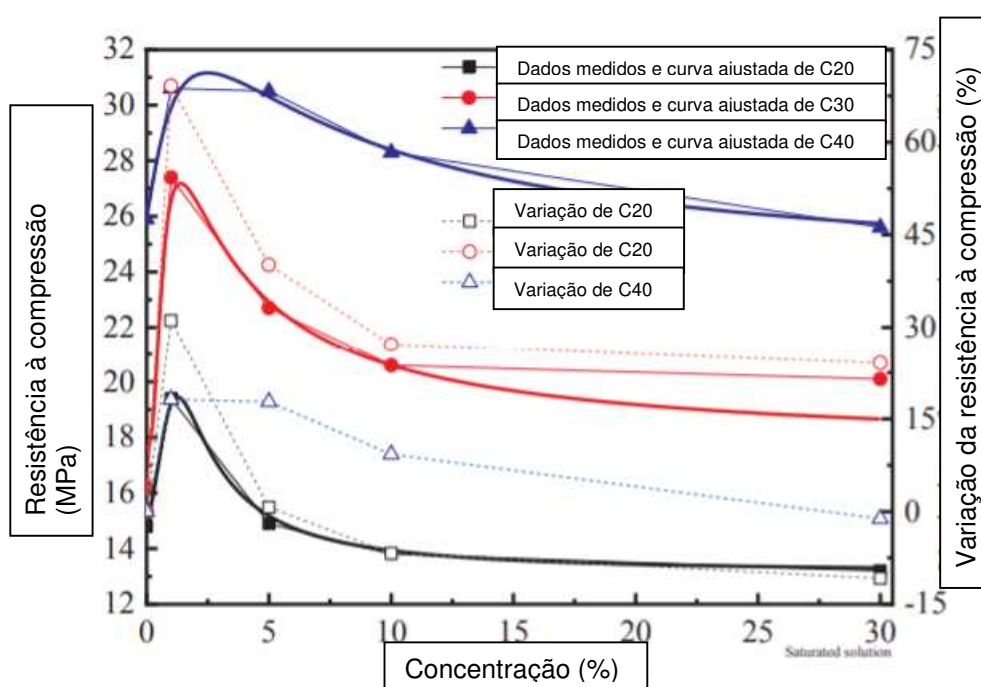
Fonte: Adaptado de Wang *et al.*, (2020).

Nos concretos imersos, o principal caminho do  $SO_4^{2-}$  para entrar na estrutura é por meio da difusão e penetração (Sun *et al.*, 2018). Já no ciclo de molhagem e secagem, existem dois processos, molhagem e secagem, quanto maior o tempo de molhagem ocorre com mais frequência a difusão, penetração, e além disso, a ação capilar Wang *et al.*, (2020). No processo de secagem, a solução interna evapora e os cristais de sulfatos dentro dos poros se precipitam e acumulam, fazendo com que o volume do poro aumente provocando expansão e fissuras. Essas fissuras, nos estágios iniciais, irão continuar se expandindo e conectando, tornando-se um canal de transmissão rápido dos íons (Wang *et al.*, 2020).

No estudo realizado por Liu *et al.*, (2020), os autores elaboraram concretos com três tipos de resistência à compressão, sendo: C20, C30 e C40. As amostras foram submetidas ao processo de semi-imersão, ou seja, a metade do corpo de prova ficou inserido na solução de sulfato de sódio e a outra metade exposta ao ar. Os ensaios foram realizados em dois e quatro meses. A resistência à compressão dos concretos aumentam, e depois diminuem com o acréscimo de concentração dos

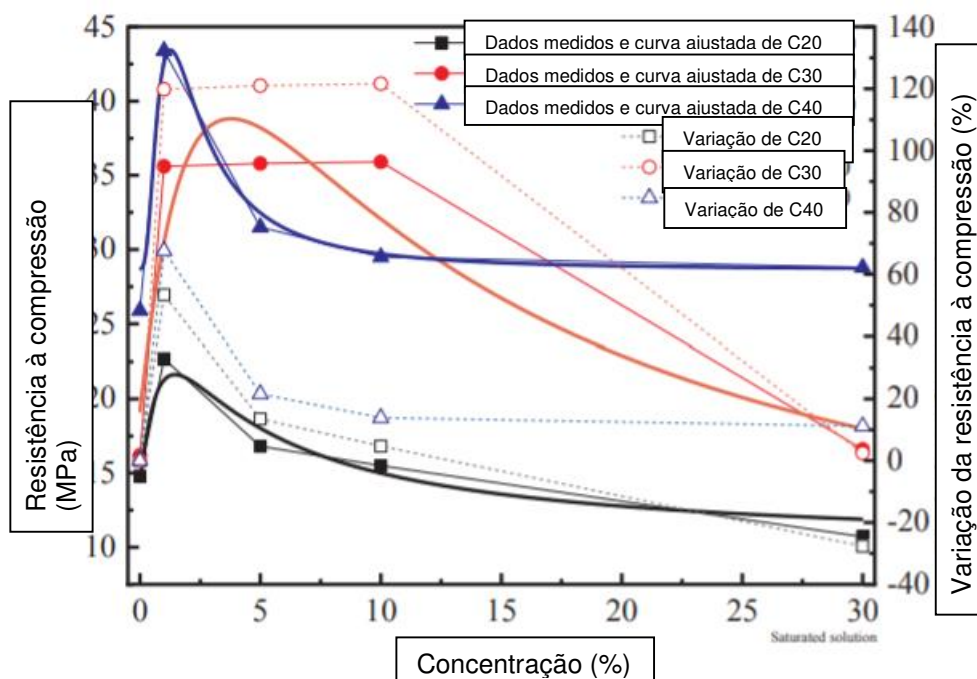
sulfatos, como mostrado nas figuras a seguir. Os corpos de prova com menor resistência têm uma mudança mais significativa na resistência à compressão, isto se deve ao fato de que há mais conectividade entre os poros, dessa forma, uma grande quantidade de íons sulfatos são inseridos no concreto reagindo com a portlandita, silicato de cálcio hidratado e com o aluminato de cálcio hidratado, afetando a durabilidade das amostras.

Figura 19 - Resistência à compressão em relação às diversas concentrações de sulfato de sódio em dois meses.



Fonte: Adaptado de Liu *et al.*, (2020),

Figura 20 - Resistência à compressão em relação às diversas concentrações de sulfato de sódio em quatro meses.



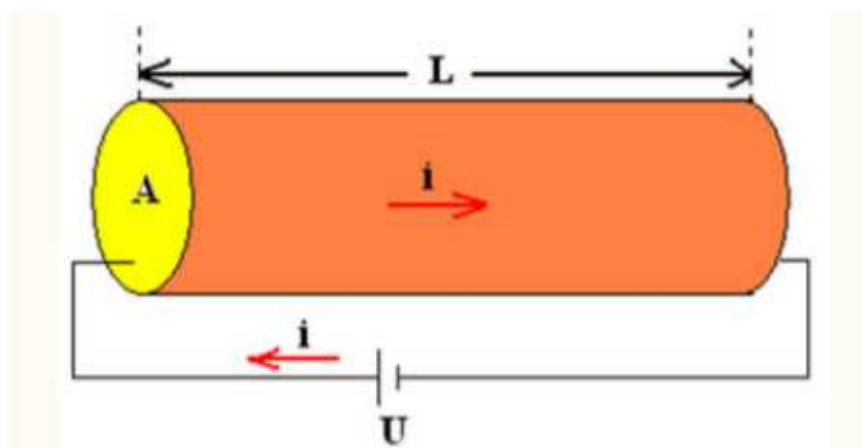
Fonte: Adaptado de Liu *et al.*, (2020),

Segundo Neville (2004), a presença de 1% de vazios no concreto diminui a resistência à compressão em 5,5%, e a mudança na resistência é um meio para se detectar o ataque de sulfatos. Na visão do autor, a ausência de redução na resistência à compressão indica que não houve ataque.

### 3.2 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é uma propriedade significativa do concreto que indica a sua capacidade de se opor a passagem da corrente elétrica (Santos, 2006). No geral, a resistividade elétrica do concreto pode ser descrita como a capacidade do concreto de suportar a transferência de íons submetidos a um campo elétrico (Layssi *et al.*, 2015), conforme demonstrado na figura 21. Assim, é possível quantificar de alguma forma as propriedades condutoras da microestrutura do concreto (Layssi *et al.*, 2015).

Figura 21 - Passagem da corrente elétrica no material.



Fonte: Silva, 2015.

A resistividade elétrica ( $\rho$ ) é uma grandeza física que caracteriza uma propriedade intrínseca de um material. Pode-se se dizer que é o inverso da condutividade elétrica ( $\sigma$ ) (Giroto e Santos, 2002), conforme equação 3. Segundo Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de medida da resistividade elétrica são  $\Omega.m$  (ohm vezes metro).

$$\rho = 1/\sigma \quad \text{Equação (3)}$$

A resistividade elétrica está vinculada com a resistência ao fluxo de corrente elétrica por um material, segundo equação 4.

$$R = \rho \cdot l/A \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$R$  = Resistência elétrica do material ( $\Omega$ );

$\rho$  = Resistividade elétrica do material ( $\Omega.m$ );

$l$  = Comprimento do material (m);

$A$  = Área da seção transversal do material ( $m^2$ ).

Desse modo, a resistividade do material é proporcional a resistência a passagem da corrente elétrica, ou seja, quanto maior a resistividade, maior será a resistência por ele a uma determinada fluxo elétrico (Vilatte, 2012).

Cada material tem a sua própria resistividade elétrica de acordo com a sua natureza. Os valores da resistividade podem ser caracterizados como: isolante, semicondutor e condutor.

A tabela 8, mostrada a seguir, indica os valores da resistividade elétrica para diversos materiais.

Tabela 7 - Valores de resistividade elétrica na temperatura de 20°C.

	<b>Substância</b>	<b><math>\rho</math> (<math>\Omega.m</math>)</b>
<b>Condutores</b>	Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$
	Alumínio	$2,75 \times 10^{-8}$
	Aço	$20,0 \times 10^{-8}$
<b>Semicondutores</b>	Carbono puro (Grafita)	$3,5 \times 10^{-5}$
	Germânio puro	0,60
	Silício puro	2300
<b>Isolantes</b>	Vidro	$10^{10} - 10^{14}$
	Madeira	$10^8 - 10^{11}$

Fonte: Young (2009).

Pode-se dizer que a condutibilidade elétrica nos concretos é profundamente variável com a sua composição e, principalmente, com a umidade (BAUER, 2019), tendo em vista a boa correlação entre ambos (Nguyen, 2017). Segundo Ghosh (2015), as aferições da resistividade elétrica têm a interferência de diversos fatores: evolução de atividade pozolânica e carbonatação e grau de hidratação; quantidade e funcionalidade de aditivos e adições minerais e; composições do cimento.

As características microestruturais do concreto estão ligadas diretamente com a durabilidade do mesmo, por isso a resistividade elétrica é uma característica significativa na avaliação da corrosão das armaduras (AGUIAR, 2018). A resistividade reproduz a corrente elétrica entre as regiões anódicas e catódicas (Hornbostel *et al.*, 2013). Além disso, segundo Cascudo (1997), a entrada de oxigênio à armadura junto com a resistividade elétrica do concreto estabelecem como dois principais componentes para regular o processo eletroquímico que forma a corrosão.



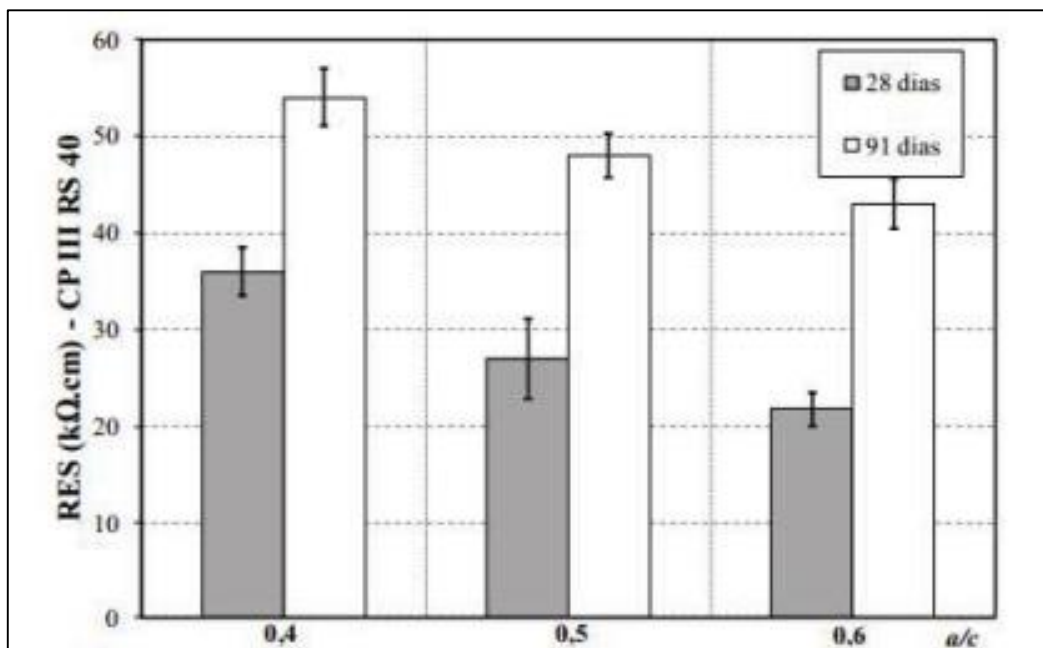
### **3.2.1 Influência dos parâmetros na medição da resistividade elétrica superficial do concreto**

A resistividade elétrica superficial do concreto é uma propriedade muito susceptível aos aspectos microestruturais da matriz cimentícia, como por exemplo, a sua composição química, a estrutura dos poros, o ambiente o qual está inserido e a solução existente nos mesmos. Segundo Santos (2006), estes são os fatores que influenciam nos valores da resistividade elétrica: a relação água/cimento ( $a/c$ ), hidratação da pasta cimentícia, carbonatação e as adições minerais constituintes do concreto.

#### **3.2.1.1 Relação água/cimento**

A relação água/cimento está relacionada com a estrutura porosa da pasta de cimento. Segundo Santos (2006), a resistividade elétrica será mais baixa quanto maior for a quantidade de água em relação ao aglomerante, tendo em vista a maior quantidade de poros e as ligações entre eles. Medeiros *et al.*, 2014, relatam que a solução existente nos poros atua como um condutor elétrico na estrutura interna do concreto. Assim, uma maior concentração de água no interior do concreto juntamente com a sua permeabilidade, ambos aspectos provocados pela alta relação água/cimento, favorecem o crescimento da condutividade elétrica na parte interna do concreto, conseqüentemente, sucede em menores valores de resistividade elétrica, ou seja, a resistividade elétrica diminui conforme a relação água cimento aumenta.

Figura 22 - Mostra a resistividade elétrica de acordo com a relação água/cimento.



Fonte: Medeiros *et al.*, (2014).

Van Noort *et al.*, (2016) obtiveram o mesmo resultado, concluindo que a alta resistividade corresponde a baixos valores da relação água/cimento.

### 3.2.1.2 Hidratação da pasta de cimento

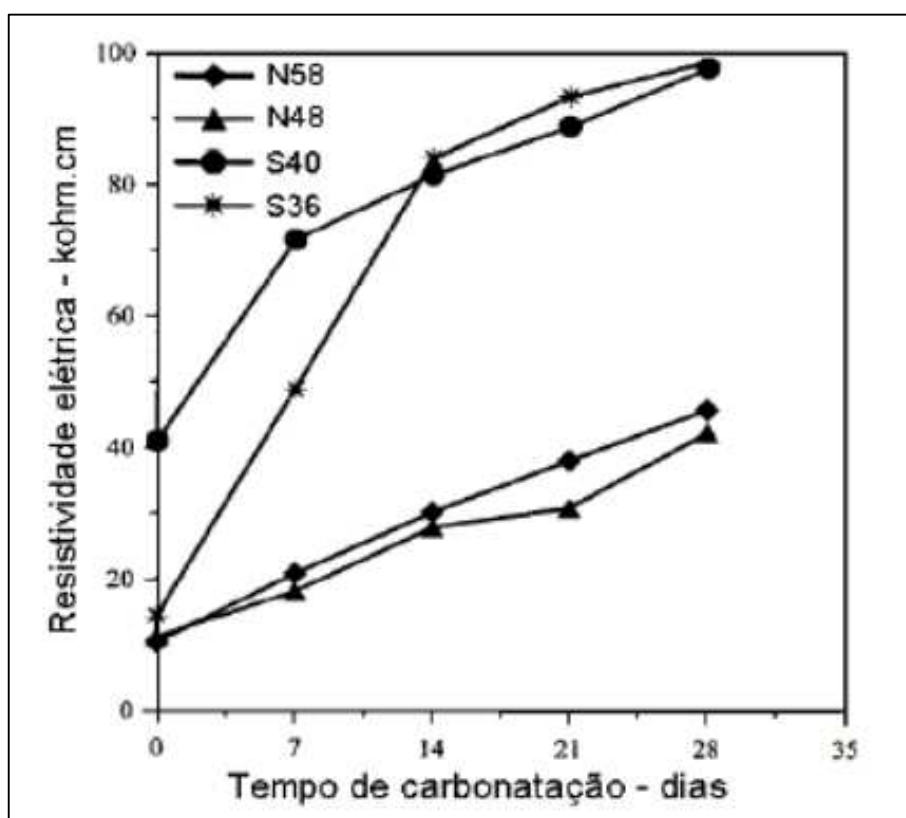
Durante a mistura do cimento com a água, ocorre uma reação química denominada hidratação da pasta de cimento, sucedendo em produtos que apresentam características de pega e endurecimento. Segundo Metha e Monteiro (2008), ao longo desse processo de endurecimento, as reações químicas fazem com que haja o preenchimento dos espaços vazios da pasta de cimento, ocasionando uma diminuição da permeabilidade e da porosidade, e aumentando a resistência do material.

De acordo com Medeiros *et al.*, (2016), de uma maneira geral, com as reações de hidratação e endurecimento do cimento, a resistividade elétrica tende a crescer no decorrer do tempo.

### 3.2.1.3 Carbonatação

Segundo Chi *et al.*, (2002), a carbonatação provoca o aumento do volume sólido do concreto, reduzindo a porosidade do mesmo. Desta forma, isto explica o aumento da resistividade elétrica. A figura abaixo mostra os efeitos da carbonatação em relação à resistividade elétrica para vários tipos de concreto.

Figura 23 - Efeitos da carbonatação em relação à resistividade elétrica para vários tipos de concreto.



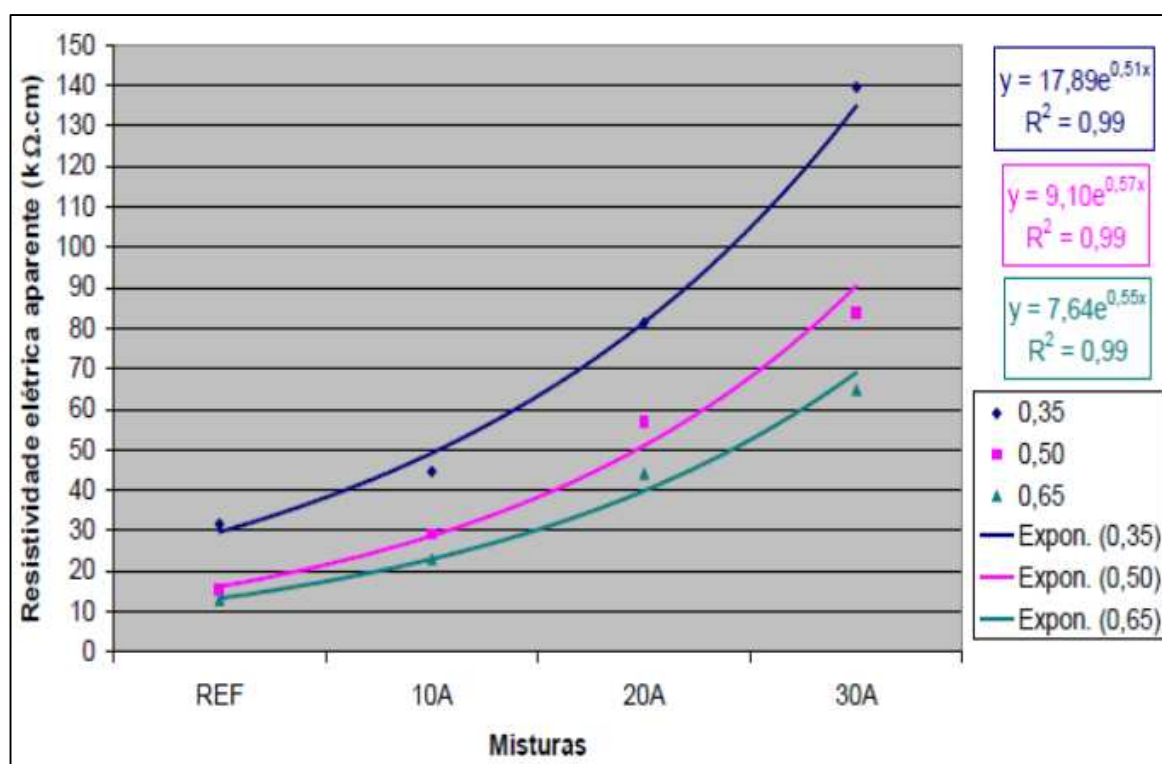
Fonte: Chi *et al.*, (2002).

### 3.2.1.4 Adições Minerais

Ghosh *et al.*, (2015) estudaram a relação entre a resistividade elétrica e o uso de adições minerais. Neste estudo foi analisado vinte e três misturas com diferentes tipos de adições de sílica ativa, metacaulim e cinza volante. O experimento teve como resultado a diminuição da porosidade e da permeabilidade devido à utilização das adições, resultando no aumento dos valores da resistividade elétrica.

O efeito da adição de cinza casca de arroz foi analisado por Hoppe (2005). Em seu experimento, foi verificado um crescimento exponencial entre 0% e 30% de substituição nas medições da resistividade, conforme figura abaixo. Isto ocorreu devido ao refinamento dos poros e da menor condutividade elétrica da solução dentro dos poros conforme a substituição fosse aumentando.

Figura 24 - Mostra a variação da resistividade elétrica com a substituição da cinza casca de arroz.



Fonte: Hoppe (2005).

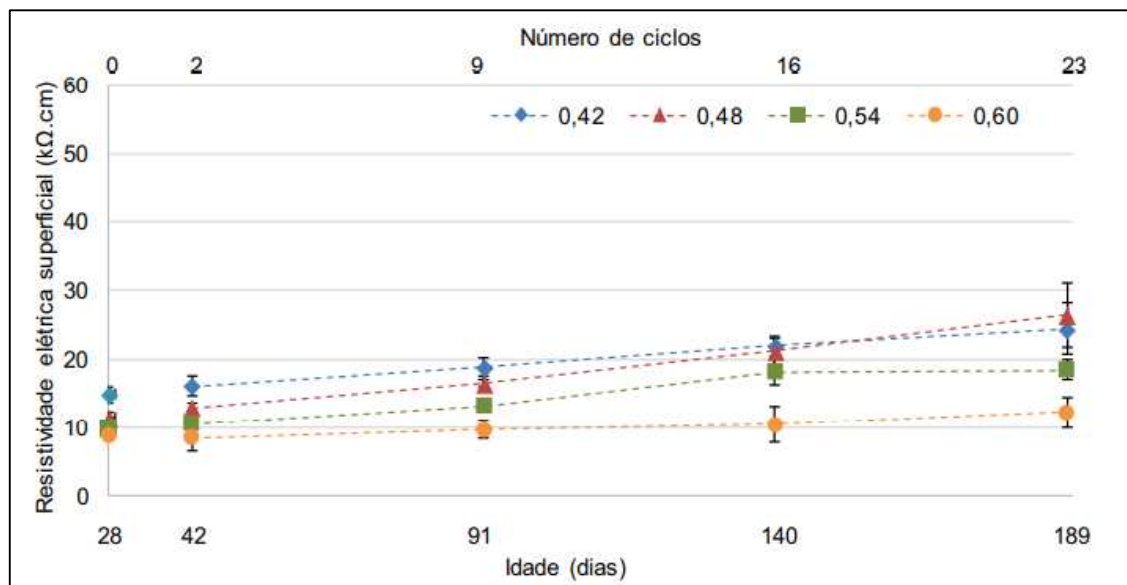
Agora, serão apresentadas pesquisas específicas relacionadas à resistividade elétrica do concreto submetido ao ataque de sulfatos.

Gans (2017) fez a cura úmida dos corpos de prova durante 28 dias e colocou-os expostos ao ciclo de molhagem e secagem em solução de sulfato. Na moldagem do concreto foram adotadas quatro diferentes relações a/c: 0,42, 0,48, 0,54 e 0,60.

Foi adotado um ciclo de 7 dias, sendo 4 dias consecutivos para secar ao ar e 3 dias seguidos ininterruptos de imersão em solução. Este ciclo foi determinado para que no final dos 7 dias os corpos de prova estivessem saturados, por isso, no final das idades pré-selecionadas, 42, 91, 140 e 189 dias - múltiplos de 7-, os mesmos estariam saturados, conforme estabelece as normas NBR 5739 (ABNT, 2007) e UNE 83988-2 AENOR (2014) *apud* Gans (2017). A condição de exposição do concreto ao sulfato foi baseada nos estudos realizados por Gao *et al.*, (2013), Pradhan (2014), Chen *et al.*, (2016) e Chiker *et al.*, (2016). A concentração da solução foi de 5% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

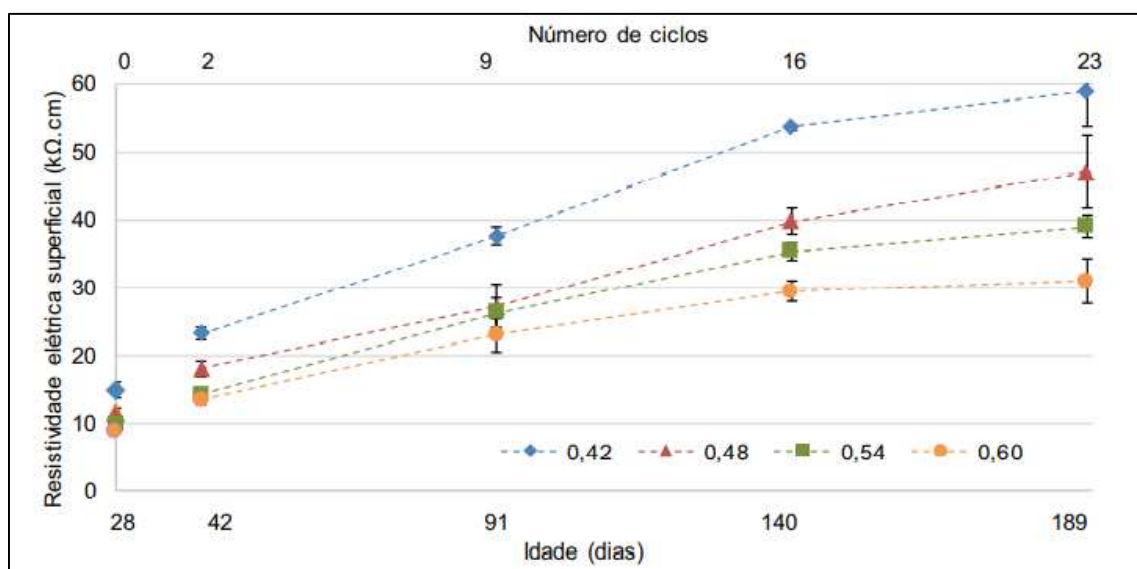
A resistividade elétrica superficial (RES) foi auferida após três dias de imersão. No gráfico a seguir, foi realizada uma média de três medidas para cada ponto no gráfico, sendo a medição realizada em três eixos do corpo de prova. Aos 28 dias, foi realizado uma leitura da resistividade elétrica superficial antes de colocar os corpos de prova expostos a solução de sulfatos.

Figura 25 – Resultados de resistividade elétrica superficial para condição de ciclos de molhagem e secagem com solução de sulfatos.



Fonte: Gans (2017).

Figura 26 - Resultados de resistividade elétrica superficial para condição de ciclos de molhagem e secagem com solução em água.



Fonte: Gans (2017).

Como resultado, verificou-se que há um aumento da resistividade elétrica superficial, porém em menor quantidade se comparado com as condições de referência, que são corpos de prova com ciclos de molhagem e secagem em água. Tanto a idade de medição quanto a condição de exposição do concreto impactam significativamente nos valores de RES, quando não exposto a agentes agressivos.

O principal fenômeno de deslocamento de eletricidade do concreto é a condução iônica (ou eletrolítica), e o comportamento da RES mudou com os íons  $Na^+$  e  $SO_4^{2-}$  nas soluções dos poros, quando comparado com a condição de referência.

Medeiros *et al.*, (2017) fizeram um experimento com cinco corpos de prova (10x20 cm), para cada idade estudada, 28 e 56 dias, com o fator a/c 0,58. A avaliação comportamental foi na substituição do agregado miúdo por sulfato de sódio com o intuito de simular a contaminação no agregado do concreto. Os teores de contaminação e proporções estudadas estão descritos na tabela abaixo.

Figura 27 - Teores de contaminação e proporções estudadas.

% NaSO <sub>4</sub>	a/c	CP V ARI (kg)	Sulfato de Sódio (g)	Areia (kg)	Brita 01 (kg)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
0	0,58	1,00	-	2,70	3,20	309,70
0,74	0,58	1,00	43,58	2,66	3,20	309,70
1,48	0,58	1,00	87,47	2,62	3,20	309,70
7,44	0,58	1,00	442,72	2,31	3,20	309,70

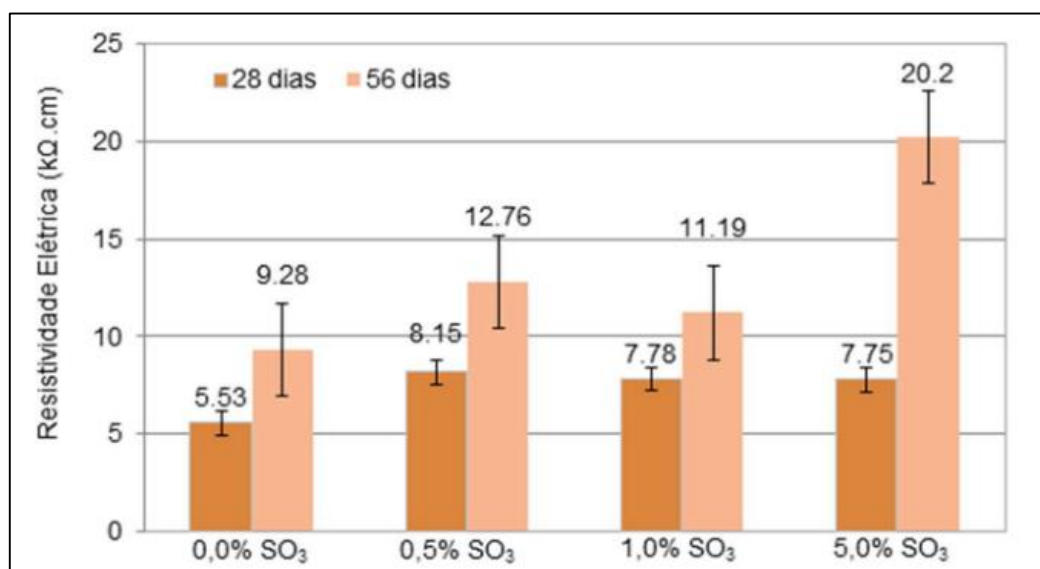
Fonte: Medeiros *et al.*, (2017).

Foi utilizado o ciclo semanal de molhagem e secagem, após o período de cura, entre câmara úmida e câmara seca. Este processo teve como base a metodologia de outros autores, como Gao *et al.*, (2013), Gong *et al.*, (2016), Jiang e Niu (2016) e Capraro *et al.*, (2017). A análise comparativa foi realizada aos 56 dias.

A resistividade elétrica foi auferida pelo método de Wenner, utilizando o fator forma de 0,377, conforme recomenda a norma espanhola UNE 83988-2 de 2012, tendo em vista que o ensaio é realizado em corpos de prova cilíndricos. As leituras das resistividades elétricas foram consideradas válidas quando os valores individuais não ultrapassavam em 10% o valor da média, obtendo assim, a média final dos valores individuais válidos para cada idade do concreto.

Como resultado, observou-se que o traço de referência – com zero por cento de contaminação – apresentou valores mais baixos de resistividade, ou seja, os corpos de prova contaminados mostraram maior dificuldade de passagem de corrente elétrica, provavelmente pelo efeito químico da solução. Segundo Biczók (1972) e Ouyang *et al.*, (2014), que estudaram o ataque externo de sulfato de sódio, isto acontece devido às reações de sulfatos que preenchem os poros com cristais, ampliando a sua capacidade. No entanto, Medeiros *et al.*, (2017) utilizando concomitantemente o ensaio de ultrassom, sinaliza o aumento de vazios no concreto, sugerindo um aumento na resistividade por efeitos químicos e não físicos, possivelmente uma solução presente nos poros dos concretos contaminados ajudou para que estes se tornassem mais resistentes. A seguir a tabela com a resistividade elétrica aos 28 dias (condição de cura em câmara úmida) e aos 56 dias (condição de ciclagem semanal).

Tabela 8 - Resistividade elétrica dos corpos de prova contaminados e o de referência.



Fonte: Medeiros *et al.*, (2017).

Em outro estudo realizado por Medeiros *et al.*, (2017), realizaram um experimento com corpos de prova nas seguintes idades: 84, 168 e 360 dias. Foram utilizadas quatro séries, uma sem contaminação e as outras três com a substituição parcial do agregado miúdo por  $SO_3$ , sendo 0,5%; 1,00%; 5,00%.

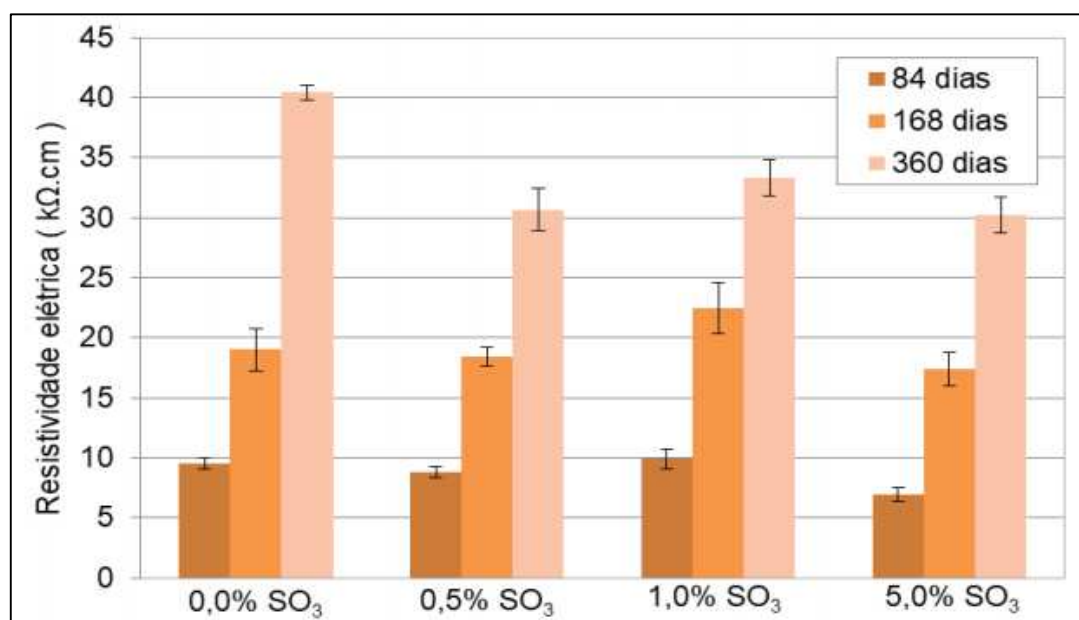


Os corpos de prova foram mantidos em cura úmida saturada com cal até os 28 dias. Depois, para aumentar o processo de degradação, foi realizado um procedimento semanal de aplicação alternada com padrões ambientais diferentes sobre os materiais.

Esses padrões ambientais são um tanque com solução aquosa aerada constantemente por sistema de borbulhamento e uma câmara seca com a umidade relativa de  $55 \pm 5$  % com uma temperatura média de  $(23 \pm 2)$  °C. Esses processos foram alternados a cada semana.

A resistividade elétrica foi aferida pelo método de Wenner, utilizando o fator forma de 0,377, conforme recomenda a norma espanhola UNE 83988-2 de 2012. Estas foram consideradas válidas quando os valores individuais não ultrapassavam em 10% o valor da média. Os resultados obtidos estão descritos na tabela abaixo e foram tratados estatisticamente por meio do teste de Tukey, com 95% de confiança.

Tabela 9 - Resistividade elétrica do concreto das séries nas três idades estudadas (condição acelerada de molhagem e secagem).



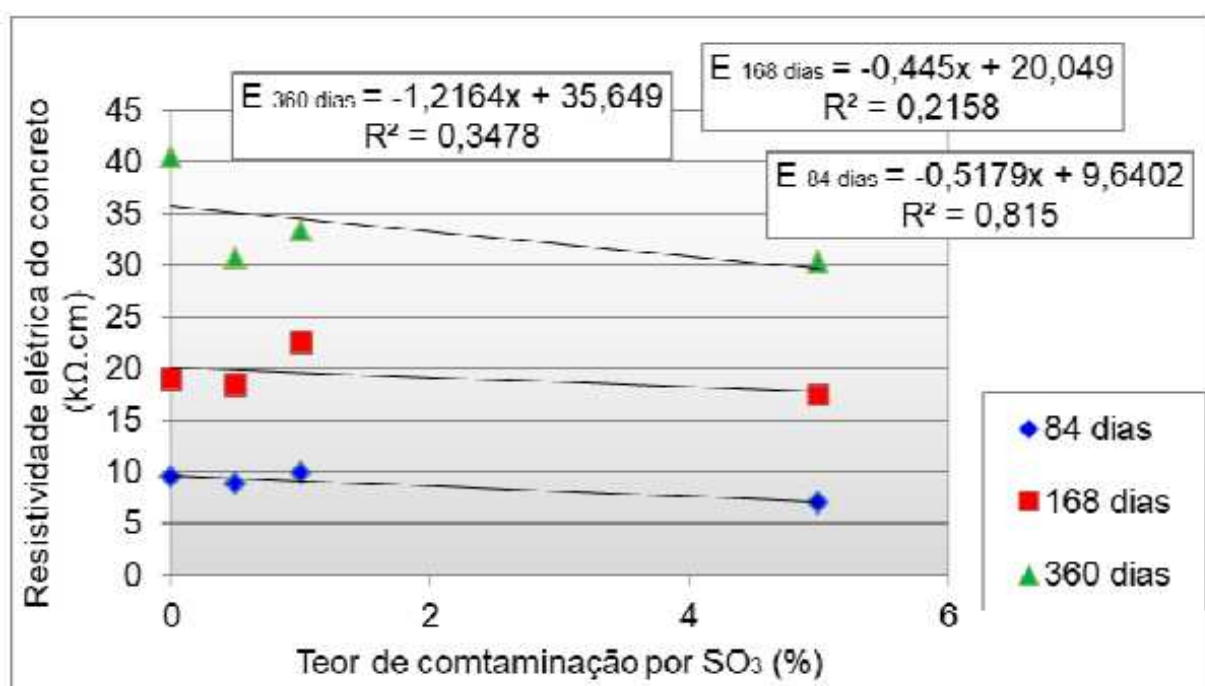
Fonte: Medeiros *et al.*, (2017).

Em análise da tabela acima, constatou-se que aos 84 dias o ensaio contendo a maior contaminação, 5,0% de SO<sub>3</sub>, apresentou valores inferiores estatisticamente. Aos 168 dias, a amostra 1,0% de SO<sub>3</sub> apresentou maiores valores, sendo que as demais foram consideradas iguais estatisticamente. Por último, aos 360 dias, a

série de referência demonstrou a maior resistividade elétrica, e as demais puderam ser consideradas equivalentes estatisticamente.

Outra verificação realizada para analisar a efetividade dos ensaios com os corpos de prova contaminados foi a realização da correlação linear entre os resultados dos ensaios de resistividade elétrica nas idades estabelecidas e o teor de contaminação, conforme tabela a seguir.

Tabela 10 - Resultados estatísticos da correlação entre o ensaio de resistividade elétrica e os teores de contaminação empregados.



Fonte: Medeiros *et al.*, (2017).

Observou-se que a maior correlação aconteceu aos 84 dias, e para as demais idades foram consideradas baixas. Notou-se, também, que com o aumento do teor de contaminação a resistividade elétrica diminuía, indicado pelo coeficiente angular negativo.

Como resultado, na idade de 84 dias e com o método de envelhecimento estudado, o método da resistividade elétrica é capaz de diferenciar os corpos de prova contaminados em relação à referência, tendo em vista o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) igual a 0,815. Ademais, pelas diferenças estatísticas encontradas em outras idades, a referida técnica não é capaz de auferir efeitos

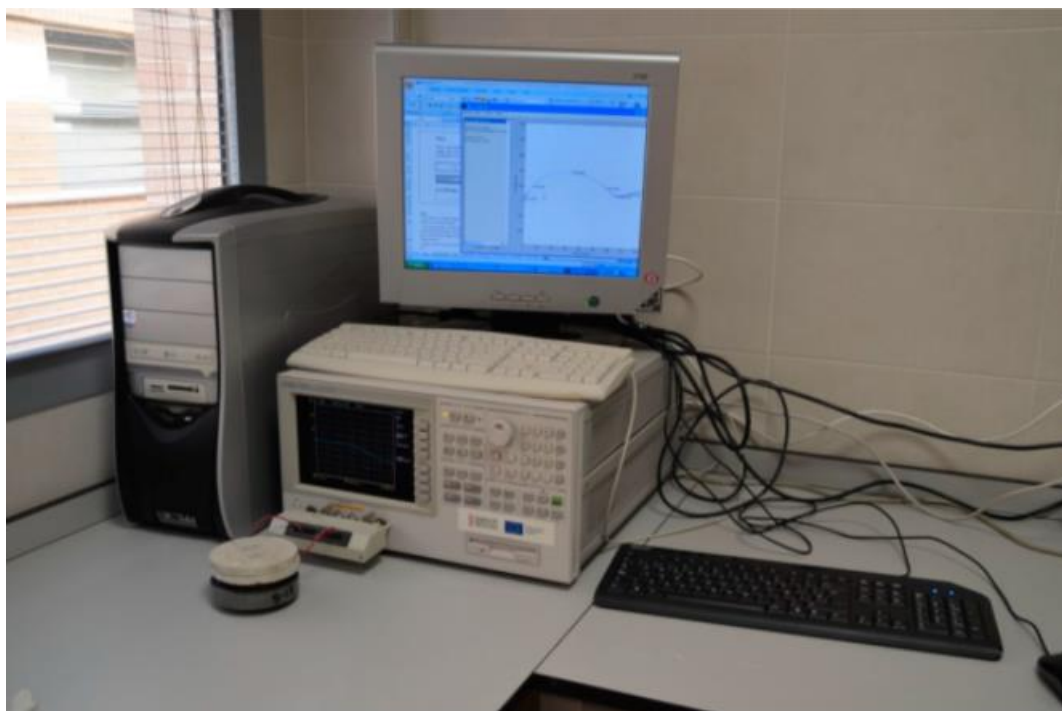
deletérios nos corpos de prova pelos contaminantes, seus teores adicionados, pelo tempo e tipo de envelhecimento adotado.

Ortega *et al.*, (2017) realizaram testes com argamassas com porcentagens diferentes de sílica ativa utilizando um cimento de alta resistência inicial, denominado CEM I 42.5 R. Foram elaboradas três séries, sendo: uma com 0% de sílica ativa (referência); outra com 5% de sílica ativa e; a última série com 10% de sílica ativa.

Os corpos de prova elaborados tinham a seguinte medida: 7,5x30 cm. As amostras foram curadas por 7 dias em câmara com temperatura e umidade controladas a 20 ° C e 95% de umidade relativa (UR). Em seguida, foram submetidos às soluções de sulfatos. Estas últimas eram compostas pelos seguintes elementos: 15% de sulfato de magnésio (MgSO<sub>4</sub>); 15% de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e; uma solução mista de 7,5% sulfato de magnésio e 7,5% de sulfato de sódio. As soluções foram trocadas uma vez durante o período de teste (após 45 dias de exposição) para manter uma concentração suficientemente alta de sulfatos nas soluções.

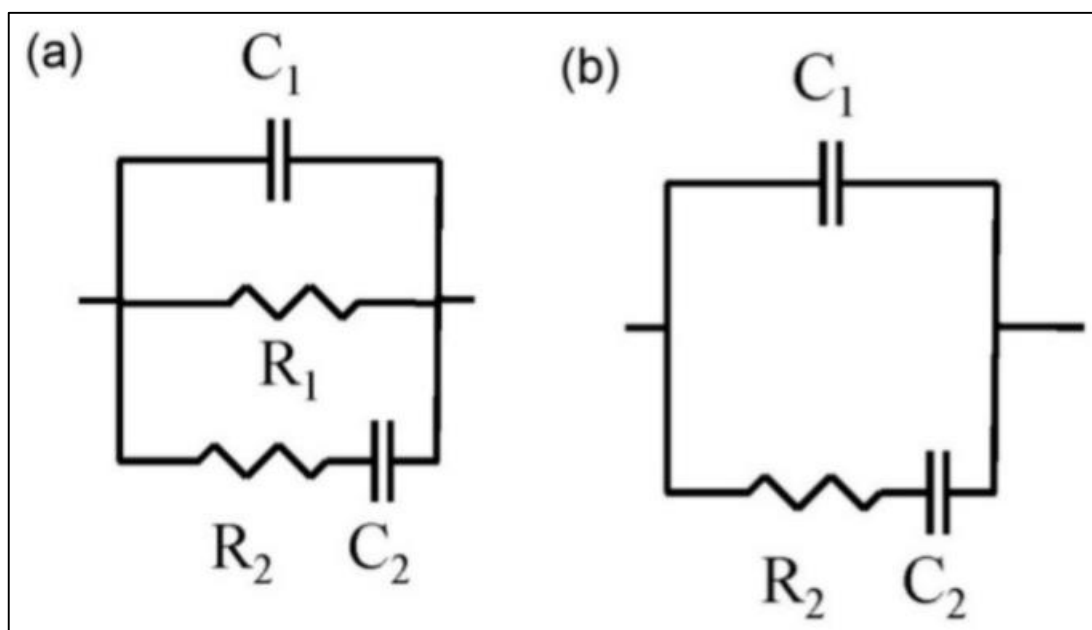
A resistividade elétrica superficial foi auferida pelo kit portátil *Torrent Permeability Tester*, Proceq. Foi utilizado o método de quatro eletrodos "Wenner" nas amostras, vide figura 30. O ensaio da resistividade elétrica foi relacionado com a espectroscopia impedância. O potencial foi aplicado nas amostras cilíndricas saturadas de 2 cm de altura imediatamente após sua remoção da solução e secagem superficial. O equipamento utilizado, figura a seguir, para aplicar o potencial, foi empregado um analisador de impedância capaz de realizar medições de capacitância na faixa de  $10^{-14}$  – 0,1 F, com resolução máxima de  $1 \times 10^{-15}$  F. Os circuitos equivalentes, figura 29, utilizados foram os propostos por Cabeza *et al.*, (2002).

Figura 28 - Equipamento de medição de impedância.



Fonte: Cabeza *et al.* (2002).

Figura 29 - (a) Circuito equivalente usado para o ajuste dos espectros de impedância obtidos pelo método de contato. (b) Circuito equivalente usado para o ajuste dos espectros de impedância obtidos usando o método sem contato.



Fonte: Cabeza *et al.* (2002).

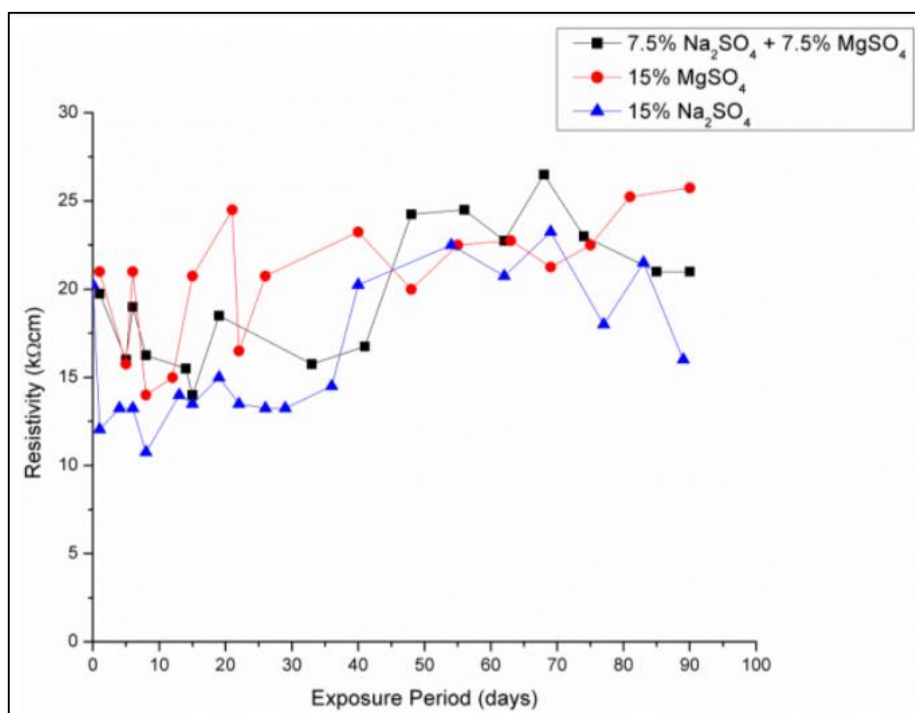
Figura 30 - Medição de resistividade elétrica de uma amostra de sílica ativa a 10% feita usando o método de quatro eletrodos “Wenner”.



Fonte: Cabeza *et al.* (2002).

Os resultados das amostras com 0% de sílica ativa são demonstrados na figura 31 abaixo. Foi identificado que a resistividade aumentou para a maioria dos corpos de prova.

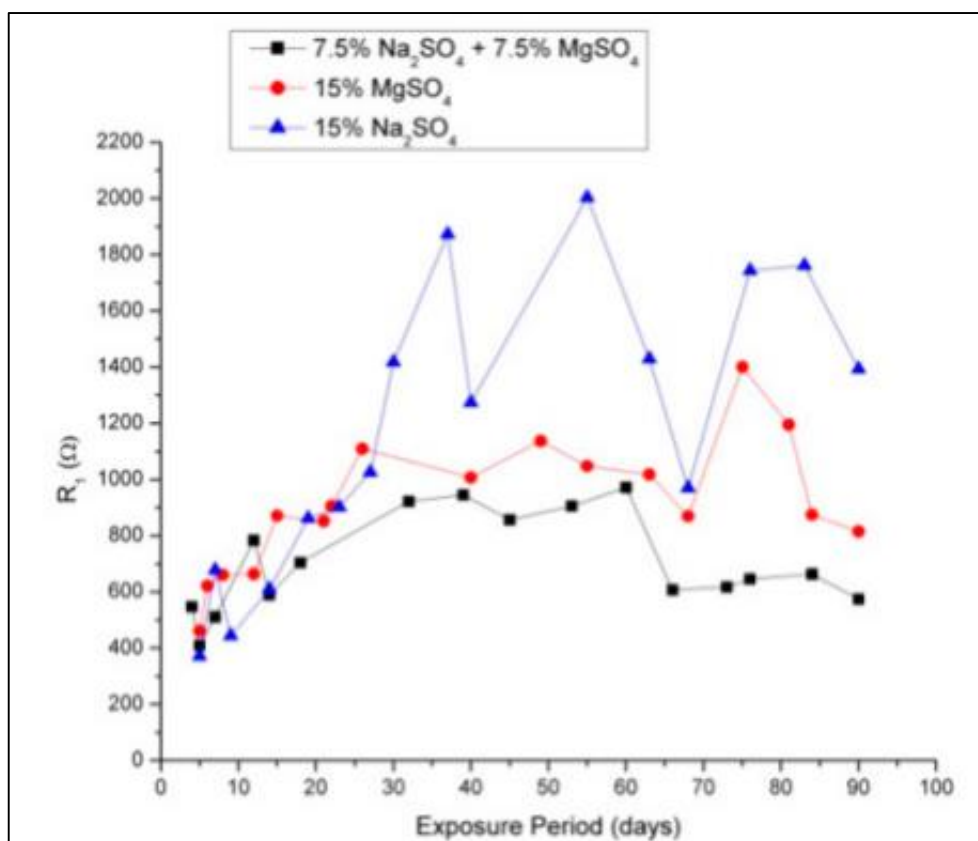
Figura 31 - Variação da resistividade em argamassas contendo 0% de sílica ativa.



Fonte: Cabeza *et al.*, (2002).

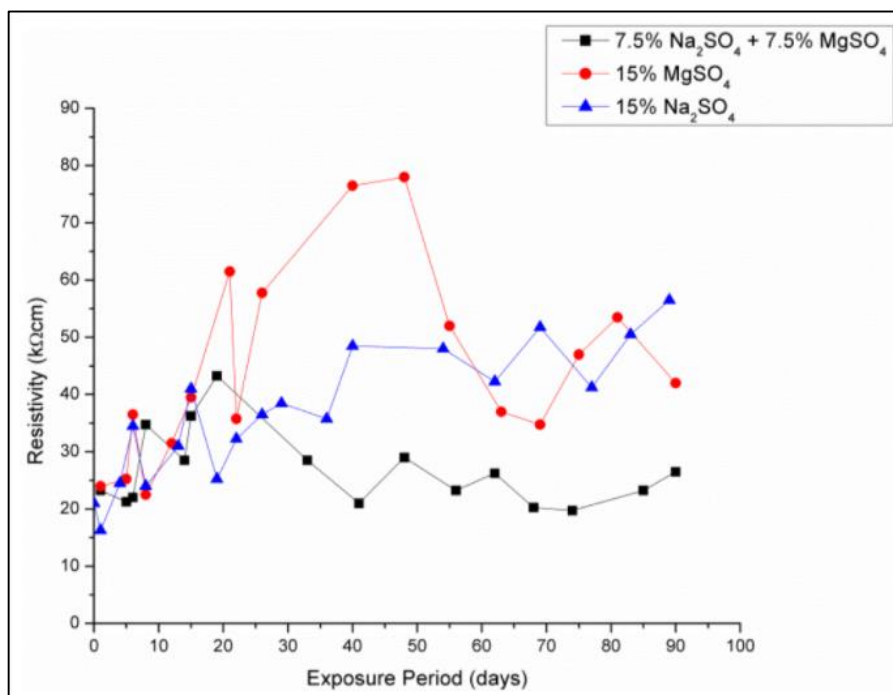
Nas amostras de 5% e 10% de argamassas com sílica ativa, a resistividade para as argamassas com sílica ativa a 5% está associada ao parâmetro R1, ou seja, para as diferentes agressividades, o parâmetro aumentou nas idades iniciais e depois diminuiu. A maior diminuição foi observada nas amostras expostas à solução mista de sulfato.

Figura 32 - Variação da resistência R1 com a argamassa contendo 5% de sílica ativa.



Fonte: Cabeza *et al.*, (2002).

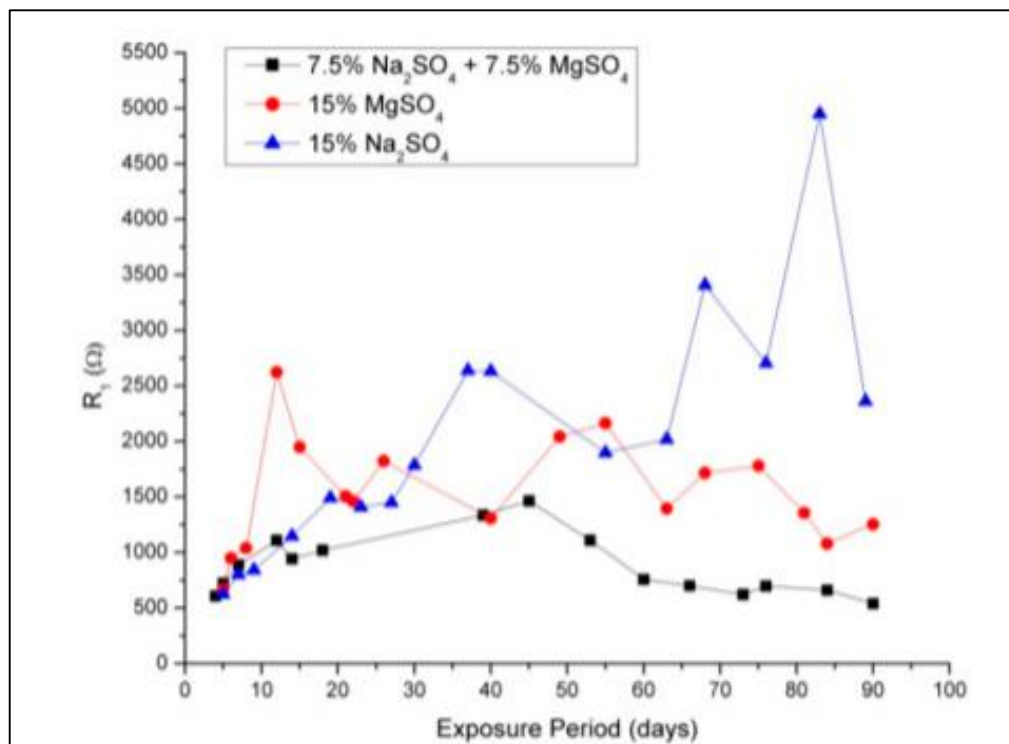
Figura 33 - Variação da resistividade em argamassas contendo 5% de sílica ativa.



Fonte: Cabeza *et al.*, (2002).

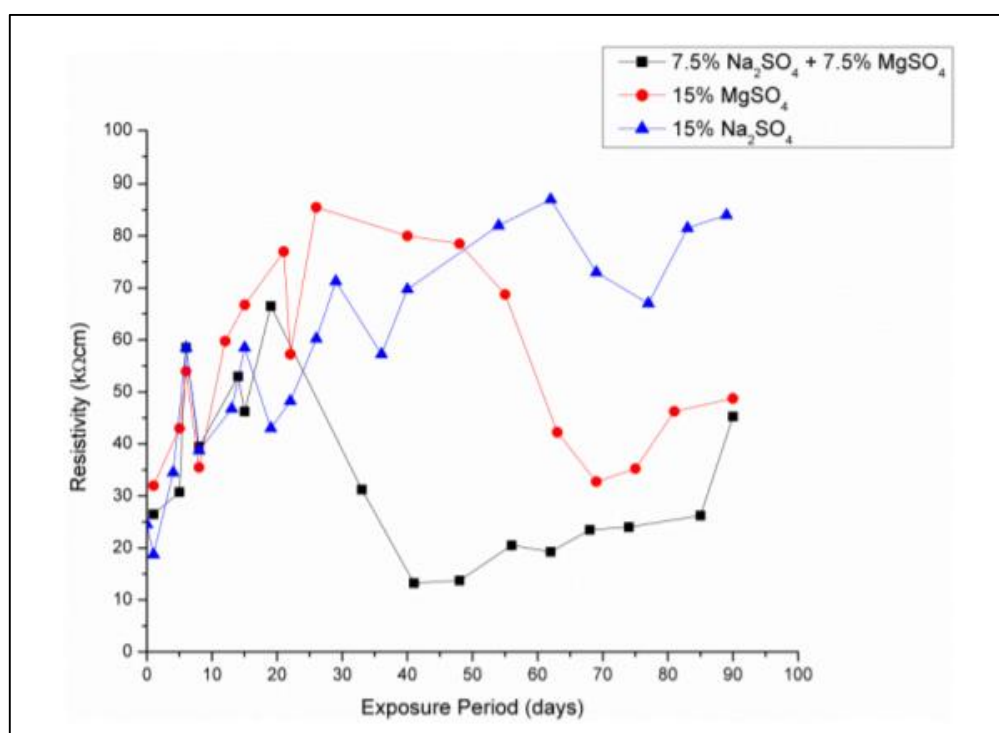
O resultado das amostras contendo 10% de sílica ativa também correlacionaram bem com a resistência R1, conforme observado nas argamassas com 5% de sílica ativa.

Figura 34 - Variação da resistência  $R_1$  com a argamassa contendo 10% de sílica ativa.



Fonte: Cabeza *et al.*, (2002).

Figura 35 - Variação da resistividade em argamassas contendo 10% de sílica ativa.



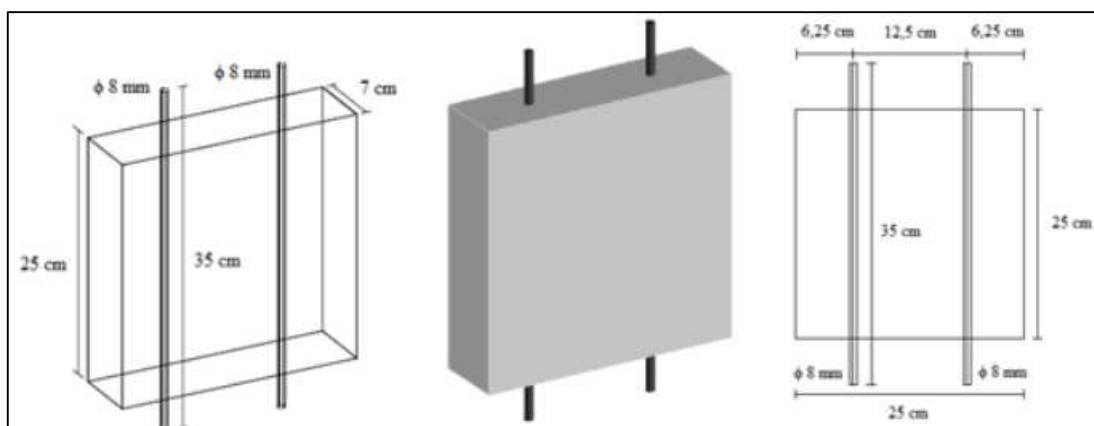
Fonte: Cabeza *et al.*, (2002).



Comparando as amostras com sílica ativa e a referência, observou-se que os valores das resistências de espectroscopia de impedância R1 e R2 alcançados, aumentaram muito com o teor de sílica ativa das amostras. O mesmo ocorreu com a resistividade elétrica, ou seja, os corpos de prova com sílica ativa apresentaram valores maiores do que aqueles sem sílica ativa, embora, de modo geral, esta propriedade fosse menos sensível para detectar alterações na microestrutura das argamassas do que a espectroscopia de impedância, de acordo com os resultados obtidos.

Capraro *et al.*, (2019) realizaram um estudo onde analisou a influência da contaminação por sulfatos no processo da corrosão em amostras com dimensões 25x25x7cm, contendo duas barras de aço CA 50 de diâmetro de 8 mm e 35 cm de comprimento, conforme figura abaixo.

Figura 36 - Amostra estudada.



Fonte: Capraro *et al.*, (2019).

Foi utilizado o cimento CP V – alta resistência inicial - com a substituição de 35% de cinza volante, aproximando do cimento CP IV que é muito utilizado em barragens. Ressalta-se que não foi utilizado o cimento CP IV diretamente por não saber o teor exato de pozolana na mistura. O agregado graúdo utilizado foi a brita 1, e o agregado miúdo foi a areia natural. A contaminação foi feita através da substituição de parte do agregado miúdo por pirita.

Foram feitas quatro séries para analisar o ataque de sulfatos, sendo uma de referência e as outras contaminadas, sendo 0,5% de SO<sub>3</sub>, 1,0% de SO<sub>3</sub> e 5,0% de

SO<sub>3</sub> – vide figura 37. As amostras foram moldadas com o traço 1:2,7:2,7 com a relação água/cimento de 0,6. O traço foi escolhido devido à utilização na execução de concreto convencional em uma usina hidrelétrica nacional.

Figura 37 – Séries de ensaios com teores contaminantes em SO<sub>3</sub> e em pirita utilizados na moldagem dos concretos.

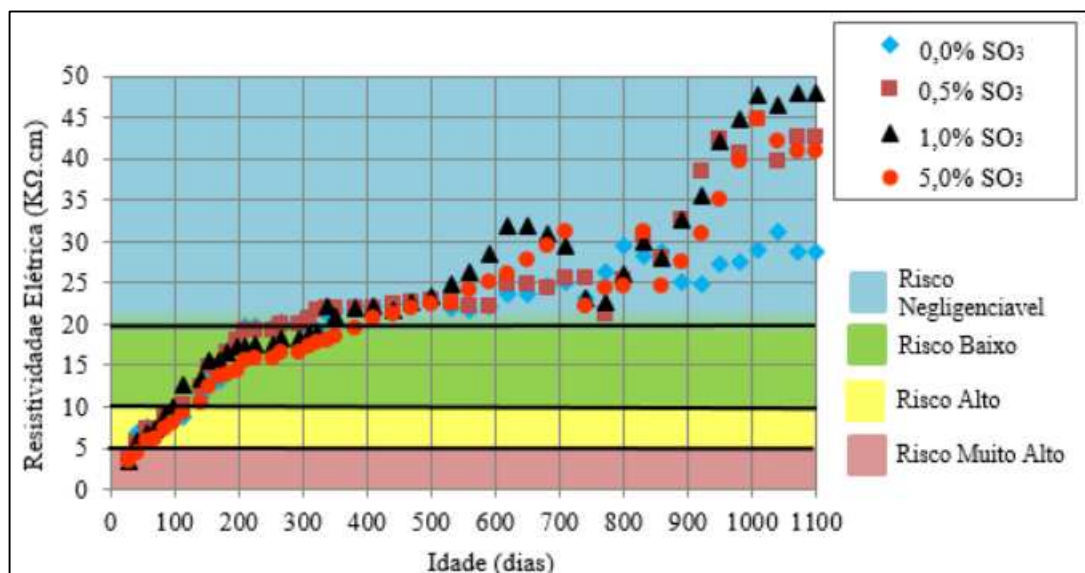
<b>Série de ensaio</b>	<b>Teor em SO<sub>3</sub></b>	<b>Teor em pirita</b>
Referência (0%)	0,0% de SO <sub>3</sub>	0,00%
Contaminação (0,5%)	0,5% de SO <sub>3</sub>	0,38%
Contaminação (1,0%)	1,0% de SO <sub>3</sub>	0,75%
Contaminação (5,0%)	5,0% de SO <sub>3</sub>	3,75%

Fonte: Capraro *et al.*, (2019).

Os parâmetros avaliados foram a partir dos 28 dias até os 1100 dias. Para a resistividade elétrica, foi considerado o fator para transformar a amostra em um meio semi-infinito, encontrando um valor próximo de 1.

O resultado obtido no experimento é demonstrado na figura 38. Observou-se que a resistividade elétrica cresce ao longo do tempo, e isso se deve ao fato da formação sucessiva dos produtos de hidratação do cimento Portland, que, conseqüentemente, causa o preenchimento dos poros, diminuindo os seus tamanhos e a conectividade entre eles, detendo a passagem elétrica e proporcionando o aumento da resistividade elétrica.

Figura 38 – Resistividade elétrica X Idade.



Fonte: Capraro *et al.*, (2019).

Aos 7 dias, todas as séries apresentavam um risco muito alto de corrosão, enquanto aos 400 dias o risco era insignificante. A série com exposição ao ataque de 5,0% apresentou menores valores de resistividade no final dos 1100 dias.

Outro estudo, Rosa (2005) incorporou 4% de sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) em relação à massa de aglomerantes com misturas contendo 50% de escória de alto forno. O cimento empregado foi o CPV – Alta Resistência Inicial - por ter maior quantidade de C<sub>3</sub>S, proporcionando maior quantidade de hidróxido de cálcio, possibilitando maiores teores de adições minerais. A dosagem dos concretos relacionadas às relações água/aglomerante, são: 0,35, 0,50 e 0,65. Nas misturas com relação água/aglomerante de 0,35 utilizou-se o aditivo superplastificante à base de éter carboxílico. Foram moldados 4 séries, nos traços citados acima, com as seguintes dimensões: 10x10x17 cm. Apenas a série 50EX foi usada para verificar o ataque de sulfato conforme mostrado na figura a seguir.

Tabela 11 - Materiais utilizados.

Traço	a/agl	Cimento (Kg/m <sup>3</sup> )	Água (Kg/m <sup>3</sup> )	E.A.F (Kg/m <sup>3</sup> )	A.M (Kg/m <sup>3</sup> )	A.G (Kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)	A.Q (%)
REF	0,35	486	170,10	-	652	1051	0,25	-
	0,50	353	176,50	-	766	1035	-	-
	0,65	279	181,35	-	830	1022	-	-
50E	0,35	243	170,10	243	634	1051	0,17 5	-
	0,50	177	176,50	177	753	1035	-	-
	0,65	140	181,35	140	819	1022	-	-
50EX	0,35	243	170,10	243	634	1051	0,45	4
	0,50	177	176,50	177	753	1035	-	4
	0,65	140	181,35	140	819	1022	-	4
70E	0,35	146	170,10	341	627	1051	0,15	-
	0,50	106	176,50	247	748	1035	-	-
	0,65	84	181,35	196	815	1022	-	-
EAF = escória alto forno      A.M = agregado miúdo      A. G = agregado graúdo SP = superplastificante      A. Q = ativador químico a base de sulfato(Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )								

Fonte: Rosa (2005).

O método da resistividade elétrica utilizado foi o de Wenner, sendo que as medições foram auferidas nos seguintes dias: 3, 7, 28, 56 e 91. Os resultados são ilustrados a seguir.

Tabela 12 - Resultados da resistividade elétrica nos corpos de prova.

Traço	a/agl	Resistividade elétrica aparente ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )				
		Idade (dias)				
		3	7	28	56	91
REF	0,35	17841	22063	29418	34433	43565
	0,50	11968	14488	17115	23812	28254
	0,65	9609	11176	13328	16306	20204
50E	0,35	12445	19639	43368	54046	59680
	0,50	10887	16002	34331	45871	47934
	0,65	9270	14063	30012	37596	42893
50EX	0,35	32843	48337	62678	68046	74397
	0,50	15167	28426	42248	50362	59610
	0,65	13413	21787	38019	43130	52236
70E	0,35	24791	25910	46972	59709	66615
	0,50	19934	22187	37352	53221	57338
	0,65	18537	19389	31794	49777	52250

Fonte: Rosa (2005).

Nas amostras analisadas observou-se que os valores da resistividade elétrica seguiram os parâmetros de correspondência para as relações água/aglomerante e para as idades dos corpos de prova. A utilização do sulfato de sódio desenvolveu as condições de hidratação da escória, principalmente no ponto de vista da velocidade das reações químicas. Consoante a isto, nas idades iniciais de 3 e 7 dias, os valores da resistividade elétrica foram maior que na mistura de igual teor de escória, além de ser maior que as amostras de referência.

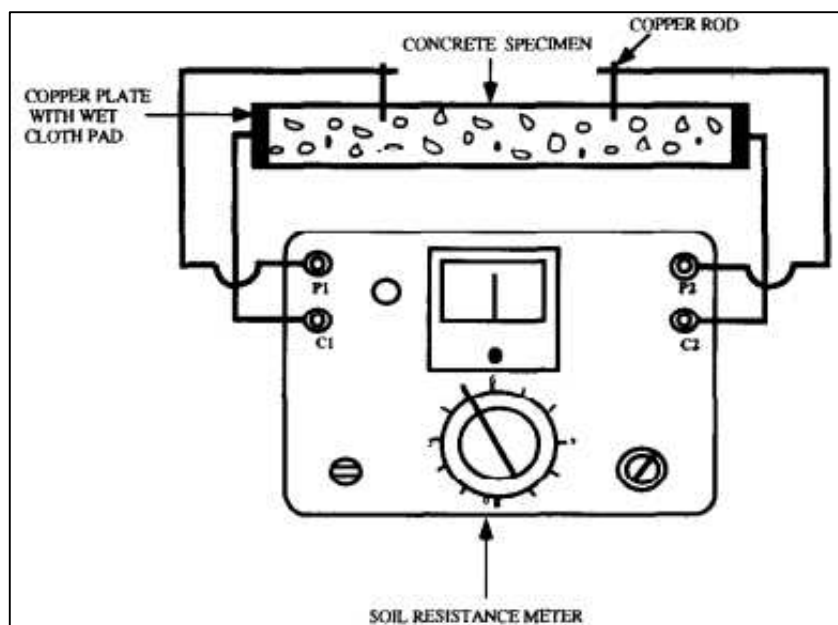
Outros pesquisadores também moldaram seis corpos de prova com as medidas de 75x150 mm com a relação água-cimento de 0,45 e com o teor de cimento de 350 kg/m<sup>3</sup>. As amostras ficaram por 27 dias em câmara úmida. O principal objetivo era avaliar os efeitos da contaminação de sulfatos na resistividade elétrica do concreto para ajudar na análise da corrosão.

Após a câmara úmida, as amostras foram secas a 110° C, resfriadas e tiveram os seus respectivos pesos auferidos. Posteriormente, foram imersas em água e retiradas após 5, 10, 30 e 60 minutos, além de 2, 4, 8, 12, 24, 48 e 72 horas.

Em cada intervalo de medição, as superfícies foram secas e pesadas, depois disso, a resistividade elétrica foi mensurada. O equipamento utilizado para quantificar a

resistividade elétrica é demonstrado abaixo e é denominado como Nilson 400. O corpo de prova foi fixado em uma estrutura de aço com placas finais feitas de cobre, e as placas finais foram cobertas com um pano que foi umedecido com solução de sulfato de cobre. A combinação da placa de cobre e do pano úmido garantiu uma distribuição uniforme da corrente ao longo da face do corpo de prova.

Figura 39 - Equipamento para auferir a resistividade elétrica.

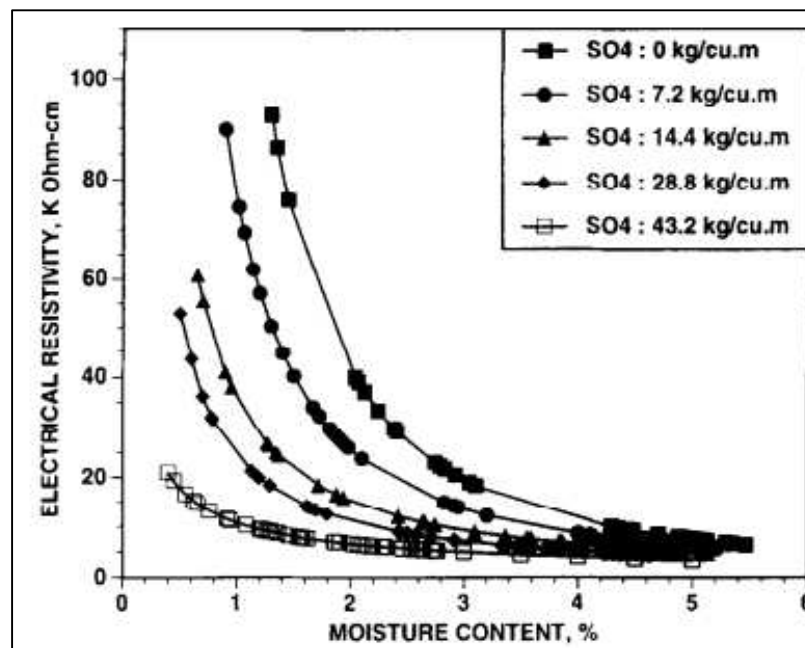


Fonte: Saleem *et al.*, (1996).

A resistividade elétrica foi obtida pela seguinte expressão: Resistividade =  $\frac{RA}{L}$ , Ohm-cm. Onde R é a resistência (Ohm), A é a seção transversal e L é o comprimento entre os pinos de cobre (cm).

A contaminação de sulfatos com diferentes quantidades sofre variação de acordo com o teor de umidade, conforme figura a seguir.

Figura 40 - Relação entre a umidade, resistividade elétrica e a contaminação de sulfatos.



Fonte: Saleem *et al.*, (1996).

Percebe-se que a resistividade elétrica diminui com o aumento da umidade, bem como com a ampliação da contaminação por sulfatos. Com um teor de umidade de 1,5%, a resistividade elétrica diminuiu de 40 para 10 kOhms-cm conforme a concentração de sulfato aumentou de 7,2 para 43,2 kg/m. Assim, chegaram à conclusão que a resistividade elétrica do concreto diminui com o aumento da contaminação de sulfatos. Este fato pode ser uma preocupação no que diz respeito à corrosão das armaduras, em estruturas expostas a um ambiente com monóxido de carbono.

### 3.3 Resistência à Compressão do Concreto

A resistência à compressão é a propriedade mais disseminada experimentalmente para classificar a qualidade do concreto. Para o controle de obra e verificação do dimensionamento do concreto, o ensaio de resistência à compressão é muito utilizado. A ABNT inclusive, coloca como um dos critérios de verificação do atendimento a todos os requisitos para aceitação do concreto os ensaios de resistência à compressão.

No entanto, o concreto analisado por este ensaio não representa totalmente o concreto existente na estrutura, sendo necessário avaliar a resistência à compressão *in loco* em diferentes idades devido à previsão da vida útil, etapas construtivas e/ reparos (ESCOBAR; ANDREOTTI; FABRO, 2011).

Quando os corpos de prova moldados não alcançam a resistência definida em projeto, é adequado a elaboração de um plano de extração de testemunhos da estrutura executada (ABNT NBR 7680:2015). Este procedimento corresponde remover amostras cilíndricas de concreto que apresenta dúvidas quanto à resistência e o desempenho (CASTRO, 2009; MEDEIROS *et al.*, 2017).

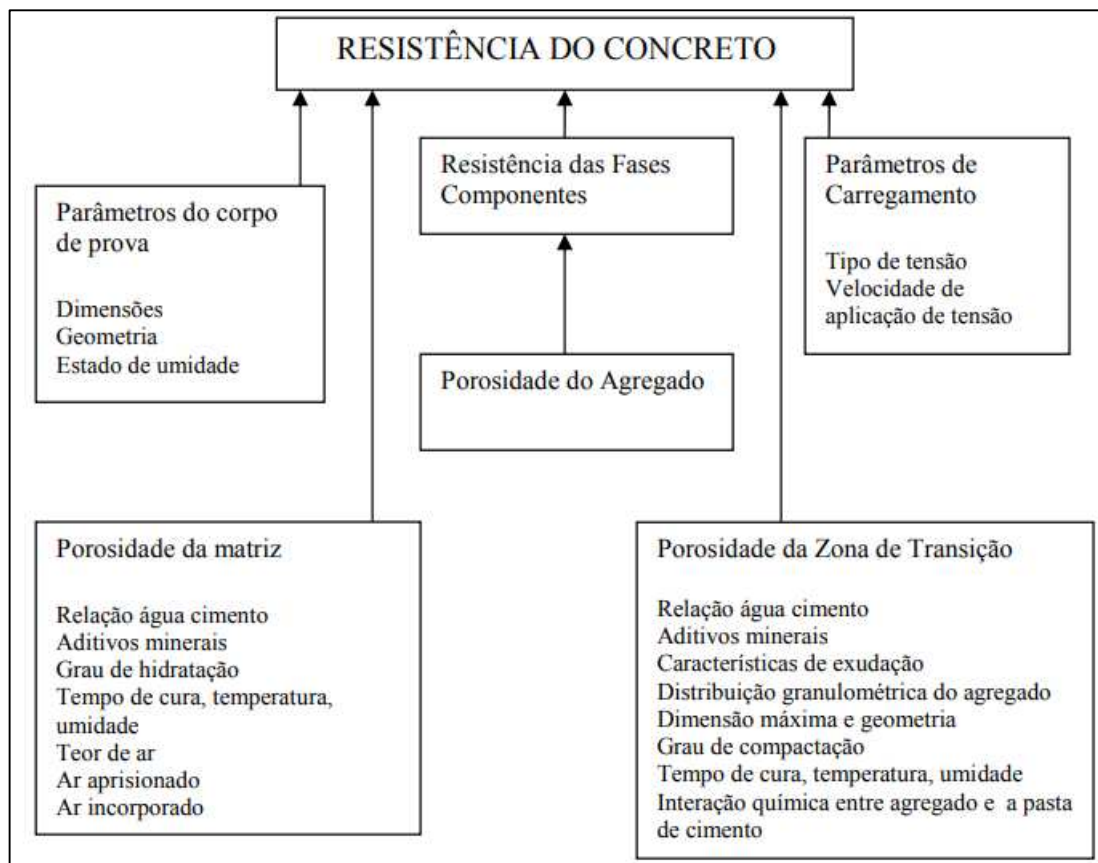
Com a extração de testemunhos pode-se fazer algumas análises da estrutura, como por exemplo, entender o seu estado atual e a sua durabilidade (MEDEIROS *et al.*, 2017). Além disso, com os testemunhos outros diagnósticos podem ser feitos, tais como: determinação da frente de carbonatação; determinar propriedades físicas e mecânicas, entre outros (MEDEIROS *et al.*, 2017).

O método da resistência à compressão, entretanto, tem desvantagem assim como os demais. As limitações que estão na realização deste ensaio são: geração de entulho; extração de peças de sustentação; presença de barras de aço; entre outros (SANTANA; MIRANDA, 2016).

Assim como a resistividade elétrica, são muitos fatores que intervêm na resistência à compressão do concreto, sendo essa propriedade muito suscetível a microestrutura da sua matriz, do tipo de agregado graúdo utilizado e a utilização de adições minerais. Nos itens seguintes estão descritas as variáveis que influenciam no comportamento da resistência à compressão. E na figura a seguir, Metha e Monteiro (1994) resumiram os fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto.



Figura 41 - Fatores que influenciam na resistência à compressão do concreto.



Fonte: METHA e MONTEIRO (1994)

### 3.3.1 Relação água/cimento

O principal fator que interfere nas propriedades mecânicas do concreto é a relação água/cimento. Este fator altera a porosidade da matriz da pasta de cimento bem como a zona de transição, fazendo com que ambos fiquem menos resistentes (METHA e MONTEIRO, 1994).

### 3.3.2 Tipo e finura do cimento

A influência do cimento ocorre somente nas primeiras idades, sendo que, próximo aos 90 dias, as resistências se igualam (METHA E MONTEIRO, 1994). Segundo

Neville (1997), o crescimento rápido da resistência acontece quanto mais fino for o cimento, tendo em vista a velocidade de hidratação do mesmo.

### **3.3.3 Forma, textura e dimensão máxima do agregado graúdo**

A resistência do agregado por ser mais resistente do que a matriz da pasta de cimento e a zona de transição, não provoca uma alteração significativa nos resultados da resistência à compressão de um concreto convencional (NEVILLE, 1997).

Já a dimensão máxima do agregado, a forma e a textura interferem na resistência à compressão do concreto. A textura mais rugosa do agregado faz com que a resistência seja maior nas primeiras idades. Nunes (2005) relata que a dimensão máxima do agregado pode gerar efeitos opostos na resistência do concreto, sendo que, para o mesmo teor de cimento e mesma consistência do concreto, agregados menores demandam maiores quantidades de água de amassamento do que agregados maiores. No entanto, agregados menores tem a tendência de apresentar zonas de transição mais fortes, com menos microfissuras.

### **3.3.4 Adições minerais**

Segundo Quadros (2014), quando se adiciona as adições minerais do tipo pozolânica no traço do concreto, elas agem quimicamente com o hidróxido de cálcio originando o silicato de cálcio hidratado. Além disso, quando as adições estão finamente moídas, desenvolvem o efeito fíler, o qual gera o preenchimento dos poros melhorando a microestrutura do concreto.

### **3.3.5 Consequências mecânicas do ataque por sulfatos**

SCHIAVINI (2018) analisou a influência de diferentes tipos de cimento na resistência ao ataque de sulfatos. Utilizou os cimentos CP II F - 32, CP IV 32 - RS

e CP V-ARI com o traço de 1:3 e a relação água/cimento igual 0,50. As soluções de sulfato de sódio, cálcio e magnésio tinham uma concentração de 10% em massa. Os corpos de prova ficaram 20 dias em câmara úmida e logo após permaneceram 5 (cinco) meses imersos nas respectivas soluções de ataque. Já os corpos de prova de referência ficaram dentro d'água.

Aos 153 dias foi realizado o ensaio de resistência à compressão das amostras, e por meio de análise da ANOVA, verificou-se que houve uma diferença considerável nas resistências à compressão nas amostras confeccionadas com os cimentos CP II-F-32 e CP IV - 32 RS, o que não ocorreu com os corpos de prova com cimento CP V – ARI. Ressalta-se que as resistências à compressão das amostras que estavam em contato com as soluções agressivas não apresentaram, em grande parte, um valor inferior em relação aos corpos de prova de referência, o que era esperado. Segundo a autora, isso ocorreu devido ao tempo de contato com as soluções, o qual foi considerado insuficiente. Nos quadros abaixo pode-se verificar os resultados auferidos no ensaio.

Quadro 1 - Análise de variância ANOVA para resistências à compressão do cimento CP II-F-32.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P*1	F crítico
Entre grupos	32,9	3,0	10,9	3,9	0,02	3,1
Dentro dos grupos	55,1	20,0	2,8			
Total	87,9	23,0				

Fonte: SCHIAVANI, 2018.

Quadro 2 - Análise de variância ANOVA para resistências à compressão do cimento CP IV - 32 RS 32.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P*1	F crítico
Entre grupos	107,2	3,0	35,7	7,7	0,001	3,1
Dentro dos grupos	92,8	20,0	4,6			
Total	200,0	23,0				

Fonte: SCHIAVANI, 2018.

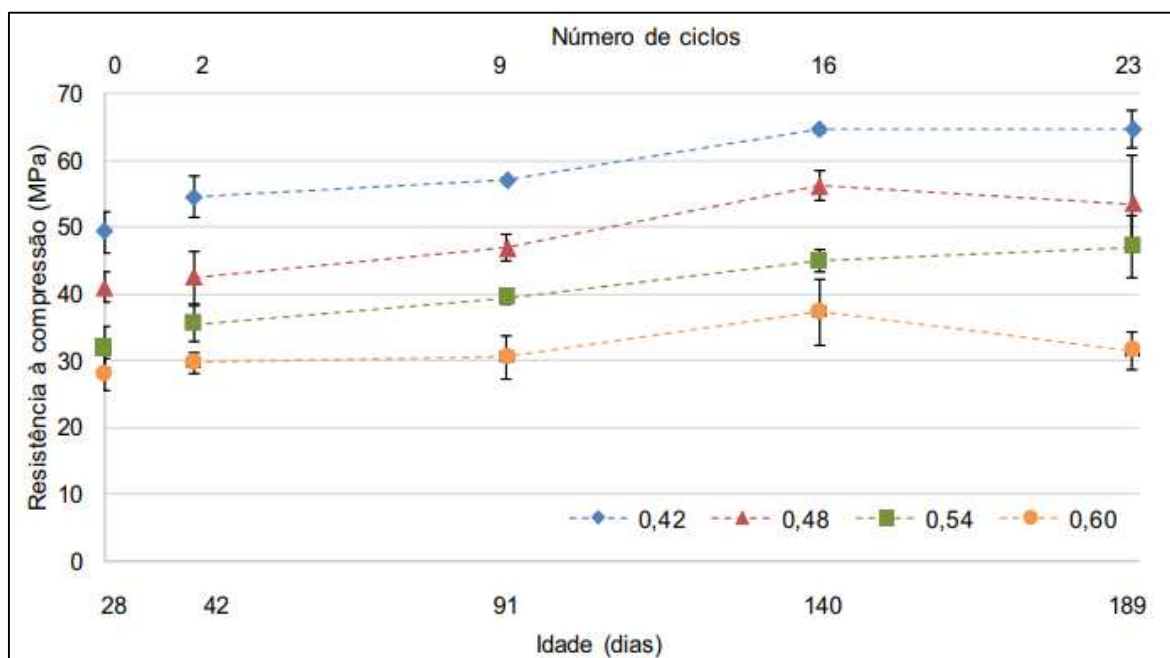
Quadro 3 - Análise de variância ANOVA para resistências à compressão do cimento CP V – ARI 32.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P**1	F crítico
Entre grupos	61,2	3,0	20,4	1,6	0,23	3,1
Dentro dos grupos	260,1	20,0	13,0			
Total	321,3	23,0				

Fonte: SCHIAVANI, 2018.

Gans (2017) estudou cinco condições de agressividade em diferentes relações água/cimento, uma delas foi o ciclo de molhagem e secagem (4 dias de secagem ao ar + 3 dias em imersão) em solução com 5% de sulfato de sódio e as relações água/cimento investigadas foram 0,42, 0,48, 0,54 e 0,60. O ensaio de resistência à compressão foi realizado nas idades de 42, 91, 140 e 189 dias. Os resultados do ensaio são mostrados na figura abaixo.

Figura 42 - Resultado da resistência à compressão para os ciclos de molhagem e secagem.

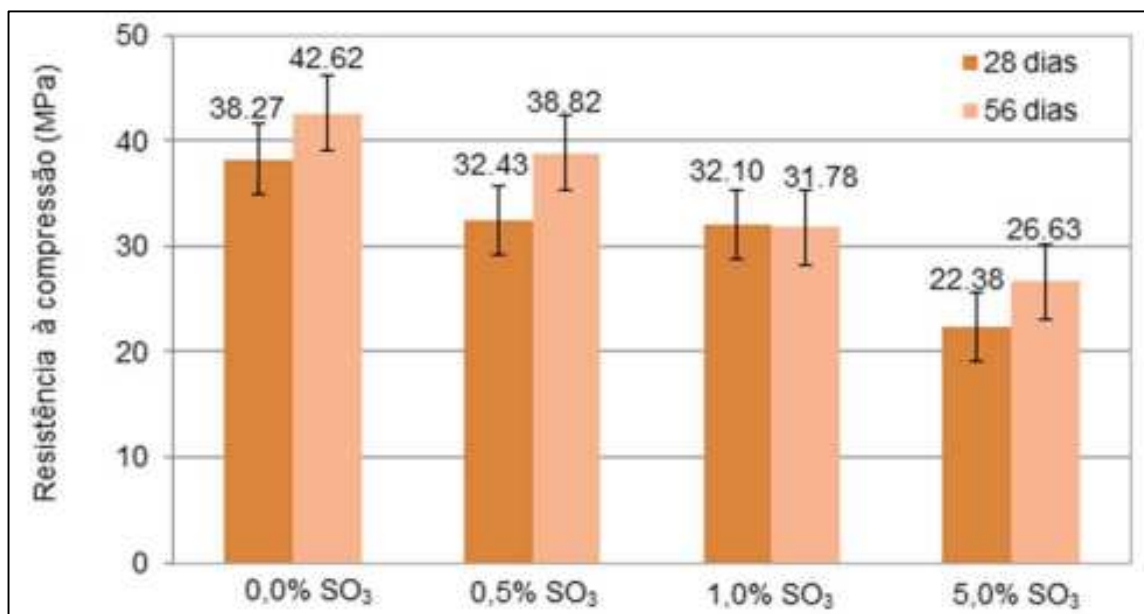


Fonte: GANS, 2017

Capraro *et al.*, (2017) analisaram a resistência à compressão do concreto sob o ataque interno de sulfatos. Foram utilizados 4 (quatro) séries, sendo uma de referência e as demais com teores de substituição do sulfato de sódio no agregado miúdo, quais sejam: 0,738%; 1,476% e; 7,437%. As idades estudadas foram 28 e

56 dias, além disso, foi realizado um ciclo semanal, após a cura úmida, intercalando-se entre uma câmara úmida e uma câmara seca. A figura a seguir mostra os resultados da resistência à compressão nas idades mencionadas.

Figura 43 - Resistência à compressão aos 28 dias (condição de cura úmida) e 56 dias (condição de ciclo semanal).



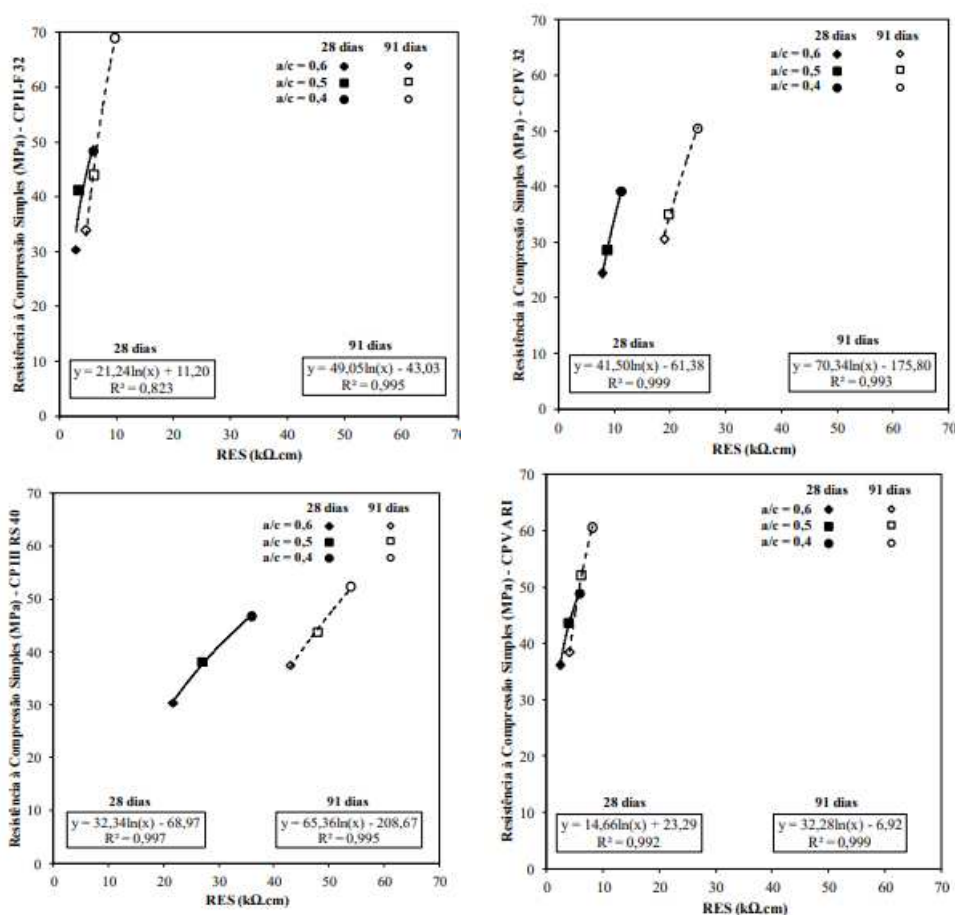
Fonte: CAPRARO *et al.*, 2017.

### 3.4. Correlação entre a Resistividade Elétrica Superficial e a Resistência à compressão

Através das medições da resistividade elétrica, pode-se estabelecer a resistência à compressão baseado na curva de referência que correlaciona as medidas das duas propriedades. A semelhança na evolução da resistividade elétrica e a resistência à compressão com o tempo proporciona essa correlação, tendo em vista alteração contínua da geometria dos poros e a microestrutura (FERREIRA e JALALI, 2010).

Medeiros *et al.*, (2014) estudaram a influência de quatro tipos de cimentos brasileiros na resistência à compressão e na resistividade elétrica superficial. Foram analisadas as idades de 28 e 91 dias dos ensaios supracitados. Os resultados encontrados tiveram uma boa relação, sendo o R<sup>2</sup> alterando entre 0,823 a 0,999, conforme mostrado nas figuras a seguir.

Figura 44 - Mostra a correlação da resistência à compressão e a resistividade elétrica para diferentes tipos de cimento.



Fonte: Medeiros *et al.*, (2014)

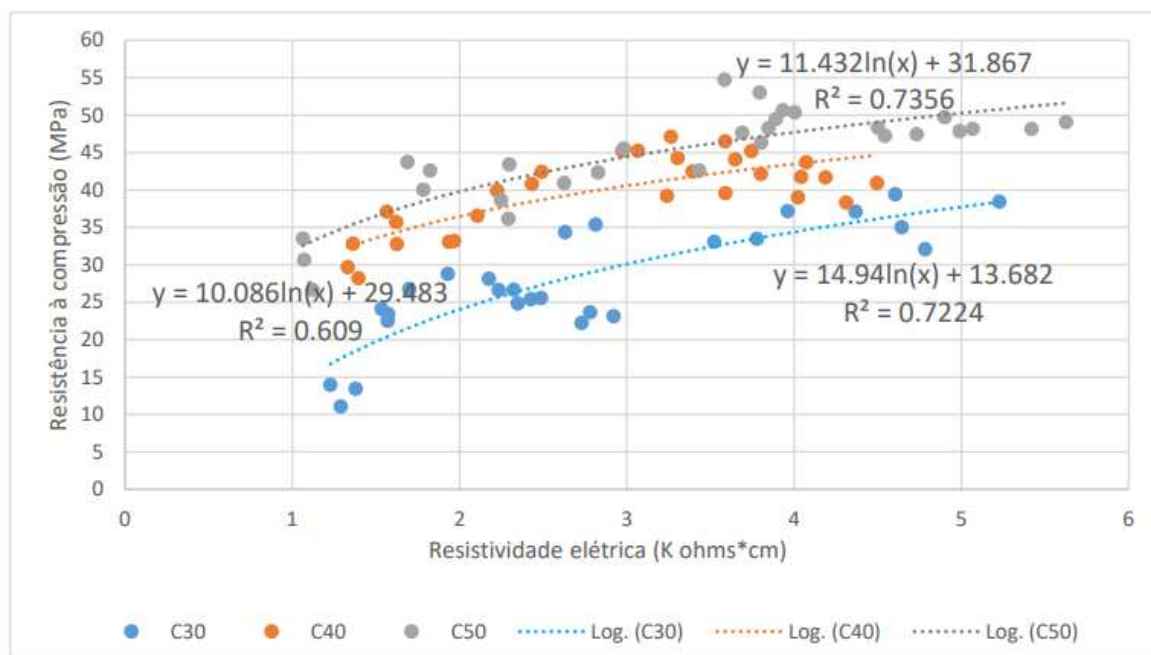
Araújo (2018) testou quatro modelos de correlação para cada classe de concreto, são eles: exponencial; linear; logarítmica e; potência. Os resultados de cada modelo são mostrados na figura a seguir, bem como as curvas de correlação entre os ensaios investigados.

Figura 45 - Mostra os modelos utilizados para obter os coeficientes de determinação ( $r^2$ ).

Tipo de curva	$r^2$		
	C30	C40	C50
Exponencial	0,5753	0,5312	0,6147
Linear	0,6682	0,5155	0,6286
<b>Logarítmica</b>	<b>0,7224</b>	<b>0,609</b>	<b>0,7356</b>
Potência	0,6661	0,6274	0,7366

Fonte: Araújo (2018).

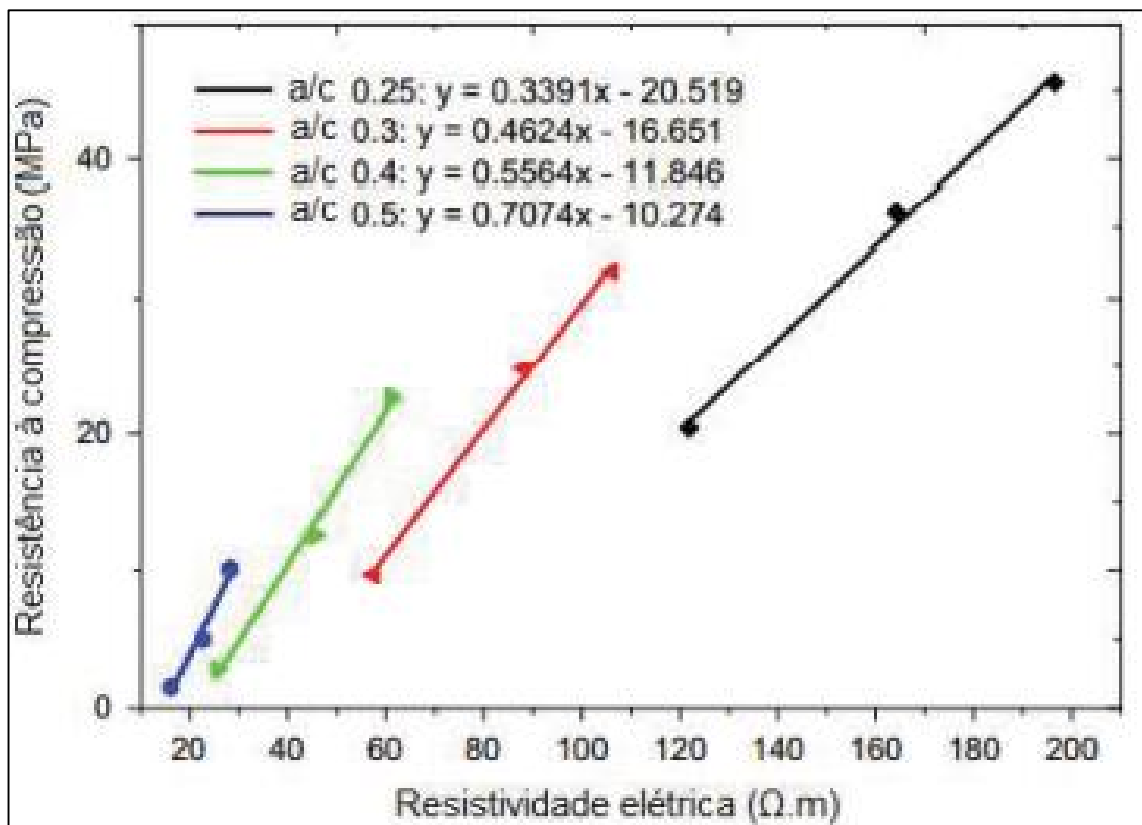
Figura 46 - Mostra a curva de correlação entre os ensaios para cada classe do concreto.



Fonte: Araújo (2018).

Dong *et al.*, (2016) analisaram variadas relações a/c comparando a resistência à compressão e a resistividade elétrica em 12, 18 e 24 horas. De acordo com as suas análises, informaram que os ensaios têm uma correlação linear, conforme é mostrado na figura a seguir.

Figura 47 - Mostra a correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à compressão nas mesmas idades.



Fonte: Dong *et al.*, (2016) *apud* Gans (2017).

Conforme mostrado nas referências bibliográficas acima, a relação entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica superficial é um tema já contemplado na literatura. No entanto, não foram encontrados trabalhos que fizeram a correlação desses ensaios com as condições de agressividade estudadas nesta dissertação.

### 3.5 Formato corpo de prova

A medição pelo Método de Wenner deve ser obtida em um meio semi infinito. No entanto, o concreto é heterogêneo e o formato e o tamanho dos corpos de prova provocam alteração na resistividade elétrica (CHEN, CHANG e YEIH, 2014). É importante entender que os resultados da resistividade elétrica são diferentes para os corpos de prova com diferentes tamanhos e formatos, além disso, o espaço



entre os eletrodos dos equipamentos podem ser diferentes (GHOSH e TRAN, 2015).

Para serem considerados meios semi infinitos, os corpos de prova precisam ter dimensões suficientes. Ou seja, as linhas de correntes criadas pelo equipamento no interior do concreto precisam de fechar, e dessa forma não provocam alterações na medição da resistividade elétrica (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014).

A norma espanhola UNE 83988-2 (AENOR, 2014) tem um coeficiente de correção para excluir a alteração dos resultados provocados pela dissemelhança da forma geométrica dos corpos de prova, conforme mostrado na tabela abaixo.

Tabela 13 - Fatores de forma para diferentes tamanhos de corpos de prova e distância (a) entre eixos dos eletrodos.

FORMATO DO CORPO DE PROVA	a = 0,035m	a= 0,05m
Cilíndrica 30x15 cm	0,714	0,606
Cilíndrica 20x10 cm	0,384	0,377
Cilíndrica 15x7,5 cm	0,384	-
Prismática 4x4x16 cm	0,172	-

Fonte: AENOR, 2014.

### 3.6 Valores de referência

Segundo Bauer *et al.*, (2019), os concretos comuns de 300 kg de cimento por metro cúbico de dosagem, sofrem variações na resistência elétrica entre as idades de 1 dia e 800 dias, sendo  $10^4$  e  $10^7$  ohms/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

Hornbostel (2013) obteve uma relação entre a resistividade elétrica e o risco de corrosão das armaduras, conforme demonstrado na tabela a seguir.

Tabela 14 - Relação entre o risco de corrosão e a resistividade elétrica.

Intensidade de corrosão em termos de resistividade elétrica ( $\Omega$ m)			
Pesquisadores	Alto Risco	Médio Risco	Baixo Risco
Broomfield (2002)	<50	100-200	>200
Bertolini (2004)	<50	50-120	>120
Cavalieri (1981)	<65	65-85	>85
López (1993)	<70	70-300	>300-400
Morris (2002)	<100	100-300	>300
Gonzalez (2004)	<200	200-1000	>1000
Elkey (1995)	<50	Em discussão	100-730
Andrade (1996)	<100	100-1000	>1000-2000
Polder (2001)	<100	100-1000	
Smith (2004)	<80	80-120	>120

Fonte: Hornbostel (2013) *apud* Azzi (2020).

Mehta e Monteiro (2008), da mesma forma, expuseram os valores de referência para a resistividade elétrica do concreto, oriundo do *CEB-192 Recommendation Based on Concrete Resistivity to Estimate de Likely Corrosion Rate*.

Figura 48 - Resistividade elétrica do concreto com a indicação do risco de corrosão.

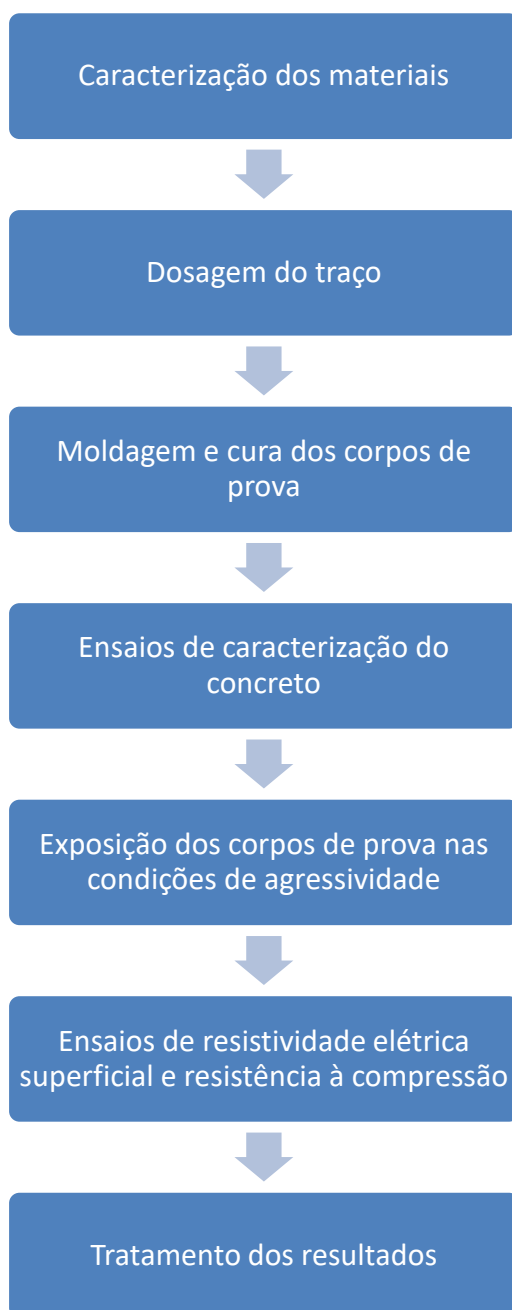
Resistividade Elétrica do Concreto ( $k\Omega$ .cm)	Indicação do risco de corrosão
> 20	Despresível
10 a 20	Baixa
5 a 10	Alta
< 5	Muito Alta

Fonte: Metha e Monteiro adaptado por Brandão *et al.*, (2019).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A abaixo será descrito os procedimentos empregados na análise experimental, bem como os resultados esperados. O procedimento experimental foi realizado conforme figura abaixo.

Figura 49 - Fluxograma ilustrativo do procedimento experimental.



#### 4.1 Materiais

O traço e a caracterização dos materiais foram realizados para atender às diretrizes das Classes de Agressividades II, III e IV da ABNT NBR 6118:2014, com auxílio de tecnologista fora da UFMG. O sulfato utilizado foi o sulfato de magnésio ( $MgSO_4$ ), tendo em vista que está presente em águas do mar, solos contaminados e lençóis freáticos.

Foi fixado o traço, em massa de materiais secos, de 1: 1,4: 2,1 (cimento, areia e brita) e foi adotado a relação a/c igual a 0,45. Esses traços foram escolhidos baseado no estudo realizado por Patrícia Gans (2017), devido à resistência a compressão auferidas nesse trabalho, além do traço permitir a menor relação a/c sem o uso de aditivos para os materiais estudados.

Figura 50 - Mostra as formas dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2022).

Figura 51 - Mostra os corpos de prova moldados.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 15 - Relação dos materiais e traço.

Materiais		Traço
Cimento	CPV - RS	1
Areia	Média	1,4
Brita	1	2,1
Água	Copasa	0,45

Fonte: Autor (2022).

Em todas as moldagens, em estado fresco, foi realizado o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*), segundo a ABNT NBR NM 67/96 (Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone).

Figura 52 - Mostra o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.



Fonte: Autor (2022).

#### 4.1.1 Caracterização dos materiais

##### 4.1.1.1 Cimento

Foi utilizado um tipo de cimento Portland, qual seja: CP V-RS. Este foi produzido e doado pela empresa Lafarge Holcim. A referida empresa coletou amostras dos sacos de cimentos fornecidos e realizou as caracterizações químicas dos mesmos, conforme figura a seguir.

O cimento CP V-RS foi escolhido com o objetivo de estudar o concreto sob condições de agressividade reproduzindo zonas de ambiente marinho, no solo, nos efluentes industriais e sanitários. Segundo a ABNT NBR 16.697 (2018) e a ABNT NBR 12.655 (2022), concretos expostos a solos ou soluções contendo sulfatos

devem ser preparados com cimento resistente a sulfatos, já que a pesquisa apresenta condições similares às reais, no intuito de criar relações que possam ser utilizadas na prática. Foi estabelecido utilizar o cimento CP V-RS neste trabalho devido à facilidade na região de estudo. A composição química do cimento foi realizada pela empresa Lafarge Holcim, conforme figura abaixo.

A influência da composição do cimento na resistividade elétrica e na resistência à compressão já foi analisada por outros pesquisadores, a saber: Medeiros-Junior e Lima (2016), Ramezaniapour *et al.*, (2011), Medeiros-Junior *et al.*, (2014). Por isso, apenas um tipo de cimento foi escolhido.

Figura 53 - Certificado de Qualidade do Cimento CP V-RS.

ENSAIOS QUÍMICOS				
ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18
PF 950C	NM18/12	%	3.48	<=6.50
SO3	NBR14656/01	%	2.72	<=4.50
RI	NM15/12	%		não aplicável
MgO	NBR14656/01	%	2.42	não aplicável

ENSAIOS FÍSICOS				
ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18
Blaine	NBR16372/15	cm <sup>2</sup> /g	5011	não aplicável
Ret.38mic	NBR12826/14	%	3.2	não aplicável
IP	NBR16607/18	min	166	>=60
FP	NBR16607/18	min	225	<=600

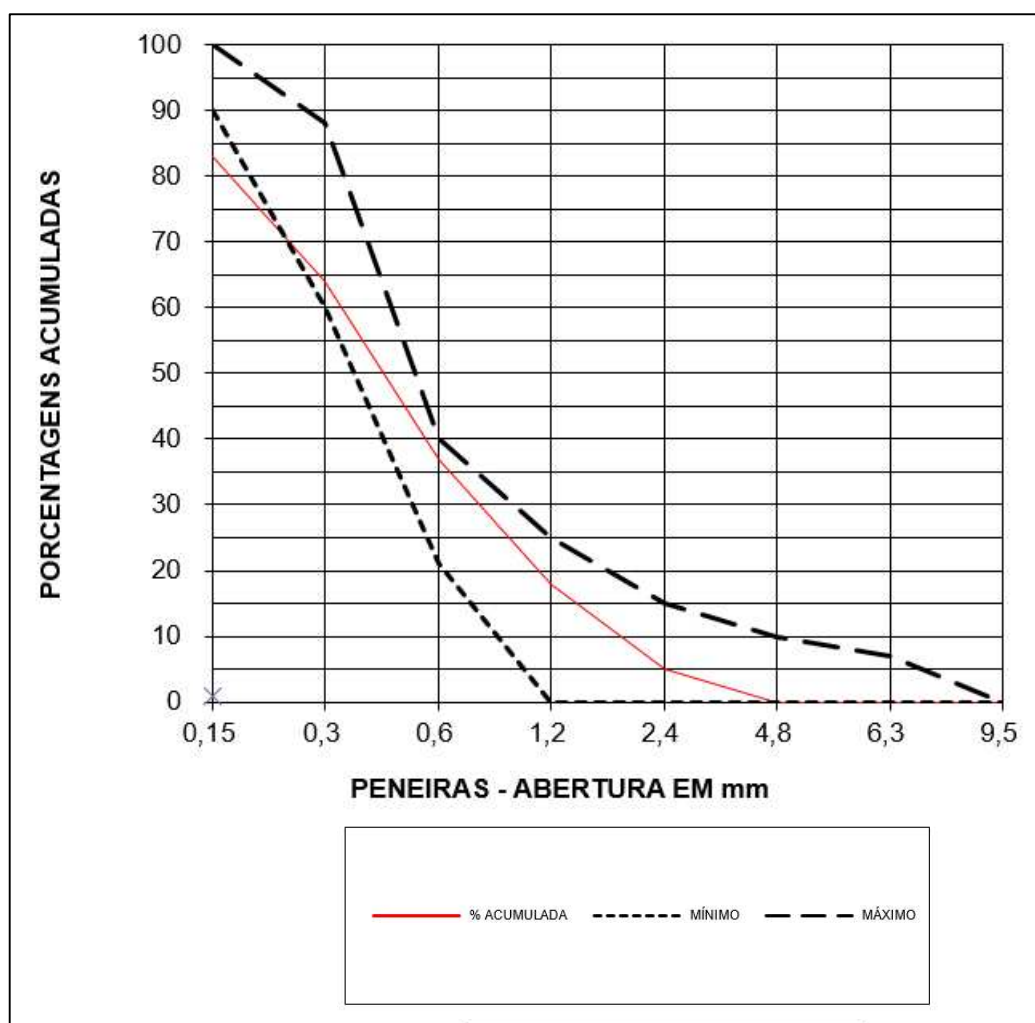
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO					
ENSAIOS	NBR Nº	UNIDADE	Desvio	Média	ESPECIFICAÇÃO NORMA NBR 16697/18
Resist.Comp.1D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.89	18.5	>=14.0
Resist.Comp.3D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.66	33.1	>=24.0
Resist.Comp.7D(NBR)	NBR7215/19	MPa	0.71	41.9	>=34.0
Resist.Comp.28D(NBR)	NBR7215/19	MPa	1.41	51.5	não aplicável

Fonte: Lafarge Holcim (2022).

#### 4.1.1.2 Agregado miúdo

Foi empregada uma areia média artificial como agregado miúdo na confecção de todos os corpos prova, sendo esta vendida na região metropolitana do Município de Belo Horizonte/MG. Foram feitos testes de granulometria por peneiramento, massa específica, massa específica aparente, absorção de água, massa unitária solta e massa unitária compactada, cujos resultados são apresentados na figura abaixo.

Figura 54 - Mostra a curva granulométrica da areia.



Fonte: Autor (2022).



Figura 55 - Mostra a pesagem da areia para realização do ensaio de granulometria.

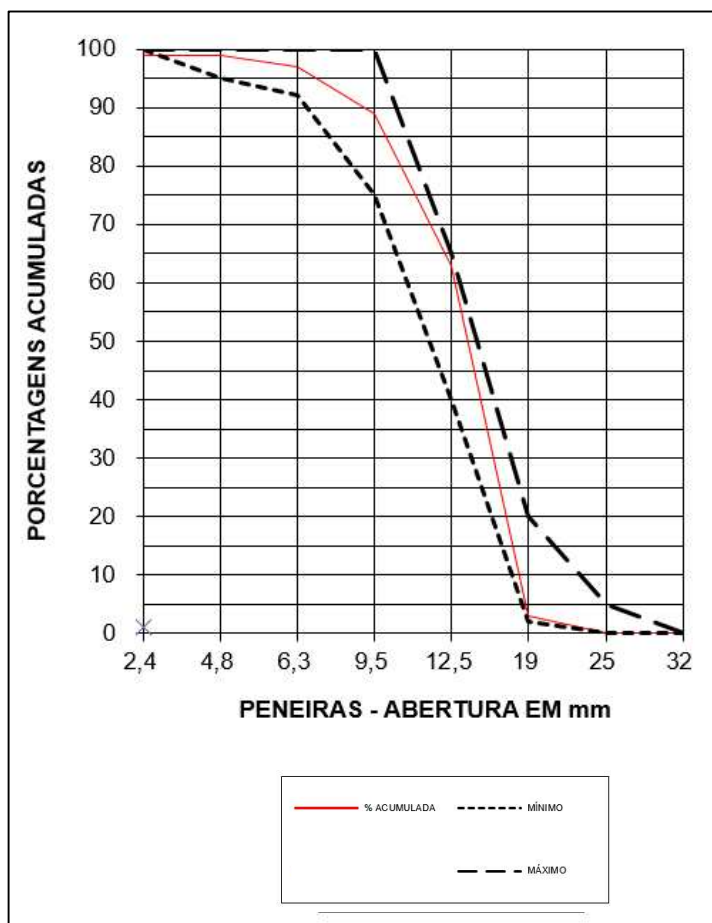


Fonte: Autor (2022).

#### 4.1.1.3 Agregado graúdo

Foi empregada a brita 1 como agregado graúdo na confecção de todos os corpos prova, sendo esta vendida na região metropolitana do Município de Belo Horizonte/MG. Foram feitos testes de granulometria (foto a seguir) por peneiramento, massa específica, massa específica aparente, absorção de água, massa unitária solta e massa unitária compactada, cujos resultados são apresentados na sequência.

Figura 56 - Mostra a curva granulométrica da brita.



Fonte: Autor (2022).

Figura 57 - Ensaio de granulometria.



Fonte: Autor (2022).

#### 4.1.1.4 Água

Utilizou-se água (ver foto abaixo), proveniente da Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, responsável pela rede de abastecimento de água de Belo Horizonte.

Figura 58 - Mostra a água utilizada no traço e no ciclo de molhagem e secagem.



Fonte: Autor (2022).

#### 4.2 Dimensões dos corpos de prova

Para realizar as medições nos corpos de prova, o trabalho considerou os corpos de prova do tipo cilíndrico (vide foto a seguir), com as seguintes medidas conforme ABNT NBR 5738:2015 (Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova): 10x20 cm.

A opção por essa dimensão dos corpos de prova foi embasada também nas recomendações de outro estudo (Gowers e Millard, 1999), devido ao ensaio da resistividade elétrica superficial, o qual necessita de dimensões mínimas para que as linhas correntes emitidas pelo equipamento dentro do concreto se cruzem, e assim, não ocasionam modificações nos valores auferidos ao longo do ensaio.

Figura 59 - Mostra os corpos de prova cilíndricos utilizados no trabalho.



Fonte: Autor (2022).

### 4.3 Método

Foram executados dois métodos de ataques de sulfatos ao concreto para medir a resistividade elétrica superficial e resistência à compressão, são eles: inseridos no traço de moldagem e ciclos de molhagem e secagem.

No primeiro método, ocorreu a substituição de 1% e 10% na massa do agregado miúdo para simular a contaminação natural. No segundo método, foram elaboradas

duas concentrações de ataque no ciclo de molhagem, a saber: 150 mg/l e 50.000 mg/l. As soluções foram trocadas durante todo o período de teste, a cada 30 dias, para manter uma concentração suficientemente alta de sulfatos nas soluções. A série de referência não foi submetida a nenhum ataque por sulfatos.

Figura 60 - Mostra a pesagem do sulfato de magnésio.



Fonte: Autor (2022).

Logo após a concretagem, todos os corpos de prova ficaram 24h em temperatura ambiente no laboratório, e depois desse período, foram desmoldados e submetidos ao tempo de cura úmida durante 28 dias.

Figura 61 - Mostra os corpos de prova durante a cura úmida.



Fonte: Autor (2022).

Para a medição da resistividade elétrica superficial, os corpos de prova que tiveram os sulfatos inseridos foram molhados na hora com água potável (COPASA), bem como a série de referência, tendo em vista que na condição de mais saturados apresentam menor resistividade elétrica. Já os corpos de prova que sofreram os ciclos de molhagem e secagem, seguiram o método já realizado por Gans (2017): um ciclo de 7 dias, sendo 4 dias consecutivos para secar ao ar e 3 dias seguidos ininterruptos de imersão em solução. A ação dos ciclos de molhagem e secagem pode acelerar o processo de degradação do concreto severamente quando é exposto à solução de sulfato e podem fazer com que o sulfato se acumule e cristalize no concreto através de gradiente de umidade e a absorção por capilaridade. A degradação causada pelas ações combinadas de ciclos de molhagem e secagem de ataque por sulfato é proveniente principalmente da expansão física ocasionada pela cristalização de sulfato e da expansão química pelo gesso e etringita.

Os métodos que foram realizados neste trabalho estão sintetizados abaixo.

- Realizar medições da resistividade elétrica superficial em concretos expostos aos ciclos de molhagem e secagem em solução de água com sulfato de magnésio e compará-las com os corpos de prova de referência e identificar a relação entre as medidas;
- Realizar medições da resistividade elétrica superficial em concretos com sulfatos de magnésio inseridos no traço de moldagem e compará-las com os corpos de prova de referência e identificar a relação entre as medidas;
- Realizar medições da resistência à compressão em concretos expostos aos ciclos de molhagem e secagem em solução de água com sulfato de magnésio e compará-las com os corpos de prova de referência e identificar a relação entre as medidas;
- Realizar medições da resistência à compressão em concretos com sulfatos de magnésio inseridos no traço de moldagem e compará-las com os corpos de prova de referência e identificar a relação entre as medidas;
- Analisar a correlação entre os teores de sulfatos, tanto inseridos quanto nos ciclos de molhagem e secagem, com a resistividade elétrica superficial do concreto;
- Analisar a correlação entre os teores de sulfatos, tanto inseridos quanto nos ciclos de molhagem e secagem, com a resistência à compressão do concreto;
- Comparação entre as resistividades elétricas superficiais dos concretos submetidos à diferentes ataques por sulfatos, quais sejam: sulfatos inseridos no traço do concreto e ataque de sulfatos pelo ciclo de molhagem e secagem;
- Comparação entre as resistências à compressão dos concretos submetidos à diferentes ataques por sulfatos, quais sejam: sulfatos inseridos no traço do concreto e ataque de sulfatos pelo ciclo de molhagem e secagem;

Abaixo, sintetizamos, por meio de um organograma, os métodos das séries de moldagem dos corpos de prova deste estudo.

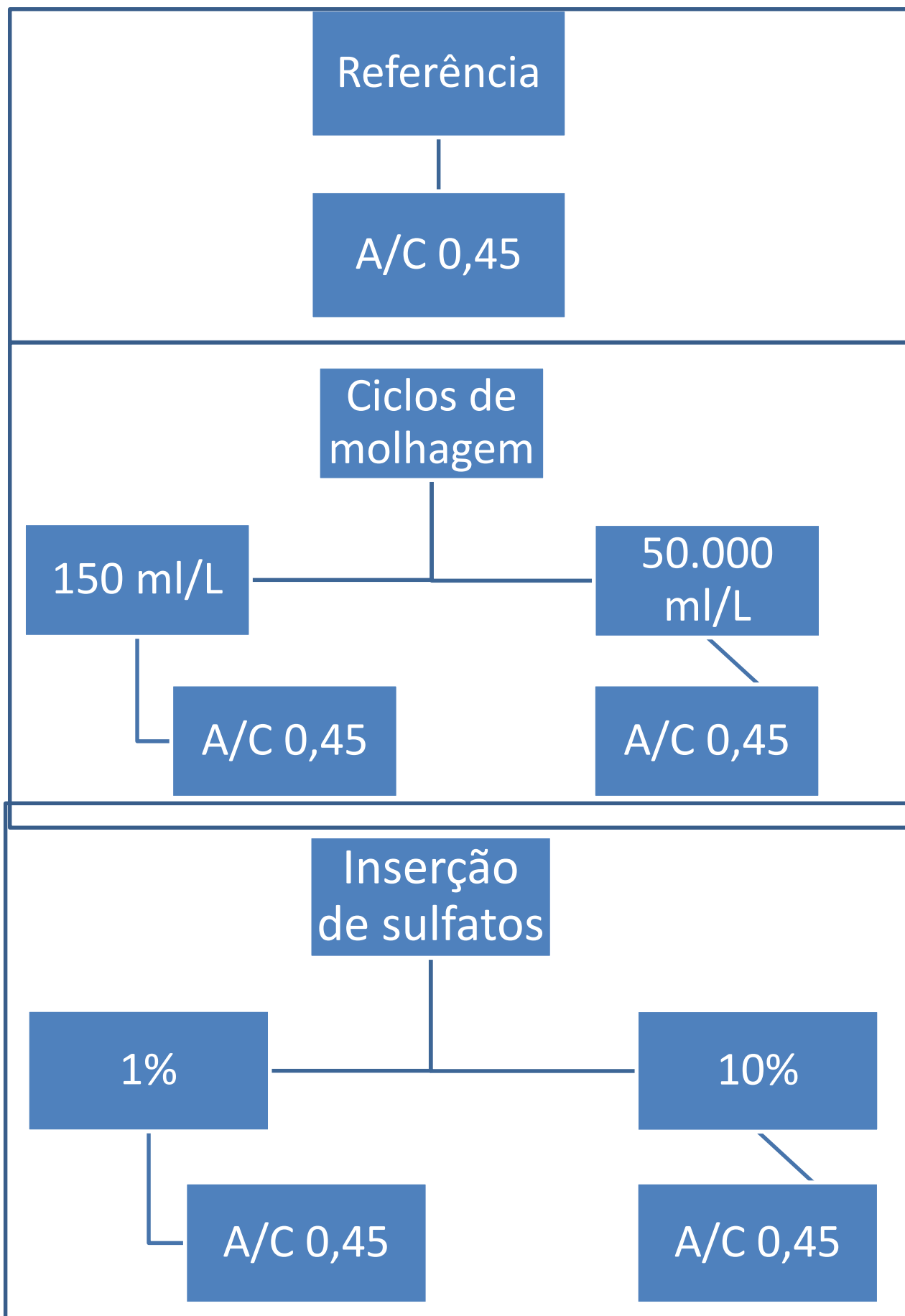




Figura 62 - Recomendações das normas nacionais e internacionais para o uso de agregados contaminados por sulfetos.

Comitê	Recomendação
Assembleia geral alemã para estudos de jazidas (1960)	Teor máximo de SO <sub>3</sub> no agregado é igual a 1% em peso total do material.
Comitê Internacional de Grandes Barragens (1965)	O teor de sulfatos e sulfetos deve ser determinado pelo método da química analítica e calculado em SO <sub>3</sub> . O valor não pode passar de 0,5% em peso dos agregados graúdos.
Norma Britânica – British Standard n° 1047	Fixa o máximo de sulfeto em 0,7% da massa total do agregado, expresso em SO <sub>3</sub> .
Regulamento Português do Betão (1971)	Para o concreto de cimento Portland as seguintes quantidades máximas de sulfeto com relação à massa de cimento: 0,2% de sulfeto para o concreto com adição de pozolana, 0,5% para concreto simples, 0,2% para concreto armado e 0,05% para concreto protendido. Para o concreto com cimento com escória de alto-forno não se tolera a presença de sulfeto no agregado.
Norma Francesa - AFNOR NF P18-540 (1997)	Para concretos hidráulicos, o limite máximo de S (enxofre) expresso em 1% de SO <sub>3</sub> ou 0,75% de pirita (FeS <sub>2</sub> ) em relação à massa de agregado.
Norma brasileira - NBR 7211 (2009)	Agregados que contenham sulfato podem ser utilizados, desde que o teor total, expresso em SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , não ultrapasse 0,1% em massa. Caso o limite seja excedido, os agregados ainda podem ser utilizados, desde que o teor, em SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , trazido ao concreto por todos os seus componentes não exceda 0,2% da massa total. O teor de sulfatos presente no agregado deve ser obtido de acordo com o procedimento da NBR 9917 (2009).
Norma Espanhola - UNE EN 1744-1(1999)	Fixa o teor máximo de SO <sub>3</sub> igual a 1% com relação ao peso total da amostra de concreto.
Instituto Americano de Concreto - ACI 201.2R-01 (1991)	Estabelece como limite 0,5% de SO <sub>3</sub> com relação ao peso total de agregado.

Fonte: Capraro (2019).

Tabela 16 - CP's a serem confeccionados no trabalho.

Condições de agressividade - Nº de corpos de prova		
Amostra	Traço	Quantidade de corpo de prova
Referência	0,45	17
150 mg/L MgSO <sub>4</sub> (Agressividade fraca)	0,45	17
50000 mg/L MgSO <sub>4</sub> (Agressividade severa)	0,45	17
Substituição de 1% da massa do agregado miúdo	0,45	17
Substituição de 10 % da massa do agregado miúdo	0,45	17
		<b>85</b>

Fonte: Autor (2022).

#### 4.4 Ensaio

O equipamento a ser utilizado no estudo foi o Resipod – Proceq, o qual possui quatro eletrodos (método dos quatro eletrodos – Wenner). É um método rápido, não destrutivo e simples para realizar a medição da resistividade elétrica superficial utilizando uma sonda com quatro eletrodos. Estes eletrodos são dispostos linearmente e equidistantes. O campo elétrico é formado a partir de uma liberação de corrente elétrica, e assim, os pontos receptores da sonda captam a diferença de potencial ocorrida. Desta forma, a metodologia dos quatro eletrodos demonstra ser altamente eficiente, fornecendo rapidamente os valores desejados e a um baixo custo quando comparado a outros ensaios realizados com frequência no concreto (Lencioni, 2011; Hornbostel, 2013).

As medições serão realizadas em 31, 150 e 272 dias, após a concretagem. Considerando as recomendações do fabricante do equipamento, serão realizadas 5 medições, alterando poucos centímetros de uma para outra, com a finalidade obter a média dos resultados. Conforme supracitado, o ensaio consiste no posicionamento de quatro eletrodos na superfície do concreto e os mesmos serão alinhados e posicionados equidistantes um do outro. Desta forma, o ensaio será realizado em corpos cilíndricos de 10x20 cm, será aplicado um coeficiente de fator de forma de 0,377, como é recomendado pela UNE 83988-2 (AENOR, 2014).

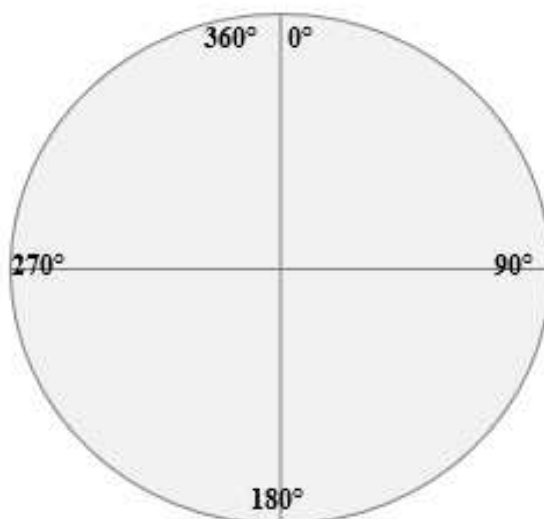
Figura 63 - Aparelho de medição de resistividade elétrica superficial.



Fonte: Autor (2022).

As medições a serem realizadas nos corpos de prova cilíndricos serão executadas em ângulos de  $90^\circ$ , conforme figura abaixo.

Figura 64 - Medições a serem realizadas nos corpos de prova cilíndricos.



A tabela a seguir apresenta a quantidade de medições realizadas no trabalho.

Tabela 17 - Quantidade de medições.

Total de medições de resistividade elétrica		
	Traço = 0,45	5 Medições por corpo de prova
	Quantidade de corpos de prova	
Referência	17	85
150 mg/L MgSO <sub>4</sub>	17	85
50.000 mg/L MgSO <sub>4</sub>	17	85
Substituição de 1% da massa do agregado miúdo	17	85
Substituição de 10 % da massa do agregado miúdo	17	85
		425

Fonte: Autor (2022).

A resistência à compressão dos concretos foi realizada em uma prensa hidráulica da SoloCap e executada conforme recomenda a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Neste ensaio foram utilizados três corpos de prova aos 34, 154 e 273 dias de cada traço. Como a resistência à compressão é um ensaio destrutivo, foi realizado primeiramente o ensaio da resistividade elétrica superficial, por isso, não foi feito aos 28 dias.

Figura 65 - Mostra a prensa hidráulica da SoloCap.



Fonte: Autor (2022).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados desta pesquisa. Inicialmente, são mostrados os resultados da resistividade elétrica, logo após, os resultados da resistência à compressão. Na sequência, são expostos os resultados da correlação entre os ensaios. Abaixo, sintetizamos, por meio de uma tabela, a legenda das séries dos corpos de prova utilizados neste trabalho.

SÉRIES (AMOSTRAS)	IDENTIFICAÇÃO
91	Referência
92	150 mg/L de MgSO <sub>4</sub> na água
93	50.000 mg/L de MgSO <sub>4</sub> na água
94	1% de MgSO <sub>4</sub> em substituição do agregado miúdo
95	10% de MgSO <sub>4</sub> em substituição do agregado miúdo

## 5.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

É apresentado nas figuras a seguir o ensaio de resistividade elétrica superficial nas condições pesquisadas. Conforme supracitado, foi realizado a cura úmida durante 28 dias e depois as amostras foram submetidas as condições de exposição.

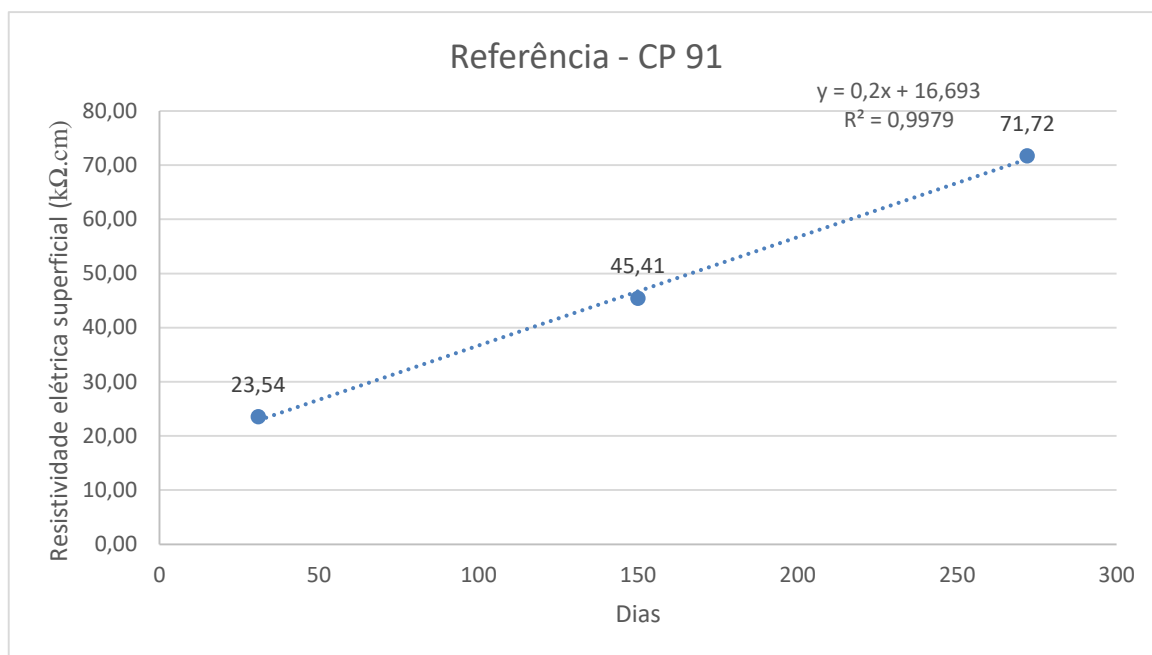
Foram realizadas cinco leituras por corpo de prova, realizando a sua respectiva média, logo após, as médias foram somadas e auferida a média final dos corpos de prova de cada idade. Assim, cada ponto no gráfico retrata a média final das respectivas leituras. As medidas da resistividade elétrica foram realizadas aos 31 dias com o intuito de caracterizar as amostras antes de serem expostas às condições de agressividade investigadas. O ensaio foi realizado aos 31 dias em função da disponibilidade do equipamento Resipod. A seguir são mostrados os gráficos de cada série analisada neste trabalho.

Figura 66 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 91 – Referência.

Dias	Nº de corpos de prova/idade	Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)
31	17	23,54
150	13	45,41
272	9	71,72

Fonte: Autor (2022).

Figura 67 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série de referência em relação ao tempo.



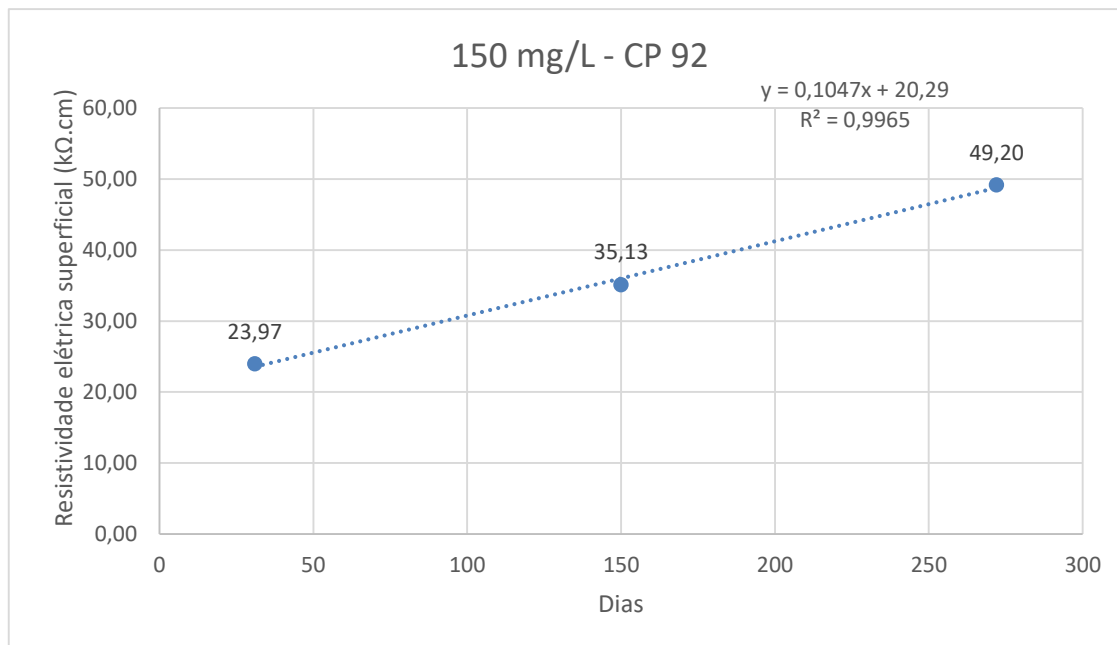
Fonte: Autor (2022).

Tabela 18 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 92 - 150 mg/L de MgSO<sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem.

Dias	Nº de corpos de prova/idade	Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)
31	17	23,97
150	13	35,13
272	9	49,20

Fonte: Autor (2022).

Figura 68 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série com 150 mg/L de MgSO<sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem em relação ao tempo.



Fonte: Autor (2022).

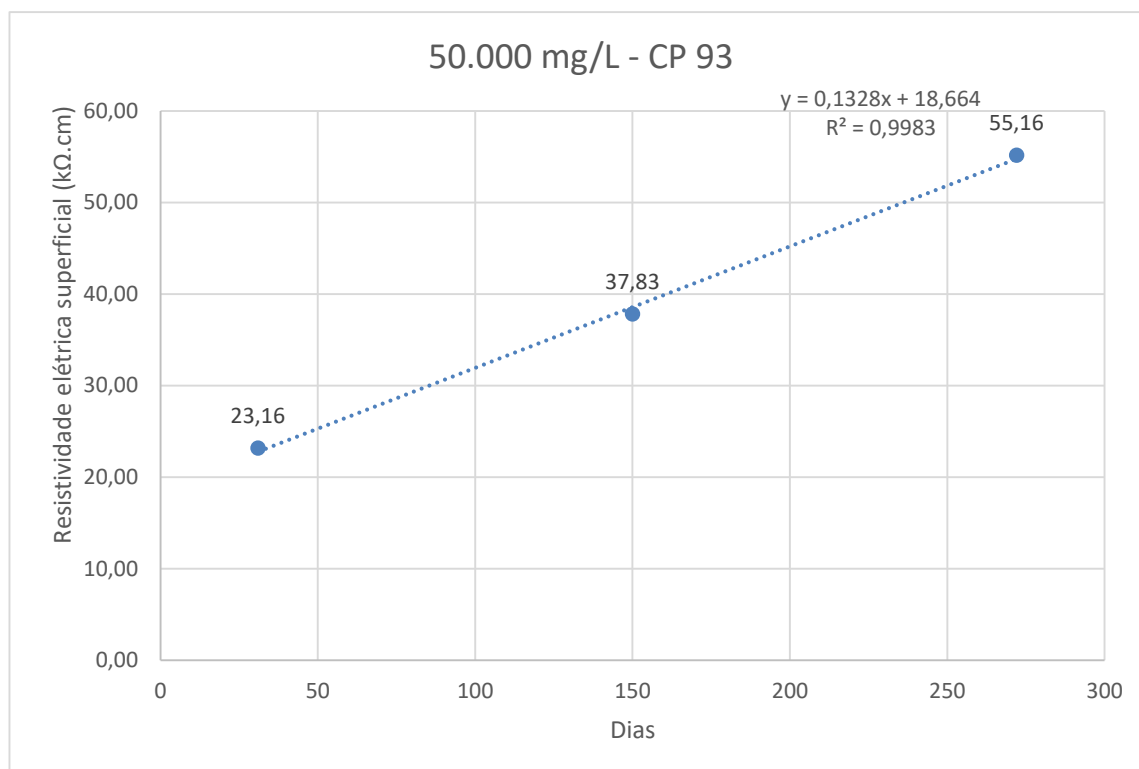
Tabela 19 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 93 - 50.000 mg/L de MgSO<sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem.

Dias	Nº de corpos de prova/idade	Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)
31	17	23,16
150	13	37,83
272	9	55,16

Fonte: Autor (2022).



Figura 69 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série com 50.000 mg/L de MgSO<sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem em relação ao tempo.



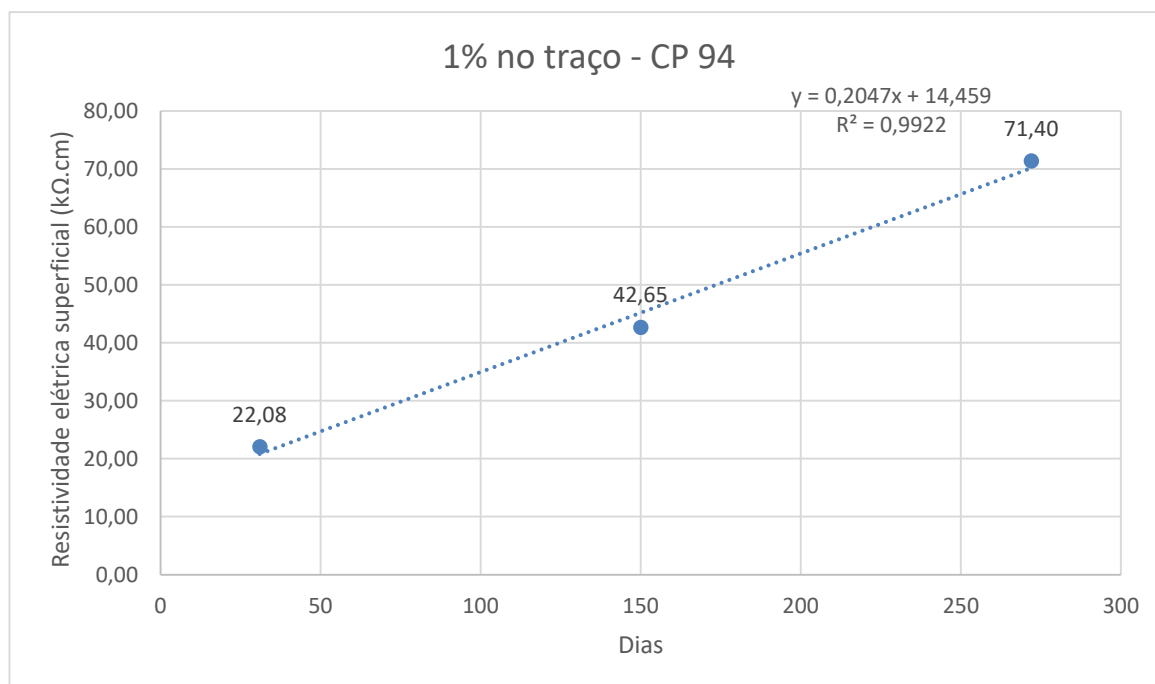
Fonte: Autor (2022).

Tabela 20 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 94 - 1% de MgSO<sub>4</sub> inserido no traço.

Dias	Nº de corpos de prova/idade	Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)
31	17	22,08
150	13	42,65
272	9	71,40

Fonte: Autor (2022).

Figura 70 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série com 1% de MgSO<sub>4</sub> inserido no traço em relação ao tempo.



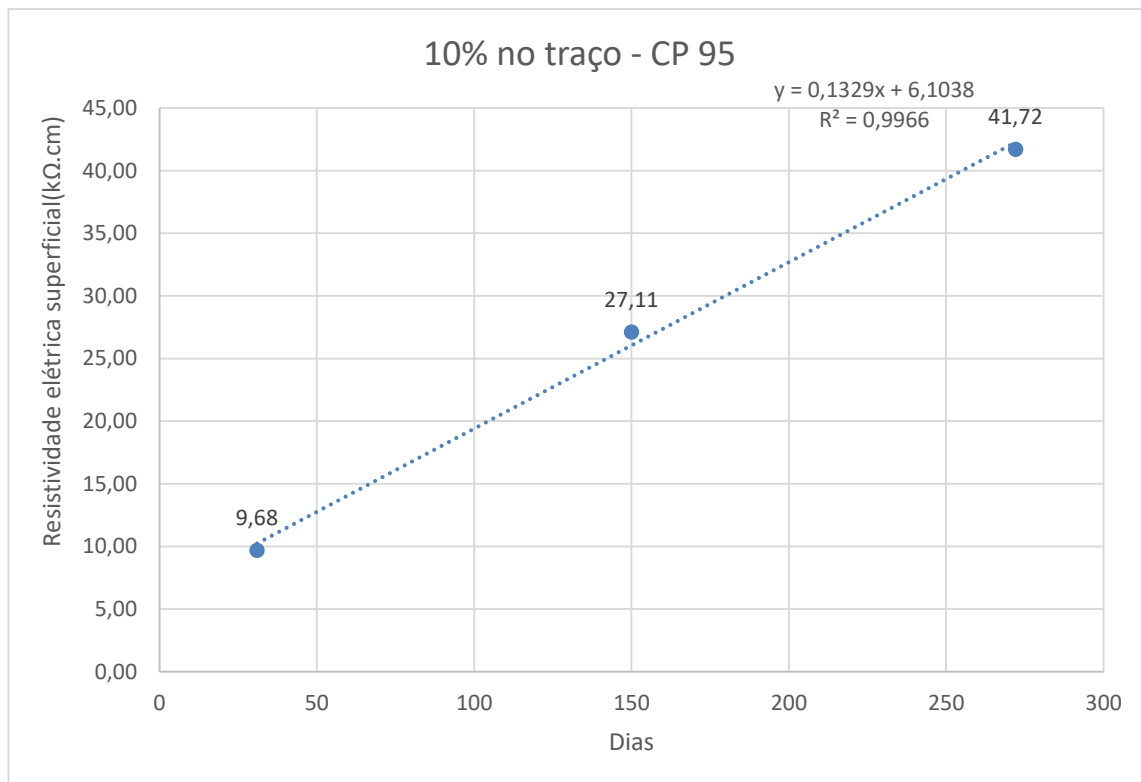
Fonte: Autor (2022).

Tabela 21 - Mostra a média geral dos corpos de prova para cada idade analisada da série 95 -10% de MgSO<sub>4</sub> inserido no traço.

Dias	Nº de corpos de prova/idade	Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)
31	17	9,68
150	13	27,11
272	9	41,72

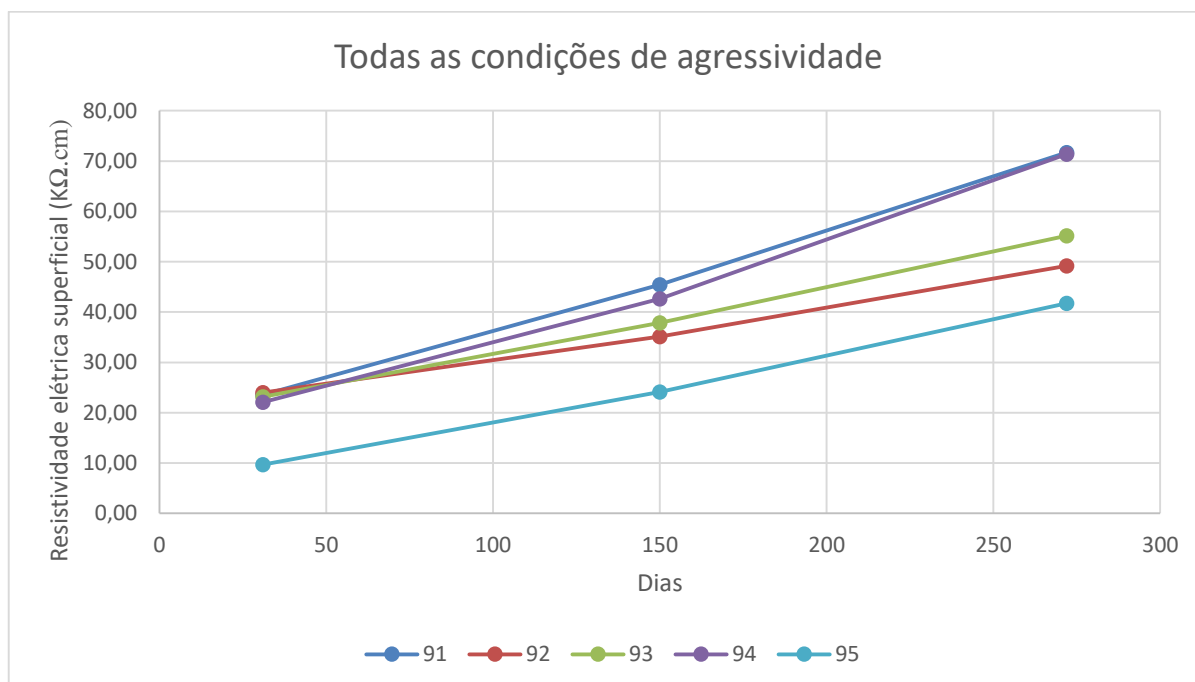
Fonte: Autor (2022).

Figura 71 - Gráfico da correlação da resistividade elétrica superficial da série com 10% de MgSO<sub>4</sub> inserido no traço em relação ao tempo.



Fonte: Autor (2022).

Figura 72 - Gráfico do resultado da resistividade elétrica superficial de todas as séries em relação ao tempo.



Fonte: Autor (2022).

Conforme a análise dos gráficos acima, a resistividade elétrica aumentou ao longo do tempo, o que, segundo Lubeck *et al.*, (2012), é similar aos resultados anteriores que mostram tendências semelhantes devido à redução da condutividade elétrica nos poros. Outros fatores que influenciam no crescimento da resistividade elétrica para todas as amostras estudadas são a hidratação do cimento e o endurecimento progressivo do concreto, principalmente após os 28 dias (Carla Cavalcanti *et al.*, 2022). Esse desempenho também está de acordo com outras pesquisas, a saber: Presuel-Moreno *et al.*, 2013; Medeiros Junior *et al.*, (2014); e Andrade e D'Andrea, 2011.

Percebe-se que, quando as amostras são submetidas as condições de agressividade, a resistividade elétrica superficial é menor em relação à série de referência (CP 91). Este fato também foi verificado por Saleem *et al.*, (1996), onde aponta que a consequência do ataque de sulfatos resulta na diminuição da resistividade elétrica superficial, conseqüentemente, aumenta a tendência a corrosão do concreto.

## 5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

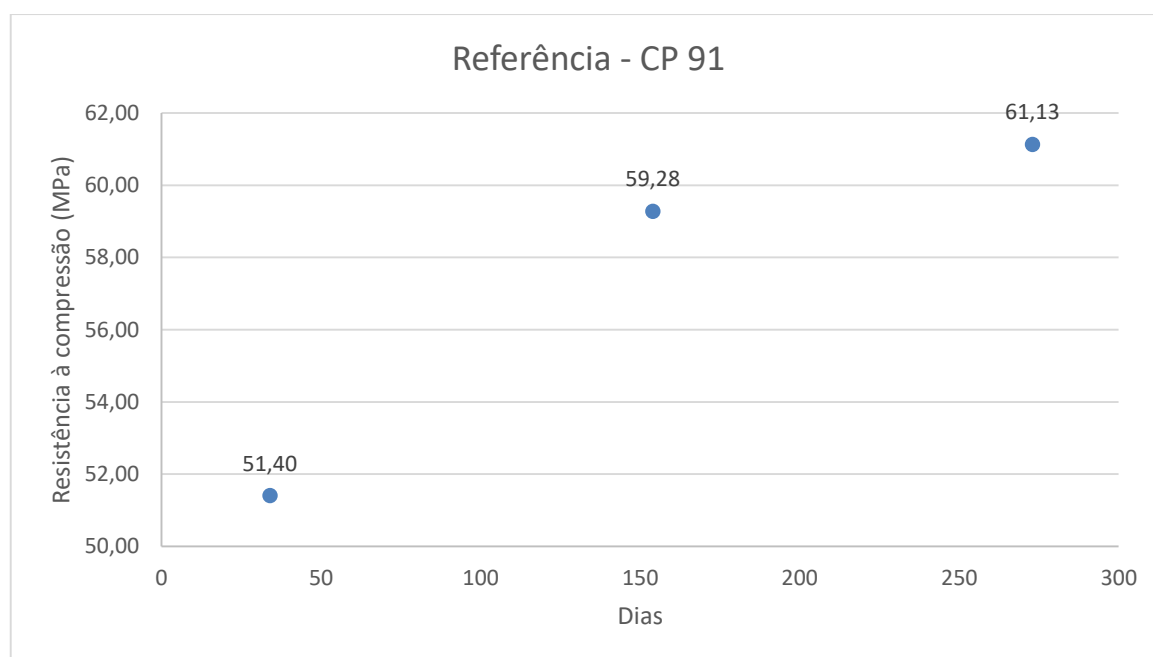
Os ensaios de resistência à compressão dos concretos foram realizados nas idades de 34, 154 e 273 dias, sendo rompidos três corpos de prova por traço em cada idade. Serão apresentados os resultados das médias auferidas nas idades analisadas de cada série, e em seguida, o gráfico da resistência à compressão em relação ao tempo.

Tabela 22 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 91 – Referência.

Dias	Resistência à compressão (MPa)
34	51,40
154	59,28
273	61,13

Fonte: Autor (2022).

Figura 73 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série de referência em relação ao tempo.



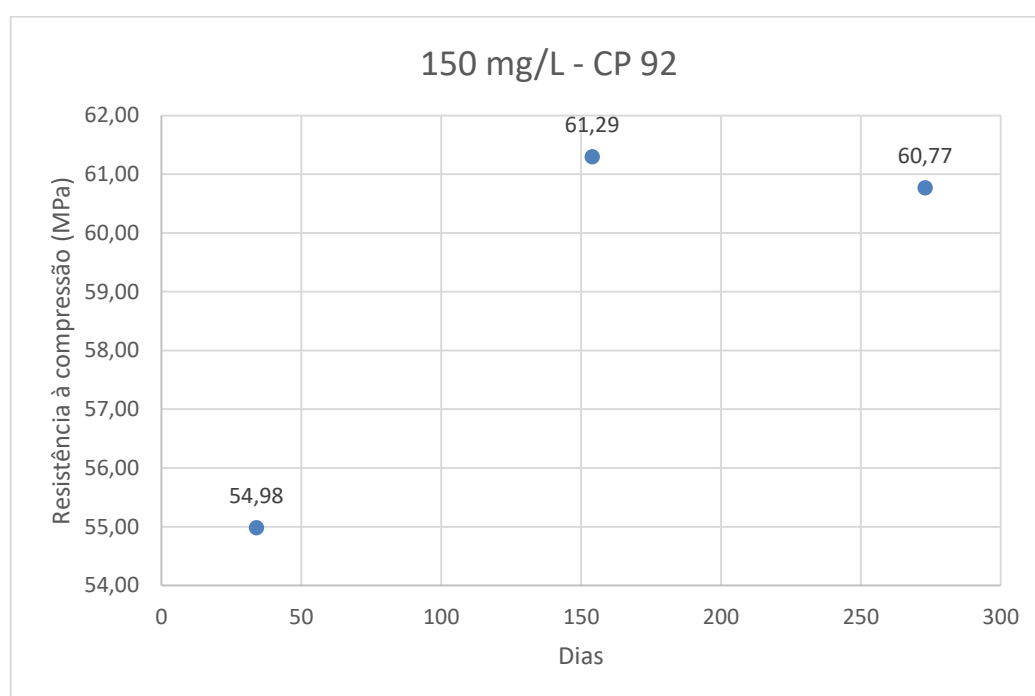
Fonte: Autor (2022).

Tabela 23 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 92 - 150 mg/L de MgSO<sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem.

Dias	Resistência à compressão (MPa)
34	54,98
154	61,29
273	60,77

Fonte: Autor (2022).

Figura 74 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série com 150 mg/L de MgSO<sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem em relação ao tempo.



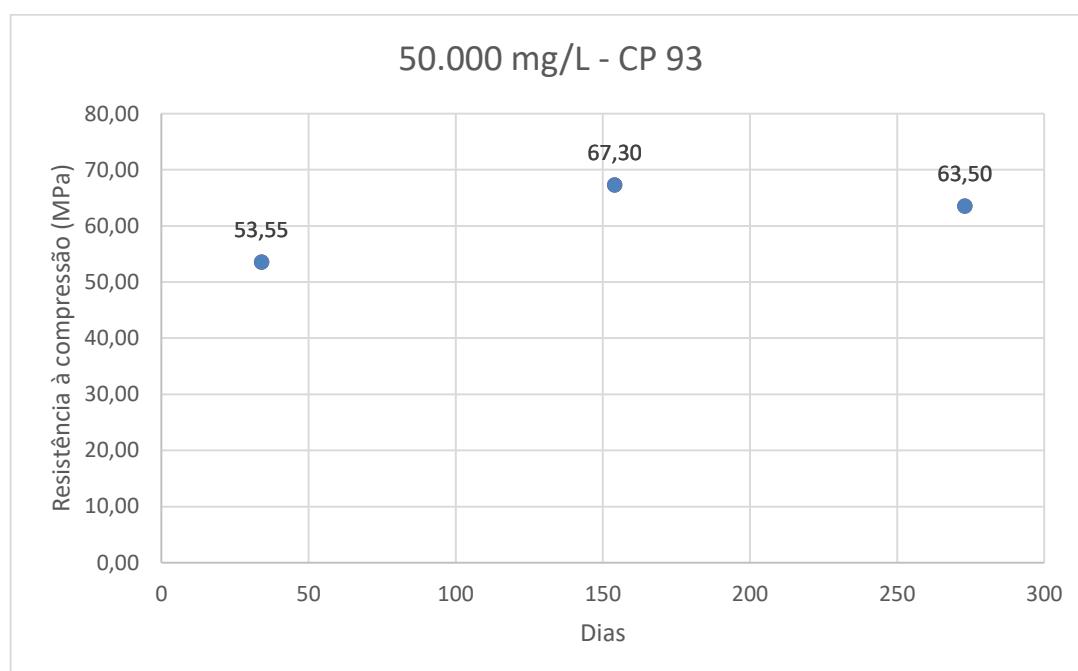
Fonte: Autor (2022).

Tabela 24 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 93 - 50.000 mg/L de MgSO<sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem.

Dias	Resistência à compressão (MPa)
34	53,55
154	67,30
273	63,50

Fonte: Autor (2022).

Figura 75 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série com 50.000 mg/L de MgSO<sub>4</sub> no ciclo de molhagem e secagem em relação ao tempo.



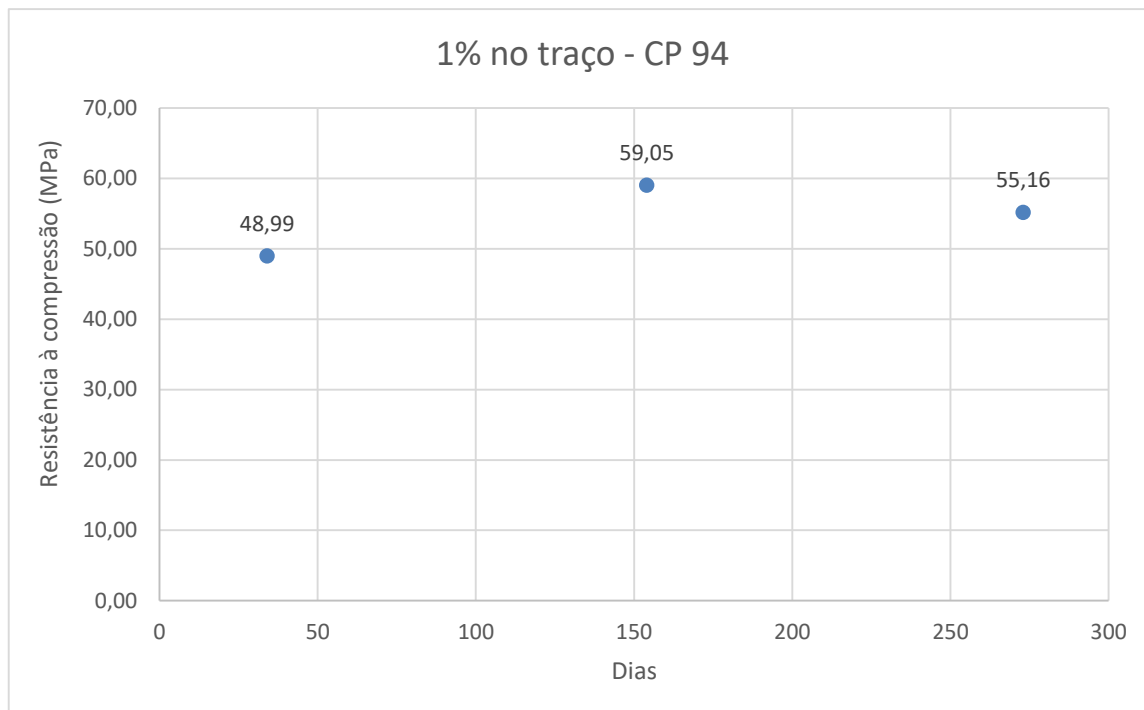
Fonte: Autor (2022).

Tabela 25 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 94 - 1% de MgSO<sub>4</sub> inserido no traço.

Dias	Resistência à compressão (MPa)
34	48,99
154	59,05
273	55,16

Fonte: Autor (2022).

Figura 76 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série com 1% de MgSO<sub>4</sub> inserido no traço em relação ao tempo.



Fonte: Autor (2022).

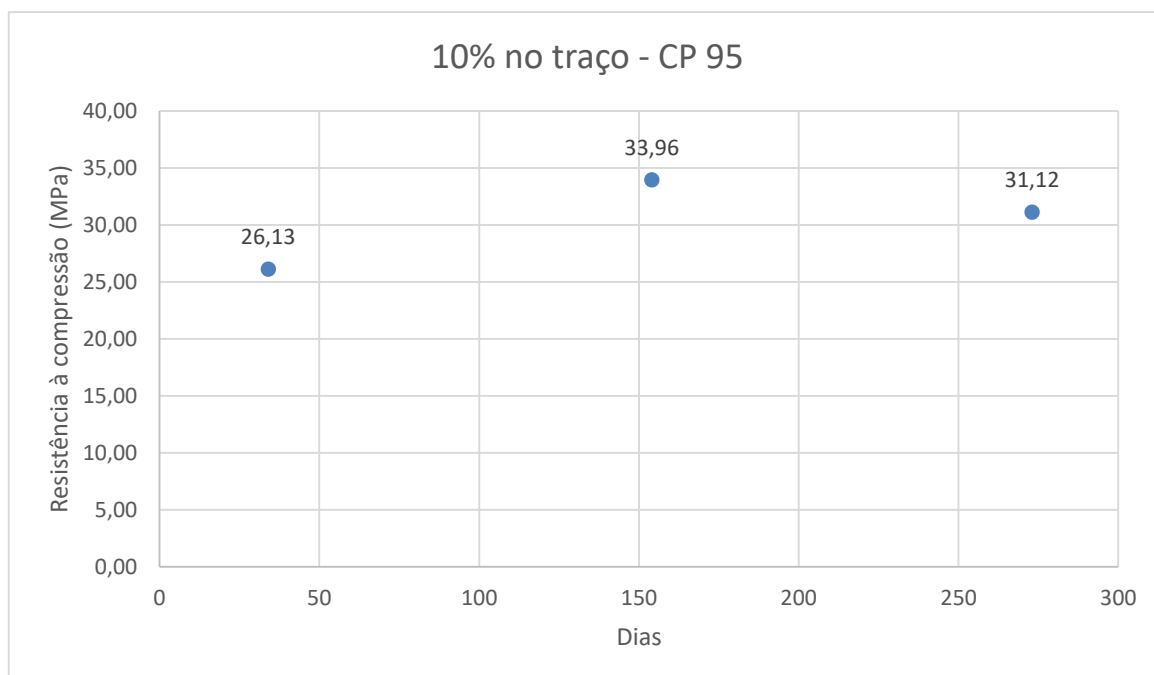
Tabela 26 - Mostra a média dos três corpos de prova para cada idade analisada na série CP 95 - 10% de MgSO<sub>4</sub> inserido no traço.

Dias	Resistência à compressão (MPa)
34	26,13
154	33,96
273	31,12

Fonte: Autor (2022).

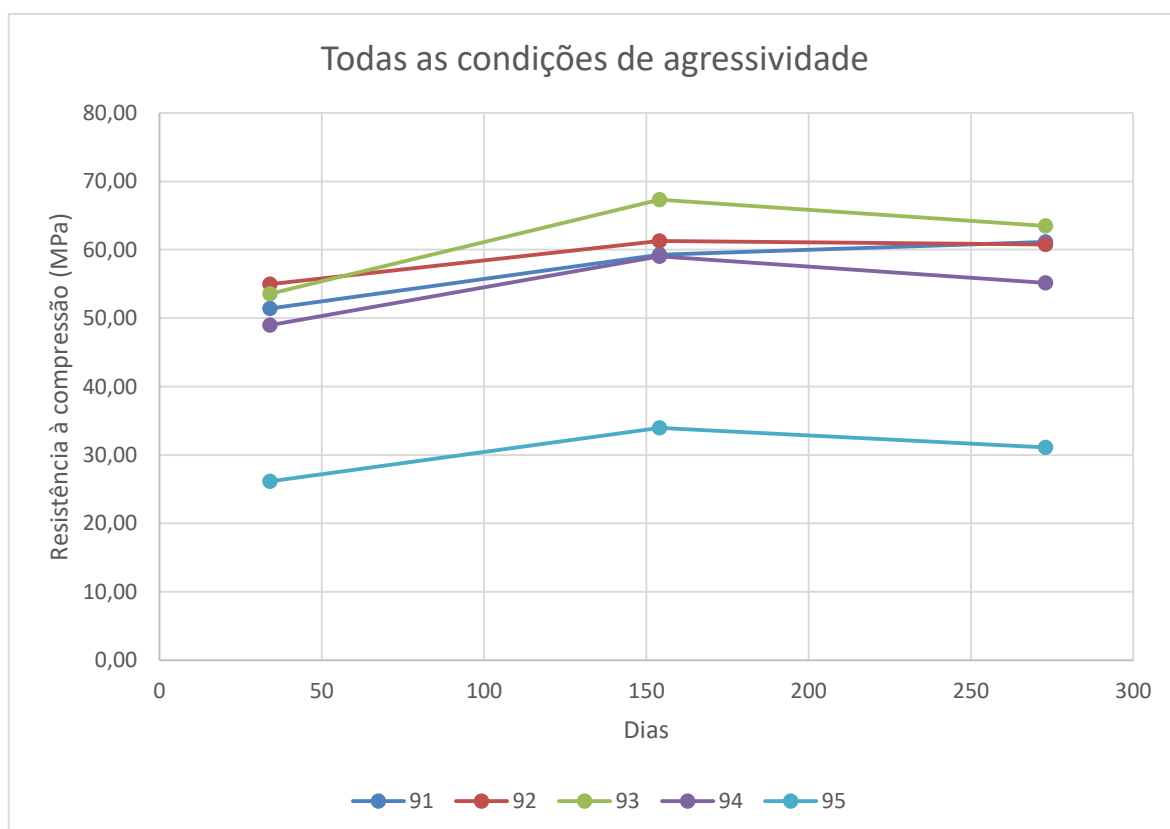


Figura 77 - Gráfico do resultado da resistência à compressão da série com 10% de MgSO<sub>4</sub> inserido no traço em relação ao tempo.



Fonte: Autor (2022).

Figura 78 - Gráfico do resultado da resistência à compressão de todas as séries em relação ao tempo.



Fonte: Autor (2022).

Conforme aumenta a idade, a amostra de referência aumenta a sua resistência à compressão. A resistência aos 273 dias foi 19% maior que a resistência do mesmo concreto aos 34 dias. O aumento da tendência é explicado pelo fato da resistência à compressão está correlacionada a relação sólido/espáço. Quanto maior essa relação, haverá mais produtos de hidratação e, conseqüentemente, maior resistência do concreto.

As amostras que foram submetidas as condições de agressividade apresentaram menores valores de resistência à compressão aos 273 dias se comparado com a idade anterior, 154 dias. Segundo os pesquisadores Jiang e Niu (2016), o que acontece são os três períodos: período de acréscimo, período de redução e período acelerado de redução. O período de acréscimo acontece nos primeiros 60 dias, quando a resistência à compressão aumenta devido à densificação dos poros. No período de redução, a amostra apresenta uma queda constante de resistência, e no último período, o período acelerado, a taxa de degradação torna-se acelerada após os 180 dias de idade.

Nas amostras da série CP 92, houve uma redução de 1% na comparação das idades de 273 dias e 154 dias. Na série CP 93, a comparação da resistência à compressão nas idades supracitadas decresceu 6%. Na série CP 94, houve uma redução de 7%. E por fim, na série CP 95 houve uma diminuição de 9%.

Medeiros *et al.*, (2022), apesar de terem usado o sulfato de sódio na pesquisa, obtiveram também o resultado que a resistência à compressão foi menor em relação à amostra de referência. De acordo com os pesquisadores, isso ocorre pelo fato da formação das fases expansivas e conseqüente fissuração no concreto. A etringita é a principal causa da evolução do dano, além da formação de subprodutos provocarem tensões de cristalização gerando fissuras.

Os corpos de prova que foram submetidos ao ataque de sulfato de magnésio, apresentam uma aparência esbranquiçada. Segundo Neville (1997), o concreto começa a deteriorar nos cantos e nas arestas, posteriormente, ocorre uma fissuração progressiva e lascamento proporcionando ao concreto uma condição friável ou mole. Através da análise visual dos corpos de prova rompidos aos 273 dias verificamos esse aspecto visualmente, conforme figuras abaixo.

Figura 79 - Mostra o corpo de prova CP 95 rompido aos 273 dias.



Fonte: Autor (2022).

Figura 80 - Mostra outro corpo de prova CP 95 rompido aos 273 dias.



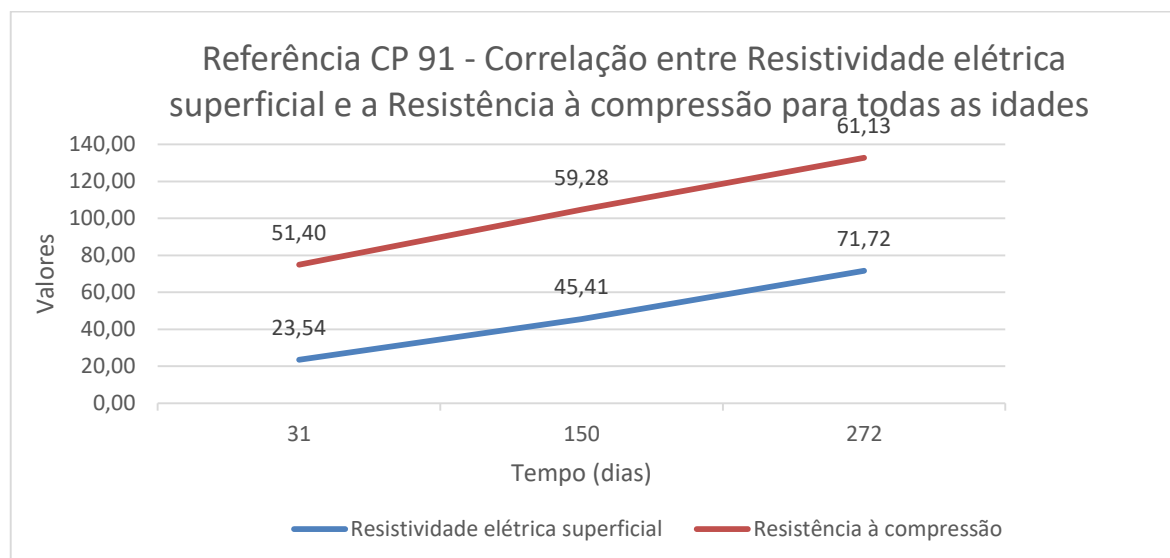
Fonte: Autor (2022).

Desta forma, pode-se concluir que os concretos expostos aos ataques de sulfatos tiveram alterações microestruturais significativas, provocando diferentes resultados no período investigado de 273 dias.

### 5.3 CORRELAÇÃO ENTRE A RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

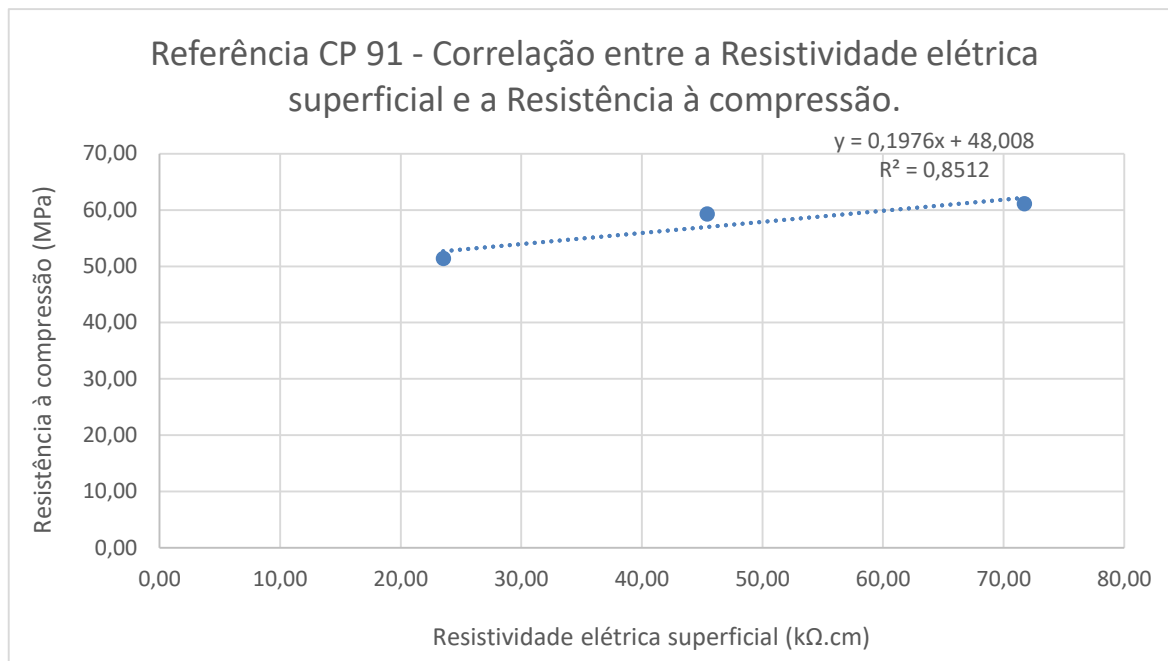
A seguir são apresentadas as curvas de correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as condições de agressividade investigadas em todas as idades e a correlação entre as duas propriedades para determinar o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Figura 81 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série de referência - CP 91.



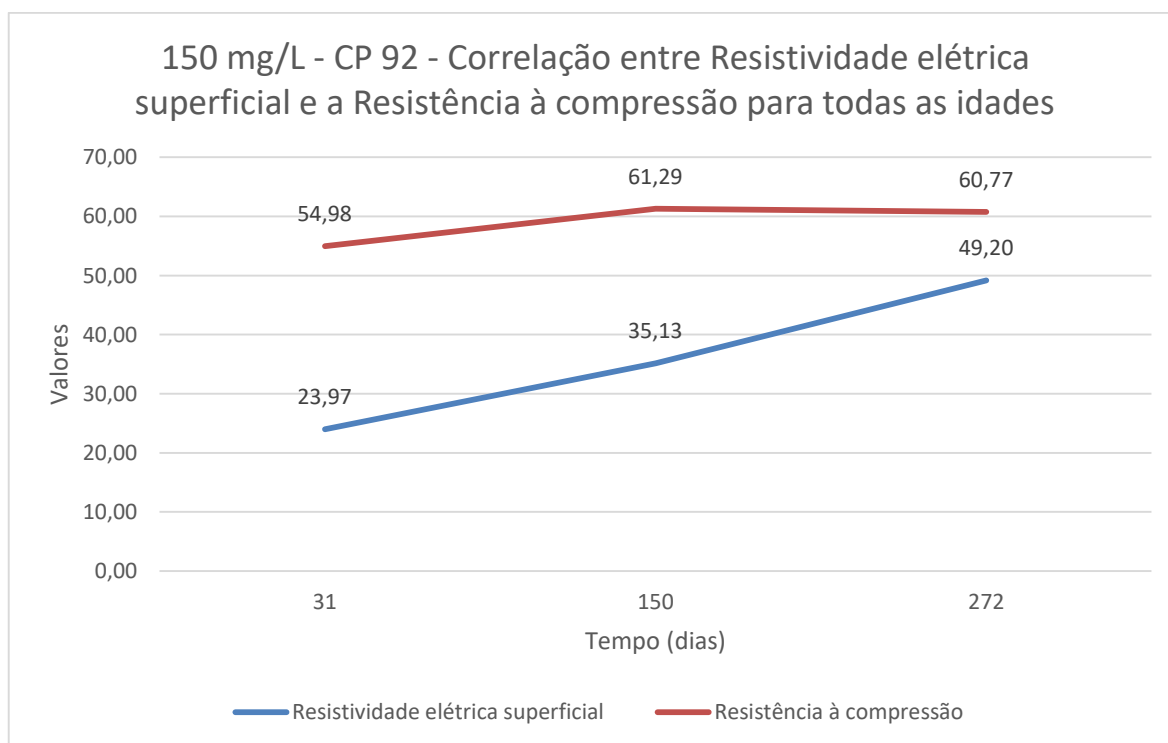
Fonte: Autor (2022).

Figura 82 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série de referência - CP 91.



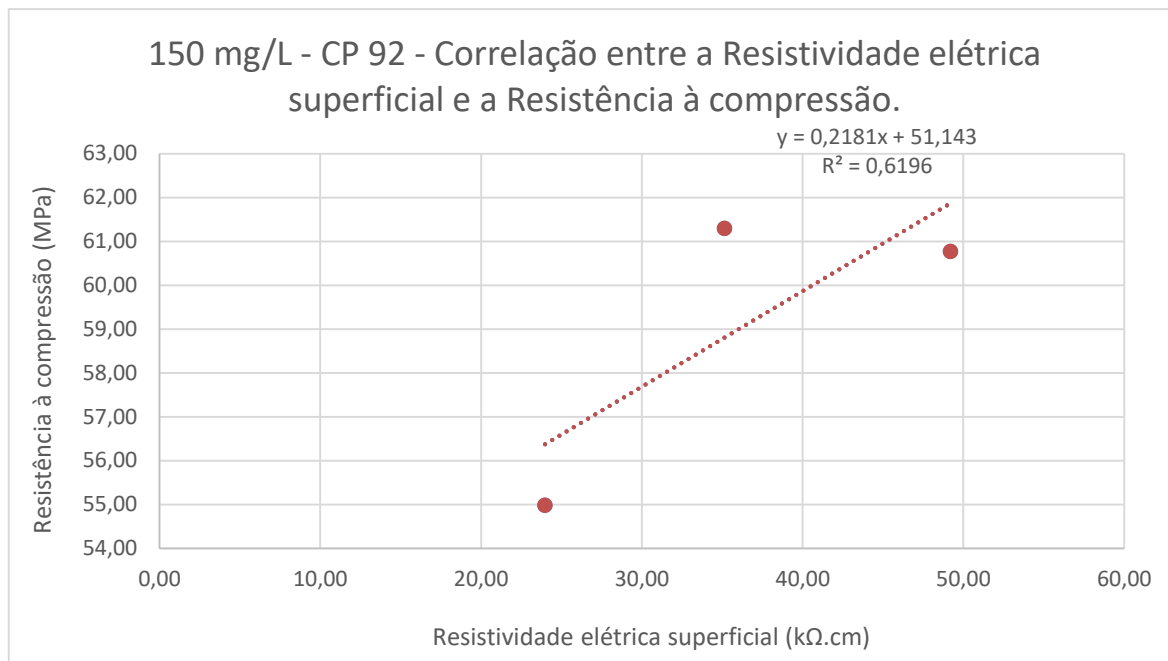
Fonte: Autor (2022).

Figura 83 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série CP 92 – 150mg/L de MgSO<sub>4</sub>.



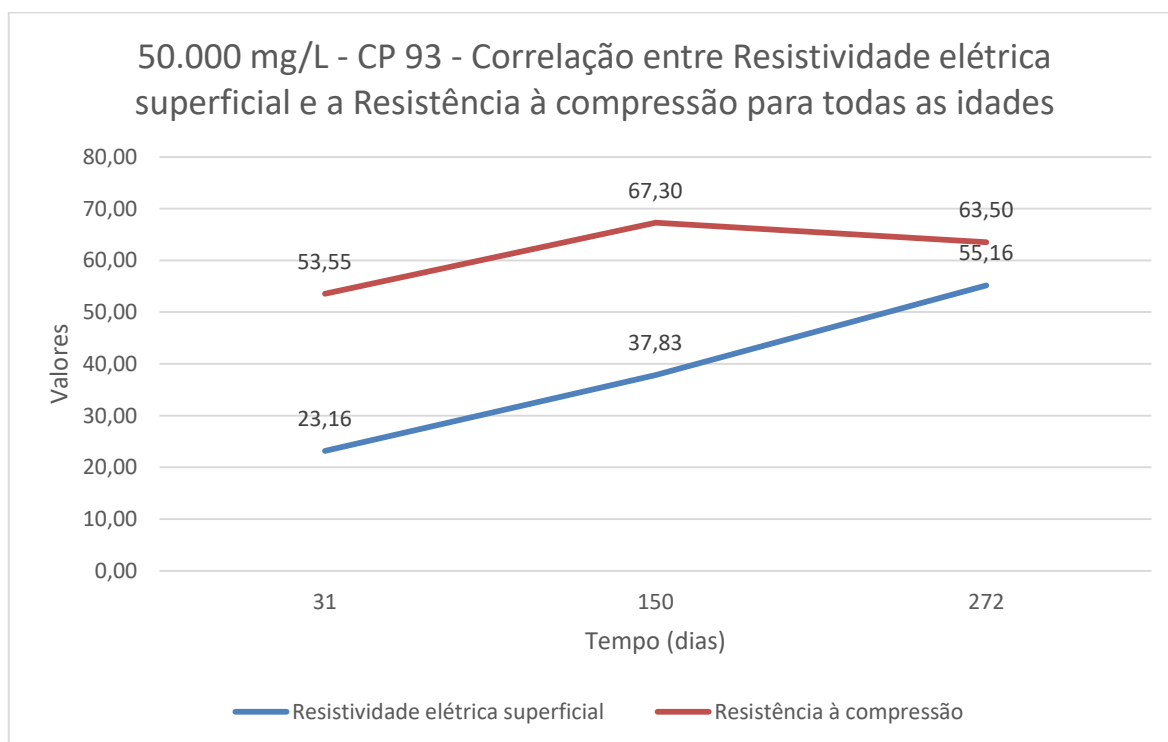
Fonte: Autor (2022).

Figura 84 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série CP 92 – 150mg/L de MgSO<sub>4</sub>.



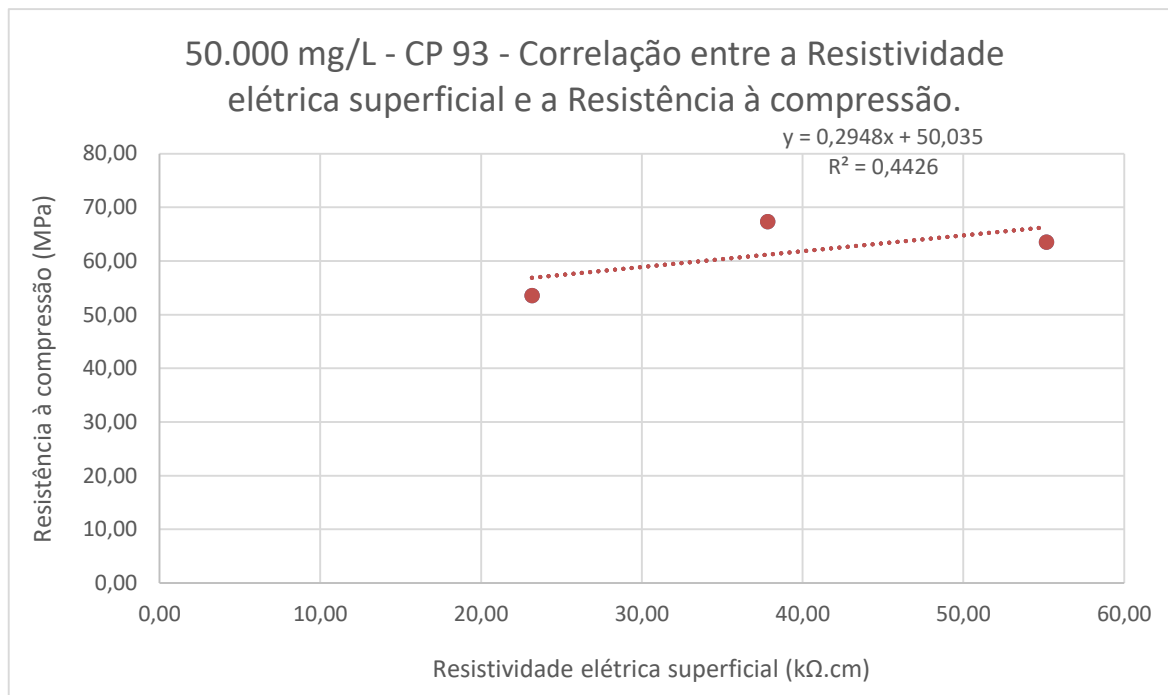
Fonte: Autor (2022).

Figura 85 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série CP 93 – 50.000 mg/L de MgSO<sub>4</sub>.



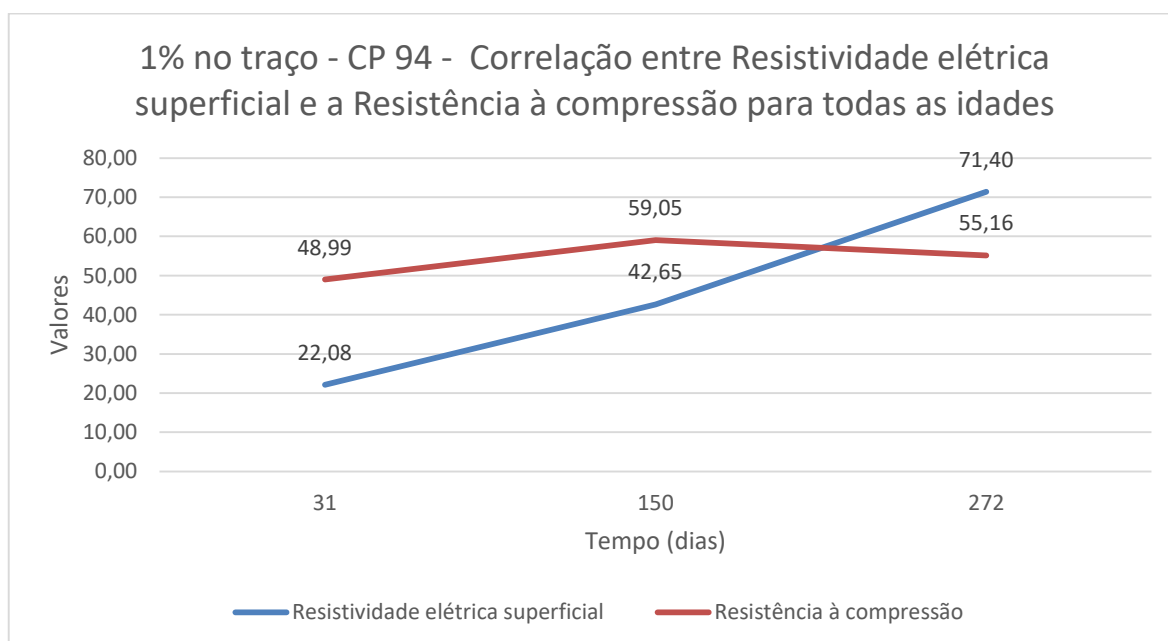
Fonte: Autor (2022).

Figura 86 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série CP 93 – 50.000 mg/L de MgSO<sub>4</sub>.



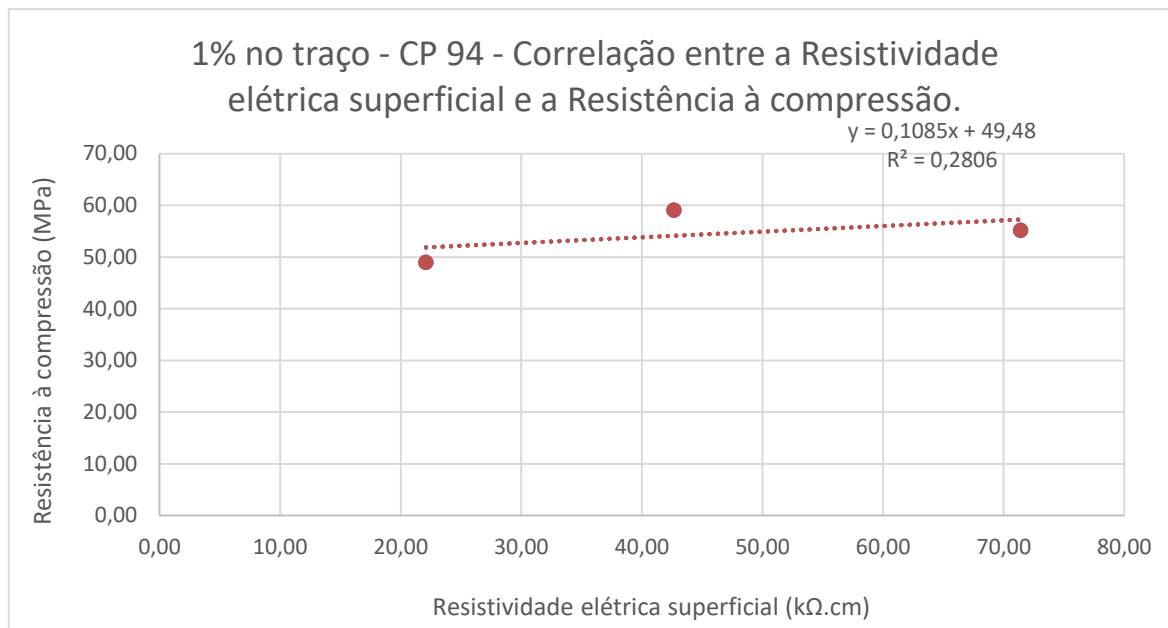
Fonte: Autor (2022).

Figura 87 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série CP 94 – 1% de MgSO<sub>4</sub> no traço.



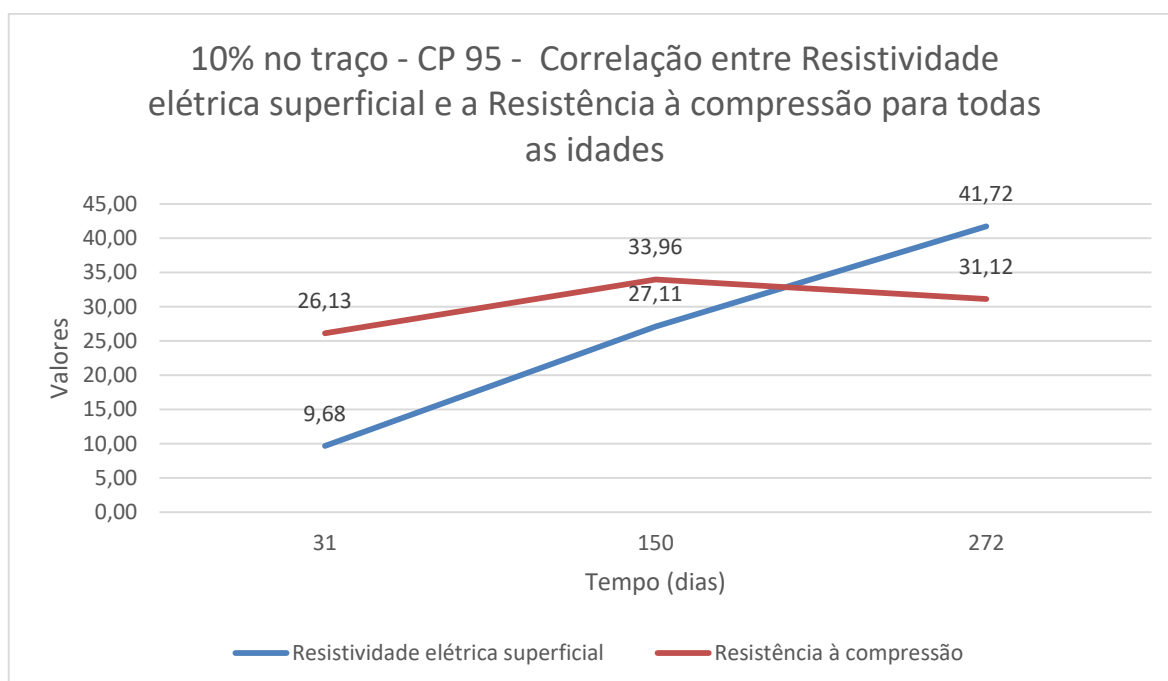
Fonte: Autor (2022).

Figura 88 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série CP 94 – 1% de MgSO4 no traço.



Fonte: Autor (2022).

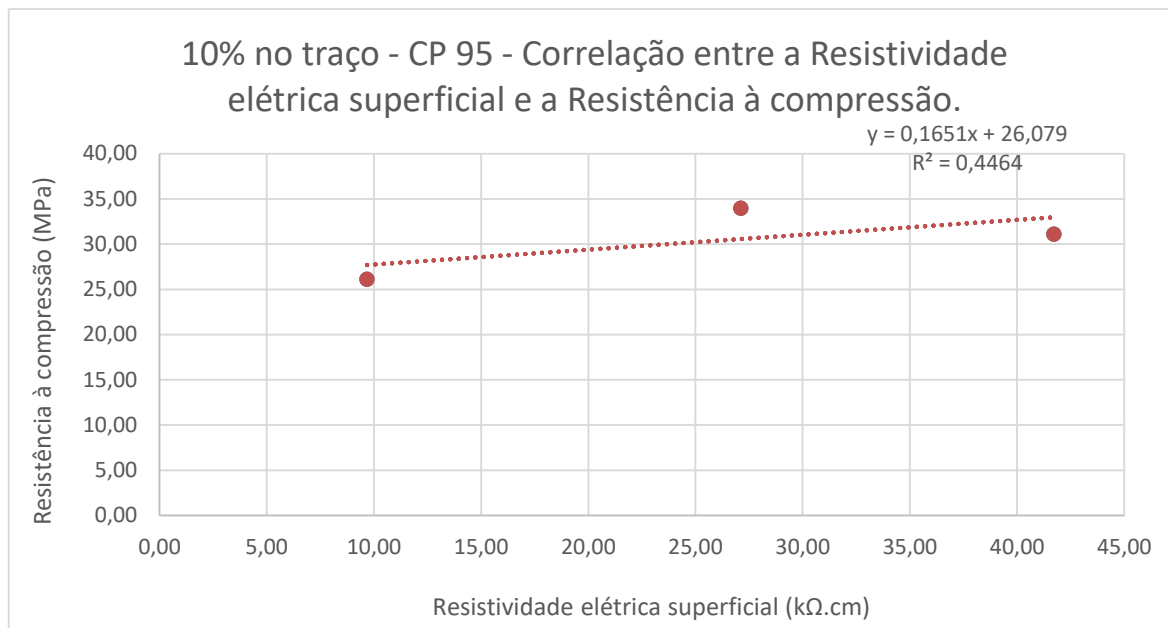
Figura 89 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão para todas as idades da série CP 95 - 10% de MgSO4 no traço.



Fonte: Autor (2022).



Figura 90 - Correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão da série CP 95 - 10% de MgSO4 no traço.



Fonte: Autor (2022).

De acordo com as figuras 73 a 82, foi encontrada a melhor correlação na série de referência (CP 91), ou seja, o coeficiente de determinação,  $R^2$ , igual a 0,85. Isso mostra que a variação da resistividade elétrica superficial pode ser explicada pela relação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão, o que significa que os mesmos fatores influenciam nas duas propriedades. Ambos os parâmetros são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior a resistência à compressão, maior a resistividade elétrica. Lubeck *et al.*, (2012) e Dinakar *et al.*, (2007) também observaram esta correlação, o que mostra a influência da porosidade nas duas propriedades. Em relação às séries que foram submetidas aos ataques de sulfatos, o coeficiente de determinação foram mais baixos, sinalizando que a resistividade elétrica superficial não explica tanto a resistência à compressão, sobretudo, quando há a inserção de 10% no traço – CP 95.

O resultado do coeficiente de determinação variou de acordo com cada ataque, mostrando as particularidades de cada intensidade, bem como as suas respectivas alterações microestruturais. Portanto, pode-se dizer que melhor a relação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão são nas amostras de referência.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fazendo uma comparação entre a correlação da resistência à compressão e o ataque de sulfatos com a correlação da resistividade elétrica com o ataque de sulfatos, pode-se verificar que o fator tempo é significativo para fazer com que haja uma relação visível entre os dois ensaios para ocorrer a queda dos valores. À luz das referências bibliográficas, a justificativa para o tempo ser uma variável determinante na queda das propriedades citadas, é que com o efeito expansivo provocado pelas reações dos íons sulfatos com a matriz cimentícia, ocorre inicialmente a cristalização de produtos nos poros e um aumento na sua condutividade elétrica. Logo após, ocorrem as fissuras e trincas, o que gera a falta de coesão no concreto, resultando ao longo do tempo, a perda progressiva da resistência à compressão e a diminuição da resistividade elétrica.

A resistividade elétrica do concreto é uma propriedade extremamente sensível às características microestruturais da matriz cimentícia. Fatores relacionados à estrutura de poros, à composição e à concentração da água livre presente nos poros do concreto e às características ambientais às quais o concreto está submetido apresentam reflexos diretos na resistividade do concreto. De uma forma mais abrangente, pode-se afirmar que a resistividade elétrica apresenta grande sensibilidade a fatores que indicam a capacidade do concreto em resistir à penetração de substâncias líquidas ou gasosas. Essa propriedade é fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do material e, no caso do concreto armado, está intimamente relacionada à penetração de agentes agressivos no seu interior e também à velocidade do processo de corrosão das armaduras, a partir do momento em que ela se inicie. Por esses motivos, a resistividade elétrica constitui-se em um parâmetro que abrange propriedades fundamentais relacionadas à durabilidade das estruturas de concreto armado.

A resistividade pode ser utilizada como parâmetro de previsão da vida útil de estruturas existentes, a partir de ensaios não destrutivos de fácil execução que podem ser realizados *in loco*. É necessário, no entanto, observar que fatores ambientais, como a temperatura e a umidade relativa do ambiente, têm grande

influência na resistividade, uma vez que alteram a mobilidade iônica e a concentração da solução do poro. Devido à dificuldade de mensurar todos os efeitos relacionados às variações de temperatura que podem alterar a resistividade do concreto, para que a resistividade seja utilizada como um parâmetro de caracterização da microestrutura do concreto e da sua vida útil, faz-se necessário padronizar a temperatura e umidade relativa.

Analisando os gráficos de resistividade elétrica superficial em função do tempo, nota-se que essa propriedade do concreto cresce consideravelmente em todas as séries estudadas, mostrando que as duas variáveis são muito correlacionadas, tendo o coeficiente de determinação próximo de 1. Ou seja, quanto maior o tempo, maior será a resistividade elétrica superficial. Em todas as condições de agressividade analisadas, os corpos de prova, aos 272 dias, obtiveram a indicação da corrosão como desprezível, conforme mostrado na figura 49.

Mesmo com a formação de elementos danosos ao concreto, como por exemplo, etringita e taumasita, que geram fissuras e trincas no mesmo, proporcionando queda na coesão, não foi identificado nos gráficos a queda dos valores da resistividade elétrica superficial. Como supramencionado, o fator tempo é uma variável que influencia nesta propriedade, então, acredita-se que o intervalo analisado neste trabalho não foi o suficiente para visualizar a diminuição desta propriedade.

A resistência à compressão cresceu até os 150 dias, atingindo o seu pico nas séries que sofreram as condições de agressividade. Após atingir o valor máximo, a resistência começou a cair. Em relação à série de referência, os valores da resistência à compressão continuaram crescendo. O comportamento do gráfico das séries que foram atacadas pelo sulfato de magnésio é similar ao encontrado por Gans (2017), onde há uma crescente dos valores da resistência à compressão e após um certo tempo, esses valores abaixam. Isso se deve a formação etringita e taumasita, que geraram a queda na coesão do concreto e, conseqüentemente, a diminuição das suas respectivas resistências.

Quanto às amostras que foram submetidas aos ciclos de molhagem e secagem, apesar do CP 92 (150 mg/l) ter sofrido um ataque 300 vezes menor que o CP 93

(50.000 mg/l), pode-se dizer que os resultados foram os mesmos, havendo pouca variação na três idades analisadas. Acredita-se que o intervalo analisado neste trabalho não foi o suficiente para visualizar a diferença entre as séries.

Em relação às amostras que tiveram os sulfatos de magnésio inseridos no traço, notou-se uma diferença significativa entre as séries analisadas. O CP 95 (10% de substituição no traço) foi atacado 10 vezes mais que o CP 94 (1% de substituição no traço) e isso resultou na grande variação dos valores de resistência à compressão quando comparados. No gráfico, verifica-se que ambas as séries também atingem o pico da resistência e depois começam a descer. A substituição de 10% de sulfato de magnésio no traço é tão forte que o concreto, aos 34 dias, obteve um valor de 26,13 MPa com o cimento CP V RS. Já aos 273 dias, este mesmo concreto atingiu 31,12 MPa, ou seja, em uma diferença de 239 dias, apresentou uma variação de aproximadamente 20%, o que resultou em uma resistência muito baixa. Outro ponto importante de mencionar é que aos 154 dias, o concreto estava com 33,96 MPa, então, a diferença da terceira idade analisada (273 dias) para a segunda (154 dias), houve um decréscimo de, aproximadamente, 10%, a maior se comparada com as demais.

A correlação da resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão foi maior na série de referência – CP 91, tendo como resultado do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) o valor de 0,85. Isso se dá pelo fato das duas propriedades estarem crescendo ao longo do tempo, fazendo com que o coeficiente angular seja sempre positivo. Assim, através da medição da resistividade elétrica superficial, existe a possibilidade de estimar a resistência à compressão. Nas demais séries, os coeficientes de determinação foram mais baixos, mostrando que os ataques de sulfatos de magnésio influenciam diretamente nos resultados. Comparando as agressividades fracas, nota-se que os ciclos de molhagem e secagem com 150 mg/l (CP 92) obteve um  $R^2$  maior que a inserção de 1% no traço (CP 94), sinalizando que o ataque interno teve maior influência nas alterações microestruturais, prejudicando na leitura da resistividade elétrica superficial para a estimativa da resistência à compressão.

Em relação às agressividades fortes, verificou-se que os ciclos de molhagem e secagem com 50.000 mg/l (CP 93) obteve um  $R^2$  equivalente ao CP 95 - inserção

de 10% no traço, mostrando que os ataques tiveram praticamente o mesmo efeito na mudança da microestrutura do concreto.

Os resultados alcançados mostram que a resistência à compressão é extremamente sensível as mudanças microestruturais. Em relação à resistividade elétrica superficial, não foi possível identificar tal alteração, pelo fato do tempo para a realização dos ensaios ter sido curto, e também por causa da hidratação do cimento e o endurecimento do concreto, que tendem a incrementar a resistividade elétrica ao longo dos dias. Mas com a perda de coesão do concreto, essa propriedade tende a decrescer. Portanto, o ataque de sulfatos é extremamente danoso ao concreto, influenciando significativamente, em um curto período de tempo, a sua resistência à compressão, sendo esta, uma das suas principais propriedades.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar os mesmos ensaios, porém com um número maior de corpos de prova;
- Realizar os mesmos ensaios, porém com um tempo de análise maior;
- Realizar o ensaio de ultrassonografia para complementar as análises obtidas neste trabalho;
- Realizar o ensaio de resistência à tração para complementar as análises obtidas neste trabalho;
- Realizar o ensaio de módulo de elasticidade para complementar as análises obtidas neste trabalho;
- Realizar o ensaio de carbonatação para complementar as análises obtidas neste trabalho;
- Realizar o ensaio de esclerometria para complementar as análises obtidas neste trabalho;
- Realizar o ensaio de resistividade volumétrica para complementar as análises obtidas neste trabalho;
- Realizar o Difração de Raio-X para complementar as análises obtidas neste trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.M. Hossack M.D.A. Thomas. **The effect of temperature on the rate of sulfate attack of Portland cement blended mortars in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution.** Cem. Concr. Res. 73 7 2015 136–142.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12.655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16.697: Cimento Portland.** Rio de Janeiro. 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro. 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro. 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento.** Rio de Janeiro. 2014.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7680: **Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto - Parte 1: Resistência à compressão axial.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro. 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro. 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1996.

ADENOT, F; Buil M. **Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water.** Cement and Concrete Research 22(2–3): 489–496. 1992

AGUADO, A; AGULLO, L; AYORA, C; BASTUS, E; CHICHON, S; LOPEZ, C; VAZQUEZ, E. **Estudio del comportamiento de las presas de Graus y Tabescán.** Universidad Politécnica de Cataluna, Fuerzas Eléctricas de Cataluna. 1993.

AGUIAR, L. C. **Os efeitos da variação de temperatura nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto.** Dissertação (Mestrado de engenharia) – Departamento de Materiais de Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2018.

AI-AKHRAS, N. M. **Durability of metakaolin concrete to sulfate attack**. Cement and Concrete Research, Vol. 36, p. 1727 – 1734, 2006.

AMOUDI OS. **Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments**. Cement and Concrete Composite. V. 24. Pag: 305–316. 2002.

Andrade, C., D'Andréa, R. (2011), “**La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad**”, Revista ALCONPAT, V.1, No. 2, pp. 93-101

ARAÚJO, C. C. et al. **Estudo de correlações entre propriedades do concreto e ensaios não destrutivos**. 2018.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83988- 2: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica - Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner**. 2014.

ASSOCIACIÓN ESPANOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN: **UNE 83988-2. Durabilidad del hormigón – determinación de la resistividad – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner**. AENOR, Madri, 2012.

AZZI, S, S. **A influência da pozolanicidade e do efeito fíler na resistividade elétrica volumétrica e superficial do concreto**. Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2020.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. Sexta edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2019, v2.

BENSTED. J. **Thaumasite – background and nature in deterioration of cements**. Cement and Concrete Composites. 1999.

BESSA, V. M. R. D. **Estruturas de Concreto Armado I**. Notas de aula, ENG0111, UFRGS, 2017.

BICZOK, I. **Concrete Corrosion and Concrete Protection**. Chemical Publishing Company, Inc., New York, 1972.

BROMLEY, A; PETTIFER, K. **Sulfide-related degradation of concrete in Southwest England “the mundic problem”**. Building Research Establishment laboratory report, V 325, pg 226. 1997.

BROWN, P. B. **Thaumasite formation and other forms of sulfate attack**. Cement and Concrete Research, Vol. 24, p. 301 – 303, 2002.

BROWN, P.B. Thaumasite formation and other forms of sulfate attack. **Cement and Concrete Composites**, nº 24, p. 301-303, 2002.



C. Sun, L. Yuan, X. Zhai, F. Qu, Y. Li, B. Hou, **Numerical and experimental study of moisture and chloride transport in unsaturated concrete**, *Cem. Concr. Compos.* 189 (2018) 1067–1075.

C. Yu W. Sun K. Scrivener., **Degradation mechanism of slag blended mortars immersed in sodium sulfate solution**. *Cem. Concr. Res.* 72 6 2015 37–47.

CABEZA, M.; MERINO, P.; MIRANDA, A.; NÓVOA, X.R.; SANCHEZ, I. **Impedance spectroscopy study of hardened Portland cement paste**. *Cem. Concr. Res.* 2002, 32, 881–891.

Calcanti, C; Meira, G. R. **Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity**. *Ibracon.* 2022. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, vol. 15, no. 1, e15103, 2022.

CAPRARO, A. P. B.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; PORTELLA, K. F.; OLIVEIRA, I. C. **Reação Sulfática Interna (RSI) como degradação de matriz cimentícia: comportamento de pastas dosadas com diferentes teores de contaminação por sulfato**. *Revista ALCONPAT*, v. 7, p. 119-134, 2017.

CAPRARO, A. P.B. **Ataque interno de sulfatos: mudanças nas propriedades de compostos cimentícios**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2019.

CAPRARO, A. P.B.; FRANDOLOSO, J. C. P.; MEDEIROS, M. H. F.; PORTELLA, M. D. G.; PORTELLA, F. F.; GODKE, B.; OLIVEIRA, I. **Avaliação de ensaios não destrutivos para a detecção de concretos dosados com diferentes teores de contaminação por íons sulfeto**. *Simpósio Paranaense de Patologia das Construções*. Curitiba, 2017.

CAPRARO, A. P.B.; MEDEIROS, M. H. F.; **Avaliação do mecanismo de corrosão em concretos contaminados por pirita**. *Simpósio Paranaense de Patologia das Construções*. Curitiba, 2019.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiânia: Ed UFG, 1997.

CASTRO, Elisângela de. **Estudo da resistência à compressão do concreto por meio de testemunhos de pequeno diâmetro e esclerometria**. 2009. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CAVALCANTI, C. A; ROCHA, M. G. **Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity**. *Revista IBRACON*. Vol. 15. Anual. *Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto*, 2022.

CHEN, C.; CHANG, J.; YEIH, W. **The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 71, p. 35-43, 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, p. 14-20, 2002.

CHIKER, T.; AGGOUN, S.; HOUARI, H.; SIDDIQUE, R. **Sodium sulfate and alternative combined sulfate/chloride action on ordinary and self-consolidating PLC-based concretes**. Construction and Building Materials, v. 106, p. 342-348, 2016.

CHINCHÓN, J. S; AYORA, C. AGUADO, A; GUIRADO, F. **Influence of weathering of iron sulfides contained in aggregates on concrete durability**. Cement and Concrete Reserch, V 25, pg 1264-1272.

Chinchón, J.S; Ayora, C; Aguado, A; Guirado, F. **Influence of weathering of iron sulfides contained in aggregates on concrete durability**. Cement and Concrete Reserch, 25(6): 1264-1272 (1995).

CHINCÓN, J. S; LOPEZ, A; QUEROL, X; AYORA, C. **La cantera de Mont Palau influencia de la mineralogia de los áridos em la durabilidade del hormigón**. Ingeniería Civil, V 71, pg 79-88. 1989.

COLLEPARDI, M. **Thaumasite formation and deterioration in historic buildings**. Cement and Concrete Composites. 1999.

COMITÉS TÉCNICOS DE NORMALIZACIÓN. UNE 83988-2. **Durabilidad del hormigón – determinación de la resistividad – Parte 2: Método de las cuatro puntas de Wenner**. Norma espanhola (2012).

CORREA, M. **Sistema de Recuperação do Maciço da Barragem do Rio Descoberto**. Monografia, Universidade de Brasília, Brasília. 2001.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Belo Horizonte, 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

DE LIMA e SILVA, LD; DE SOUZA, MVT; MARQUES, NM; ALVES, ISSS; GOMES, GJC. **Análise da resistividade de estruturas de concreto submetidas ao ataque corrosivo de sulfato de magnésio**. Revista Teccen. 2018 Jul./Dez.; 11 (2): 23-31.  
DEAN, J. A. Lange's Handbook of Chemistry. 1985.

Dinakar, P., Babu, K. G., Santhanam, M. **Corrosion behaviour of blended cements in low and medium strength concretes**. Cement and Concrete Composites. 29(2):136-145, (2007).

- 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.
- ELAHI, M. M. A, SHEARER, C. R., NASER. R. R, SAHA, A, K. KAHN, M. N. **Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review.** Construction and Building Materials, 281. 2021.
- Elahi, M. M. A., Shearer, C. R., Naser Rashid Reza, A., Saha, A. K., Khan, M. N. N., Hossain, M. M., & Sarker, P. K. **Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review.** Construction and Building Materials, 281, (2021).
- ESCOBAR, Celcio José; ANDREOTTI, Darlinton; FABRO, Gilmar. **Avaliação de desempenho do ensaio de esclerometria na determinação da resistência do concreto endurecido.** Ibracon, Salvador, v. 1, n. 1, p.1-16, set. 2011. Anual. Anais do 50° Congresso Brasileiro do Concreto, 2011.
- Everton K. Melara, Priscila O. Trentin, Eduardo Pereira c , Ronaldo A. Medeiros-Junior d. **Contribution to the service-life modeling of concrete exposed to sulfate attack by the inclusion of electrical resistivity data.** Construction and Building Materials 322 (2022).
- F. Alapour, R.D. Hooton, **Sulfate resistance of portland and slag cement concretes exposed to sodium sulfate for 38 Years, ACI Mater. J.** 114 (3) (2017) 477–490.
- F. Chen J.M. Gao B. Q, D.M. Shen, L.Y. Li., **Degradation progress of concrete subject to combined sulfate-chloride attack under drying-wetting cycles and flexural loading.** Constr. Build. Mater. 151 2017 164–171.
- FERREIRA JR, E. L. F; DOMICIANO, L. L. S; BARBOSA, T. R. **Estudo de durabilidade da estrutura de concreto armado em uma Estação de Tratamento de Esgoto – Caso de estudo na ETE Parque Atheneu.** 2020. Artigo. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Curso de engenharia civil 2020/2.
- 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.
- FILHO, L. C. P. S. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: Análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica.** 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- GANS, S. P. **Correlação entre a resistividade elétrica e a resistência à compressão do concreto exposto a ciclos de molhagem e secagem com cloretos e sulfatos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, 2017.

GAO, J.; YU, Z.; SONG, L.; WANG, T.; WEI, S. **Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying–wetting cycles**, Construction and Building Materials, Volume 39, February, Pages 33-38. 2013.

GAZE ME, Crammond NJ. **The formation of thaumasite in a cement:lime:sand mortar exposed to cold magnesium and potassium sulfate solutions**. Cem Concr Compos. 22(3):209–22.2000.

GHOSH, P. TRAN, Q. **Influence of parameters on surface resistivity of concrete**. Cement & Concrete Composites. v. 62, 134-145. 2015.

GIROTTO, E. M.; SANTOS, I. A. **Medidas de resistividade elétrica dc em sólidos: como efetuá-las corretamente**. Química Nova, v. 25, n. 4, 639 – 647. 2002.

GJØRV O. E. **Durability design and quality assurance of concrete structures in severe environments**. In: Proceedings of the Seventh International Conference on Concrete under Severe Conditions – Environment and Loading. Proceedings... Nanjing, 2013. p. 81–101.

GONG, J.; CAO, J.; WANG, Y. **Effects of sulfate attack and dry-wet circulation on creep of fly-ash slag concrete**, Construction and Building Materials, Volume 125, 30 October 2016, Pages 12-20.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. **Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion**. ACI Materials Journal, v. 96, n. 5, 1999.

HE, R; ZHENG, S; GAN, Z. J.L; WNAG, Z; FANG, J; SHAO, Y. **Damage mechanism and interfacial transition zone characteristics of concrete under sulfate erosion and Dry-Wet cycles**. Construction and Building Materials. V 255. 2020.

HELENE, P. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil. 1993.

HONGYAN, M. **Multi-scale modeling of the microstructure and transport properties of contemporary concrete**. Tese (Doutorado) - Hong Kong University of Science and Technology. Hong Kong, 2013.

HOOTON, R. D. **Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity**. ACI Materials Journal, Vol. 90, p. 143 – 151, 1993.

HOPPE FILHO, J. **Efeitos da adição de cal hidratada sobre a permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de concreto com altos teores de adições minerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2005.

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.

Huang, Q., Zhu, X., Xiong, G., Zhang, M., Deng, J., Zhao, M., & Zhao, L. **Will the magnesium sulfate attack of cement mortars always be inhibited by incorporating nanosilica.** Construction and Building Materials, 305 (2021).

LANG, L. NIU, D. **Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles.** Construction and Building Materials, v. 117, p. 88-98, 2016.

LANG, L.; NIU, D. **Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles,** Construction and Building Materials, Volume 117, 1 August 2016, Pages 88-98.

IKUMI, T. SEGURA, I. **Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures: A review.** Cement and Concrete Research. V 121, pg 91-105. 2019

JALALI, S; GOMAN, F; ALVES, M, T, P. **Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos.** CONGRESSO NACIONAL DA CONSTRUÇÃO, 3, Coimbra, Portugal – Congresso Construção. 2007

JIANG, L. NIU, D. **Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles.** Construction and Building Materials, v. 117, p. 88-98, 2016.

KAMALI, S; Gerard B and Moranville M. **Modelling the leaching kinetics of cement-based materials – influence of materials and environment.** Cement and Concrete Composites 25(4–5): 451–458. 2003

KAMALI, S; Moranville M and Leclercq S. **Material and environmental parameters effects on the leaching of cement pastes: experiments and modelling.** Cement and Concrete Research 38(4): 575–585. 2008

Kohler S, Heinz D and Urbonas L (2006). **Effect of ettringite on thaumasite formation.** Cement and Concrete Research 36(4): 697–706.

LAGE, E. B. D; **Comparação dos métodos de ensaio não destrutivo para qualidade do concreto: resistividade elétrica superficial e volumétrica em corpo de prova.** 2018. Dissertação. Mestrado em construção civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de engenharia civil, 2018.

LAYSSI, H.; GHODS, P.; ALIZADEH, A.; SALEHI, M. **Electrical resistivity of concrete – concepts, applications and measurement techniques**. Concrete International. May – 2015. 41-46.

LENCIONI, J.W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios**. São José dos Campos: ITA, 2011.

Liu, P., Chen, Y., Wang, W., & Yu, Z. **Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions**. Chemical Physics Letters, 2020.

LIU, S; ZHANG, D.; CAO, Z.; FAN, L.; LIU, W. **Evaluation of the influence of salt concentration on cement stabilized clay by electrical resistivity measurement method**. Engineering Geology, v. 170, p. 80-88, 2014.

Lubeck, A., Gastaldini, A. L. G., Barin, D. S., Siqueira, H. C. (2012), **Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag**. Cement and Concrete Composites. 34(3):392-399.

M.H. Alyami, R.S. Alrashidi, H. Mosavi, M.A. Almarshoud, K.A. Riding, **Potential accelerated test methods for physical sulfate attack on concrete**. Constr. Build. Mater. 229 (2019).

M.L. Nehdi, A.R. Suleiman, A.M. Soliman. **Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack**. Cem. Concr. Res. 64 (2014) 42–53.

M.M. Rahman, M.T. Bassuoni. **Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation**. Constr. Build. Mater., 73 (2014), pp. 652-662.

MACPHEE, D; DIAMOND, S. **Thaumasite in cementitious materials**. Cement and Concrete Composites. 2003.

MARTINEZ, J, M, R; AGUADO, A; AGULLÓ, L; VAZQUEZ, E. **Diagnosis of the behavior of the Graus and Tabescan dams**. International Congresso on Large Dams, ICOLD, Viena, V 2, pg 603-617. 1991.

MATIAS, F. **Avaliação da influência da resistência à compressão do concreto no custo do sistema estrutural de um edifício de cinco pavimentos**. Monografia. Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2019.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de et al. **Resistência a compressão em testemunho de concreto: influência do fator de esbeltez, diâmetro da amostra e método de extração**. Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, [s.l.], v. 13, n. 1, p.240-250, 29 mar. 2017. Universidade Federal de Goiás.

MEDEIROS, J, 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**. Artigo. Alconpat. Vol. 4, nº 2. 2014.

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.

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

Medeiros-Junior, R. A; Pinto, S. R., Angulski da Luz, C., Munhoz, G. S. **Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate**. Cement and Concrete Research, v. 136, 2020.

MEHTA P. K., MONTEIRO P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Brasil, São Paulo: Pini, 2008, p.674.

METHA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MOTA, D. A. **Influência da adição de materiais pozolânicos na corrosibilidade do concreto armado, analisada por meio do potencial de corrosão e resistividade elétrica**. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana. Salvador, p. 141. 2016.

MOYSES, R. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV**. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da UFMG, Belo Horizonte, 2004.

MOYSES, R. **Durabilidade, Patologia e Recuperação e Recuperação das Estruturas**. Apostila para Curso de Especialização, PUC-MG, Belo Horizonte, 2018.

NAJJAR, M. F.; NEHDI, M. L.; SOLIMAN, A. M.; AZABI, T. M. **Damage mechanisms of two-stage concrete exposed to chemical and physical sulfate attack**. Construction and Building Materials, v. 137, p. 141-152, 2017.

NASCIMENTO, M.L.M; SENA, G.O; NETO, A. C. N; **Patologia das Construções**. 1º Edição: 2B Educação. 2020.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Editora Bookman, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. - 2º Edição- Porto Alegre, Bookman, 2013.

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

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

NUNES, F.W.G. **“Resistência e Módulo de Elasticidade de Concretos Usados no Rio de Janeiro”** – Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

OMAR, S. BAGHARA, A. **Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments**. Cement & Concrete Composites. V 24, PG 305–316. (2002).

OUYANG, W.; CHEN, J.; JIANG, M. **Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack**. Construction and Building Materials, Vol. 53, p. 419 – 424, 2014.

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

PEREIRA, V. C. **Efeitos dos sulfatos na degradação do concreto**. 2019. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

PIASTA, W. **Analysis of carbonate and sulphate attack on concrete structures**. Engineering Failure Analysis, v. 79, p. 606-614, 2017.

PLANEL D; Sercombe J; Le Bescop P; Adenot F and Torrenti JM. **Long-term performance of cement paste during combined calcium leaching-sulfate attack: kinetics and size effect**. Cement and Concrete Research 36(1): 137–143. 2006.

POLDER, R. B.; PEELLEN, W. H. A. **Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity**. Cement & Concrete Composites, 2002. v24 - p427-435.

PRADHAN, B. **Corrosion behavior of steel reinforcement in concrete exposed to composite chloride–sulfate environment**. Construction and Building Materials, v. 72, p. 398-410, 2014.

PRESUEL-MORENO, F., Wu, Y. Y., Liu, Y. **Effect of curing regime on concrete resistivity and aging factor over time**. Construction and Building Materials. 48:874-882. 2013.



QI, B.; GAO, J.; CHEN, F.; SHEN, D. **Evaluation of the damage process of recycled aggregate concrete under sulfate attack and wetting-drying cycles.** *Construction and Building Materials*, v. 138, p. 254-262, 2017.

QUADROS, P, A. **Estudo das correlações entre as propriedades mecânicas do concreto.** Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2014.

R. Ragoug, O.O. Metalssi, F. Barberon, J.-M. Torrenti, N. Roussel, L. Divet, J.-B. d'Espinose de Lacaillerie. **Durability of cement pastes exposed to external sulfate attack and leaching: Physical and chemical aspect.** *Cem. Concr. Res.* 116 (2019) 134–145.

RAHMAN, M. M; BASSOUNI, M. T. **Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation.** *Construction and Building Materials*, v73, pp. 652-662. 2014.

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, V, L. **Efeito de adições pozolânicas na estimativa de vida útil do concreto exposto a cloretos através da resistividade elétrica superficial.** 2015. Dissertação. Departamento de Construção Civil, da Universidade Federal do Paraná. 2015.

Revertegat E; Richet C; Gegout P. **Effect of pH on the durability of cement pastes.** *Cement and Concrete Research* 22(2–3): 259–272. 1992.

RIBEIRO, Daniel Verás. **Corrosão em Estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

ROSA, W, D. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico.** 2005. Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil. 2005.

Roziere E; Loukili A. **Performance-based assessment of concrete resistance to leaching.** *Cement and Concrete Composites* 33(4): 451–456. 2011.

Roziere E; Loukili A; El-Hachem R; Grondin F. **Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks.** *Cement and Concrete Research* 39(12): 1188–1198. 2009.

S.F. Chen M.L. Zheng B.G. Wang, **Study of High-Performance Concrete Subjected to Coupled Action from Sodium Sulfate Solution and Alternating Stresses.** *J. Mater. Civi. Eng.* 21 4 2009 148–153.

S.U. Al-Dulaijan., **Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to magnesium sulfate solutions**. Constr. Build. Mater. 21 8 2007 1792–1802.

SALEEM, M.; SHAMEEM, M.; HUSSAIN, S. E.; MASLEHUDDIN, M. **Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Portland cement concrete**. Construction and Building Materials, v. 10, n. 3, p. 209-214, 1996.

SANTANA, Caio Henrique Santos; MIRANDA, Rodrigo Manzan. **Análise comparativa da resistência à compressão aferida por métodos não destrutivos**. Ucb, Brasília, v. 1, n. 1, p.1-35, 17 jun. 2016.

Santhanam, M.D. Cohen, J. Olek. **Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 2: proposed mechanisms**. Cem. Concr. Res. 33 (2003) 341–346.

SANTHANAM, M; COHEN, M. D; OLEK, J. **Mechanism of sulfate attack: a fresh look. Cement and Concrete Research**. V 33, pg. 341-346. 2003.

SANTOS, B. O. C. **Estruturas de Concreto Armado - Patologias e suas Consequências – Estudo de Caso**. Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE, V. 16 (2), pg 40-47. 2016.

SANTOS, F. B; FIGUEIREDO, C. P. Cascudo, O., Carasek, H., Cachim, P., & Velosa, A. **The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 7, n. 4, p. 685-708, 2014.

SANTOS, F. C. **Patologia de estruturas de concreto armado**. 2017. Monografia. Departamento de engenharia civil. Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil. 2017.

SANTOS, G. T; SANTOR, M. S; GASTALDINI, A. L. G.; CRAUSS, C.; SANTOS, G. T.; ROSSINI, F. C. **Influência de materiais de proteção na resistividade elétrica do concreto**. Revista ALCONPAT, v. 2, n. 1, p. 47-57, 2012.

SANTOS. L.; **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Brasília:UnB, 2006.

SCHIAVINI, N. D. **Análise da influência de diferentes tipos de cimento na resistência ao ataque por sulfatos**. Monografia. Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Sede Ecoville, 2018.

SILVA, P. R.; BRITO, J. **Experimental study of the porosity and microstructure of selfcompacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler**. Construction and Building Materials, v. 86, p. 101-112, 2015

SIQUEIRA, L, V, M. **Laboratório de Materiais de Construção – I**. Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Departamento de engenharia Civil – DEC. Santa Catarina, 2008.

SKALNY, J.; MARCHAND, J.; ODLER, I. **Sulfate Attack on Concrete**. 1. ed. Londres: SPON PRESS, 2002.

SKALNY,J; JOHANSEN,V; THAULOW, N; PALOMO, A. **DEF: Una forma de ataque por sulfatos**, *Materiales de Cosntrucción*, v.46, n244, 1966.

SOUZA, B. R. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil. 2006.

SOUZA, J. D. **Capacidade de adições minerais em mitigar o ataque por sulfatos de sódio e magnésio em argamassas de cimento Portland**. Dissertação. Universidade Federal do Paraná. 2016.

SOUZA, R.B. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed. Inst of Civil Engineers Pub. 1997.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. **Delayed ettringite formation**. *Cement and concrete research*. v. 31, n. 5, p. 683-693, 2001.

TUTIKIAN, B. MONTELONGO, A; PACHECO, F; CHRIST, R. **Estudo do concreto através de suas propriedades no estado endurecido**. Artigo. Ibracon. Estrutura de Materiais. Fevereiro, 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.

VAZQUEZ, E. TORAL, T. **Influence des sulfures de fer des grabulats du Maresme sur les betons**. *Bulletin de L' Association Internationale de Geologie de L'Ingenieur*. V 30, pg 297-300. 1984.

VILLATE, E. J. Física 2. **Eletricidade e Magnetismo**. Porto: Jaime E. Villate, 2012. 224p.

Wang, K., Guo, J., Wu, H., & Yang, L. **Influence of dry-wet ratio on properties and microstructure of concrete under sulfate attack**. *Construction and Building Materials*, 263, 120635, 2020.

WERITZ, F.; TAFFE, A.; SCHAURICH, D.;WILSCH, G. **Detailed depth profiles of sulfate ingress into concrete measured with laser induced breakdown spectroscopy**. *Constructon and Building Materials*. vol. 23, pp. 275 –283, 2009.

WHITTAKER, M; BLACL, L. **Current knowledge of external sulfate attack. Institution of Civil Engineers.** Vol. 27, pg 532-245. 2015.

YOUNG, Hugh D. **Física III: Eletromagnetismo/Young e Freedman**; 12ªEd. colaborador A. Lewis Ford]; tradução Sonia Midori Yamamoto; revisão técnica Adir Moisés Luiz. São Paulo: Addison Wesley, 2009. 425p.

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.

ZHANG, Z.; WANG, Q.; CHEN, H.; ZHOU, Y. **Influence of the initial moist curing time on the sulfate attack resistance of concretes with different binders.** Construction and Building Materials, v. 144, p. 541-551, 2017b.