

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

Lucas Chaves Chiaradia

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E NA
CINÉTICA DE CORROSÃO DA ARMADURA DE CONCRETOS CONTAMINADOS
COM CLORETOS**

Belo Horizonte

2023

Lucas Chaves Chiaradia

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E NA
CINÉTICA DE CORROSÃO DA ARMADURA DE CONCRETOS CONTAMINADOS
COM CLORETOS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo

Co-orientadores: Prof. Dr. Fernando Do Couto Rosa
Almeida

Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte

2023

C532i

Chiaradia, Lucas Chaves.

Influência da temperatura na resistividade elétrica e na cinética de corrosão da armadura de concretos contaminados com cloretos [recurso eletrônico] / Lucas Chaves Chiaradia. – 2023.

1 recurso online (122 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Enio José Pazini Figueiredo.

Coorientador: Fernando do Couto Rosa Almeida.

Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguilár.

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

Bibliografia: f. 115-122.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil – Teses. 2. Resistividade elétrica – Teses.
3. Concreto – Durabilidade – Teses. 4. Concreto – Aditivos – Teses.
5. Concreto – Efeito da temperatura – Teses. 6. Concreto armado – Resistência – Teses. 7. Concreto armado – Corrosão – Teses.
I. Figueiredo, Enio José Pazini. II. Almeida, Fernando do Couto Rosa.
III. Aguilár, Maria Teresa Paulino. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.

CDU: 691(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL
MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO LUCAS CHAVES CHIARADIA

Realizou-se, no dia 29 de março de 2023, às 10:00 horas, via Plataforma virtual (Google Meet), a 250ª defesa de dissertação, intitulada *INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E NA CINÉTICA DE CORROSÃO DA ARMADURA DE CONCRETOS CONTAMINADOS COM CLORETOS*, apresentada por LUCAS CHAVES CHIARADIA, número de registro 2020665560, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em CONSTRUÇÃO CIVIL, à seguinte Comissão Examinadora: Prof. Enio José Pazini Figueiredo - Orientador (UFG), Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida - Coorientador (Universidade Federal de Minas Gerais), Profa. Maria Teresa Paulino Aguiar – Coorientadora (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof. Adriano de Paula e Silva (Universidade Federal de Minas Gerais), Profa. María Del Carmen Andrade Perdrix (Universidad Politécnica de Cataluña) e os suplentes Prof. Eduardo Chahud (Universidade Federal de Minas Gerais) e Prof. Maurício Mancio (UNISINOS).

A Comissão considerou a dissertação:

- (X) Aprovada
() Reprovada

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

Belo Horizonte, 29 de março de 2023.

Prof. Enio José Pazini Figueiredo (Doutor) - Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br ENIO JOSE PAZINI FIGUEIREDO
Data: 27/04/2023 13:33:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Maria Teresa Paulino Aguiar (Doutora) - Coorientadora

Maria Teresa Paulino Aguiar
29733723649
Assinado digitalmente por Maria Teresa Paulino Aguiar
CNPJ: 08.000.000/0001-90 - Universidade Federal de Minas Gerais, CMC/FEU, C-00
Localização: sua localização de assinatura
Data: 2023.04.25 19:17:56-0300
Post Reader Versão: 10.1.1

Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida (Doutor) - Coorientador

Fernando do Couto Rosa Almeida:3685799684
Assinado de forma digital por Fernando do Couto Rosa Almeida:36857996814
Dados: 2023.04.26 07:57:03-03'00'

Prof. Adriano de Paula e Silva (Doutor)

Adriano de Paula e Silva:36512460600
Assinado de forma digital por Adriano de Paula e Silva:36512460600
Dados: 2023.04.25 20:43:08 -03'00'

Profa. María Del Carmen Andrade Perdrix (Doutora)

ANDRADE PERDRIX MARIA DEL CARMEN - 50268784F - 50268784F
Firmado digitalmente por ANDRADE PERDRIX MARIA DEL CARMEN - 50268784F
Fecha: 2023.03.30 17:03:11 +02'00'

AGRADECIMENTOS

A minha família, por todo apoio, incentivo e compreensão. Em especial minha esposa Fabiana que foi meu porto seguro em todos os momentos de dificuldade que enfrentei, minha mãe Carminha que sempre me incentivou nos estudos, minha irmã Bruna por sempre me ouvir, meu pai, meu tio Joel por possibilitar que eu me tornasse engenheiro, minha sogra Zilda e meu sogro João por abrir a porta e suas vidas para me receber, a Dona Ercilia e aos meus filhos, Melissa e Dudu, por serem a razão de eu estar buscando sempre crescer e melhorar.

Ao professor Enio, ser humano fantástico, que não economiza ensinamentos, minha total gratidão e admiração.

À professora Teresa, minha mentora na pesquisa e na vida, obrigado por indicar os caminhos sempre com muito amor e sabedoria.

Ao professor Fernando, que com muita simpatia e bom-humor me ensinou muito, o meu muito obrigado.

A professora Daiane, por todo auxílio nas interpretações de resultados de DRX.

Ao professor Luiz Melgaço, pelas palavras de incentivo e empréstimo do equipamento Resipod.

A todos colegas do laboratório de caracterização e do curso de mestrado, que se tornaram amigos e dividiram comigo as alegrias e os dramas do mundo das pesquisas.

Ao Dr. Gabriel Costa, pela amizade e pelo incentivo a entrar no campo da pesquisa.

A todos os amigos do Laboratório de Corrosão do Departamento de Engenharia Química, por toda contribuição nos ensaios eletroquímicos, em especial à professora Wanessa, professor Fernando, Dra. Mara e ao mestre Matheus.

Aos técnicos de laboratório, Ricardo, Dedé e Alberto por todo o auxílio durante os processos experimentais.

A todos do Laboratório de Estrutura (LAEES), pelo apoio na utilização da câmara climática.

A Contrei pela bolsa que possibilitou que eu me tornasse engenheiro civil.

À PI Engenharia por todo apoio e auxílio na pesquisa, em especial ao engenheiro Leonardo Braga.

À Supermix Concreto pela doação dos materiais e por todo auxílio na confecção dos corpos de prova e ensaios de caracterização dos insumos, em especial às engenheiras Paloma, Cheila e Helena.

RESUMO

A corrosão de armaduras em estruturas de concreto é um sério e oneroso problema para o setor da construção civil. Diversos fatores influenciam na evolução do processo corrosivo, assim como na interpretação dos resultados obtidos por técnicas para avaliação e monitoramento da corrosão das armaduras. Esses fatores podem ser intrínsecos, como, por exemplo, a composição do cimento e a porosidade do concreto, ou extrínsecos, como, por exemplo, as condições ambientais e o nível de agressividade ambiental à estrutura de concreto. No caso da temperatura, a sua variação altera a mobilidade iônica na microestrutura da matriz cimentícia, favorecendo ou dificultando o processo eletroquímico. Este trabalho avaliou a influência da temperatura na resistividade elétrica do concreto e na cinética de corrosão da armadura, ambas sujeitas a ação de cloretos. Foram avaliados corpos de prova de concreto armados e não armados produzidos com relação água/cimento de 0,60 e 0,45, com e sem contaminação por NaCl, no teor de 1,00% de cloretos em relação a massa de cimento. Os concretos foram caracterizados fisicamente e mecanicamente aos 28 e 90 dias de idade. Após 204 dias, os corpos de prova armados contaminados com cloretos apresentaram estados ativos de corrosão, verificados por ensaios em triplicata de potencial de corrosão e polarização linear. Em seguida, as amostras foram submetidas a ciclos de temperatura, variando entre 55°C e -5°C, em ciclo de ida e volta, para determinação de resistividade elétrica, potencial de corrosão e velocidade de corrosão. Pelos ensaios de polarização linear e potencial de corrosão, em temperaturas mais elevadas, com conseqüente diminuição da resistividade elétrica, observou-se uma significativa variabilidade dos resultados e diferença entre os resultados dos traços contaminados com cloretos em relação aos não contaminados. Em contrapartida, em temperaturas mais baixas, os resultados entre os corpos de prova não contaminados e contaminados se aproximaram, ficando na região de baixa probabilidade de corrosão, independentemente do fato da armadura estar ou não despassivada. Isto ficou mais evidente nas medidas realizadas na temperatura de -5°C, quando se registrou baixa probabilidade de corrosão, por meio do ensaio de potencial de corrosão, e nível desprezível de corrosão, por meio da polarização linear, tanto para os corpos de prova com cloretos, como para os sem cloretos. Quanto a resistividade elétrica, notou-se o contrário, uma vez que as maiores variações foram registradas em baixas temperaturas e nas temperaturas mais elevadas os valores da resistividade elétrica dos traços ficaram mais próximos, apontando risco de corrosão moderada a alta. Correlacionando os resultados de potencial de corrosão e velocidade de corrosão, variando-se a temperatura, percebeu-se uma tendência similar em relação a interpretação da cinética da corrosão, ou seja, quando o potencial diminui a velocidade de corrosão aumenta. As correlações linear e exponencial obtidas entre resistividade elétrica e temperatura e entre a velocidade de corrosão e temperatura, respectivamente, mostraram que existe uma correlação muito forte entre as variáveis confrontadas, uma vez que os coeficientes de correlação ficaram entre 0,95 e 0,99. A pesquisa mostrou que a variação da temperatura influencia a resistividade elétrica do concreto, modificando a cinética da corrosão da armadura em concretos contaminados com cloretos.

Palavras-chave: concreto armado, durabilidade, corrosão, resistividade elétrica, temperatura.

ABSTRACT

The corrosion of reinforcement in concrete structures is a serious and costly problem for the construction sector. Several factors influence the evolution of the corrosive process, as well as the interpretation of the results obtained by techniques for evaluation and monitoring of reinforcement corrosion. These factors can be intrinsic, such as the composition of the cement and the porosity of the concrete, or extrinsic, such as environmental conditions and the level of environmental aggressiveness to the concrete structure. In the case of temperature, its variation alters the ionic mobility in the microstructure of the cementitious matrix, favoring or hindering the electrochemical process. This research evaluated the influence of temperature on the electrical resistivity of concrete and on the corrosion kinetics of the reinforcement, both subject to chloride action. Specimens of reinforced and non-reinforced concrete produced with a water/cement ratio of 0.60 and 0.45, with and without NaCl contamination, were evaluated, at a content of 1.00% of chlorides in relation to the cement mass. The concretes were physically and mechanically characterized at 28 and 90 days of age. After 204 days, the reinforced specimens contaminated with chlorides presented active corrosion states, verified by triplicate tests of corrosion potential and linear polarization. Then, the samples were submitted to temperature cycles, ranging between 55°C and -5°C, in a round trip cycle, to determine electrical resistivity, corrosion potential and corrosion speed. By the tests of linear polarization and corrosion potential, at higher temperatures, with a consequent decrease in electrical resistivity, it was observed significant variability of the results and difference between the results of the concretes contaminated with chlorides in relation to the non-contaminated ones. Differently, at lower temperatures, the results between the uncontaminated and contaminated specimens approached, remaining in the region of low probability of corrosion, regardless of whether or not the reinforcement was depassivated. This was more evident in the measurements carried out at a temperature of -5°C, when a low probability of corrosion was recorded, through the corrosion potential test, and a negligible level of corrosion, through linear polarization test, both for the chloride and non-chloride specimens. As for electrical resistivity, the opposite was observed, since the largest variations were recorded at low temperatures and at higher temperatures the electrical resistivity values of the all mix proportions studied were closer, indicating a risk of moderate to high corrosion. Correlating the results of corrosion potential and corrosion rate, varying the temperature, a similar trend was noticed in relation to the interpretation of corrosion kinetics, that is, when the potential decreases, the corrosion rate increases. The linear and exponential correlations obtained between electrical resistivity and temperature and between corrosion rate and temperature, respectively, showed that there is a very strong correlation between the confronted variables, since the correlation coefficients were between 0,95 and 0,99. The research showed that temperature variation influences the electrical resistivity of the concrete, modifying the kinetics of reinforcement corrosion in concretes contaminated with chlorides.

Keywords: reinforced concrete, durability, corrosion, electrical resistivity, temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de uma pilha de corrosão através do processo eletroquímico.	24
Figura 2 - Representação da armadura imersa em concreto não contaminado.	25
Figura 3 - Diagrama de potencial elétrico / pH.	26
Figura 4 - Tipos de corrosão generalizada e localizada.	27
Figura 5 - Tipos de corrosão e suas causas.	28
Figura 6 - Formação de pite de corrosão.	29
Figura 7 - Mecanismos de transporte dos cloretos no concreto.	31
Figura 8 - Conteúdo da umidade nos poros em função da umidade ambiental.	33
Figura 9 - Influência da temperatura na taxa de corrosão.	34
Figura 10 - Comparação entre resistividade e temperatura.	38
Figura 11 - Configuração ensaio resistividade elétrica superficial.	41
Figura 12 - Esquema ensaio resistividade elétrica volumétrica.	44
Figura 13 - Esquema ensaio potencial de corrosão.	46
Figura 14 - Faixas de icorr em relação à corrosão.	48
Figura 15 - Fluxograma do programa experimental.	51
Figura 16 – Curva granulométrica areia quartzosa.	54
Figura 17 – Curva granulométrica brita gnaisse.	56
Figura 18 – Corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios de caracterização do concreto.	59
Figura 19 - Corpos de prova cilíndricos: (a) Moldagem, (b) Cura em câmara úmida.	60
Figura 20 – (a) Barras imersas na solução de reagentes (b) Barras com óxidos removidos.	61

Figura 21 – (a) Escovação barras (b) Imersão em Acetona (c) Secagem com soprador térmico.....	62
Figura 22 - Redução de hidrônio no processo de limpeza das barras.	62
Figura 23 – Armazenamento das barras livres de umidade.	63
Figura 24 – Área de exposição barra de aço.....	63
Figura 25 – (a) Fôrmas de madeira (b) Barra posicionada na fôrma.....	64
Figura 26 - Geometria corpo de prova prismático.	64
Figura 27 - Configuração externa e interna da armadura.....	65
Figura 28 - (a) Corpo desmoldado (b) Fio de cobre conectado à armadura (c) Fio e armadura envolvida com fita isolante (d) Revestimento epóxi na conexão.	65
Figura 29 - Slump test: (a) Preenchimento do molde, (b) Medida do abatimento.	67
Figura 30 - Calorímetro utilizado no programa experimental.....	68
Figura 31 – Capeamento dos corpos de prova.	68
Figura 32 - Prensa Forney para ensaio de compressão.....	69
Figura 33 - Equipamento para aferição do módulo de elasticidade.....	70
Figura 34 - Ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada. ...	70
Figura 35 – (a) Pesagem amostra após secagem em estufa (b) Pesagem amostra submersa.	71
Figura 36 - Equipamento para aferição da resistividade elétrica volumétrica.....	72
Figura 37 - Aferição resistência espuma superior.	73
Figura 38 - Aferição resistência inferior.....	73
Figura 39 - Aferição resistividade elétrica volumétrica do corpo de prova de 0,10m de diâmetro e 0,20m de comprimento.	74
Figura 40 - Aferição dimensões corpo de prova cilíndrico de 0,10m de diâmetro e 0,20m de comprimento.	74

Figura 41 - Ensaio de resistividade elétrica superficial.....	75
Figura 42 – Marcações dos graus no corpo de prova para ensaio de resistividade elétrica superficial.....	76
Figura 43 - Equipamentos para ensaio potencial de corrosão.	77
Figura 44 - Comparativo leituras eletrodos de referência: (a) eletrodo comercial (Calomelano saturado), (b) Eletrodo construído (Cobre/Sulfato de Cobre.	78
Figura 45 - Leitura ensaio de potencial de corrosão.	79
Figura 46 – Configuração para ensaio de polarização linear.	80
Figura 47 – Câmara climática.....	82
Figura 48 – Acondicionamento dos corpos de prova.	83
Figura 49 - Tela de comando câmara apresentando valores de temperatura e umidade pré-estabelecidos.	83
Figura 50 - Ciclos de temperatura.....	84
Figura 51 – (a) Termopar (b) Termômetro para termopar (c) Termômetro de superfície.	84
Figura 52 – Aferição de temperaturas: imagens do topo indicam as medidas do termômetro de superfície e as imagens inferiores indicam as medidas do termopar no interior.....	85
Figura 53 – Resultados do ensaio de calorimetria das pastas de cimento.....	88
Figura 54 – Resultado de absorção de água aos 28 e 90 dias.	89
Figura 55 –Resultado do Índice de vazios aos 28 e 90 dias.	91
Figura 56 – Resultados da resistência à compressão 28 e 90 dias.	94
Figura 57 –Resultados do ensaio de módulo de elasticidade 28 e 90 dias.....	97
Figura 58 – Resultado ensaio de resistividade elétrica superficial 28 e 90 dias.....	98
Figura 59 – Gráfico resistividade elétrica volumétrica 28 e 90 dias.....	100

Figura 60 – Difractometria de Raio-X para amostras dos quatro traços de concreto.	103
Figura 61 – Potencial de corrosão monitoramento.....	105
Figura 62 – Velocidade de corrosão monitoramento.....	106
Figura 63 – Resistividade elétrica superficial controle.....	107
Figura 64 – Resistividade elétrica superficial em diferentes temperaturas.....	108
Figura 65 – Potencial de corrosão (eletrodo Cu/CuSO ₄) em diferentes temperaturas.	112
Figura 66 – Velocidade de Corrosão em diferentes temperaturas	114
Figura 67 – Resistividade elétrica superficial vs. velocidade de corrosão vs. temperatura.	118
Figura 68- Potencial de corrosão vs. velocidade de corrosão vs. temperatura.	119
Figura 69 – Correlações entre resistividade elétrica e cinética de corrosão para diferentes temperaturas.....	121
Figura 70 – Variação percentual da resistividade elétrica em relação a mudança de temperatura.	123
Figura 71 – Correlação resistividade elétrica para valor velocidade de corrosão igual a 0,1µA/cm ²	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de agressividade ambiental.	23
Tabela 2 - Relações máximas para concreto armado de água/cimento e classe de concreto armado por classe de agressividade ambiental.	23
Tabela 3 - Correspondência entre cobertura nominal da armadura e classe de concreto por classe de agressividade ambiental em estruturas de concreto armado.....	23
Tabela 4 – Teores Máximos de íons Cloreto para estruturas de concreto armado. ...	30
Tabela 5 – Relação Penetração íons cloreto x Resistividade elétrica superficial.	42
Tabela 6- Risco de corrosão vs. Resistividade elétrica superficial.	42
Tabela 7 – Resistividade elétrica vs. Risco de corrosão	42
Tabela 8 – Diferença de potencial elétrico x probabilidade de corrosão.	46
Tabela 9 – Cimento CPV ARI.....	52
Tabela 10 - Caracterização cimento CPV ARI.	53
Tabela 11 – Granulometria agregado miúdo.....	54
Tabela 12 – Caracterização física da areia quartzosa.	54
Tabela 13 – Granulometria agregado graúdo.....	55
Tabela 14 – Caracterização física da brita gnaisse.....	56
Tabela 15 – Caracterização aditivo.	56
Tabela 16 – Traços dos concretos (em massa).	58
Tabela 17 – Potenciais dos eletrodos de referência em relação ao eletrodo padrão de Hidrogênio (EPH).....	78
Tabela 18 - Interpretação do coeficiente de correlação (R).....	86
Tabela 19 – Índice de consistência dos concretos.	87

Tabela 20 – Resultados de absorção de água 28 e 90 dias.....	89
Tabela 21 – ANOVA Absorção de água 28 e 90 dias.	89
Tabela 22 - Teste de Tukey entre mesmo traço e diferentes idades.....	90
Tabela 23 – Teste de Tukey Absorção de água aos 28 e 90 dias.....	90
Tabela 24 – Resultados dos índices de vazios aos 28 e 90 dias.	91
Tabela 25 - ANOVA Índice de vazios 28 e 90 dias.....	92
Tabela 26 – Teste de Tukey índice de vazios mesmo traço diferente idades.	92
Tabela 27 - Teste de Tukey índice de vazios aos 28 e 90 dias.....	93
Tabela 28 – Resultados de resistência à compressão aos 28 e 90 dias.....	94
Tabela 29- ANOVA resistência à compressão 28 e 90 dias.....	94
Tabela 30 – Teste de Tukey mesmo traço diferentes idades.....	95
Tabela 31 – Teste de Tukey resistência à compressão 28 e 90 dias.....	95
Tabela 32 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade 28 e 90 dias.	96
Tabela 33 - ANOVA módulo de elasticidade dinâmico 28 e 90 dias.	97
Tabela 34 – Resultados do ensaio de Resistividade elétrica superficial 28 e 90 dias.	98
Tabela 35 - ANOVA resistividade elétrica superficial aos 28 e 90 dias.	99
Tabela 36 – Teste de Tukey resistividade elétrica superficial mesmo traço diferentes idades.....	99
Tabela 37 – Teste de Tukey resistividade elétrica superficial aos 28 e 90 dias.	99
Tabela 38 – Resistividade elétrica volumétrica 28 e 90 dias.....	100
Tabela 39- ANOVA resistividade elétrica volumétrica aos 28 e 90 dias.....	101
Tabela 40- Teste Tukey resistividade elétrica volumétrico mesmo traço diferentes idades.....	101
Tabela 41 – Teste de Tukey resistividade elétrica volumétrica 28 e 90 dias.....	102

Tabela 42 – ANOVA resistividade elétrica superficial ao longo das idades do período de controle para os quatro traços.	107
Tabela 43 - ANOVA 55°C para -5°C resistividade elétrica superficial.	109
Tabela 44 - ANOVA -5°C para 55°C resistividade elétrica superficial.	109
Tabela 45 – ANOVA início e fim do ciclo para cada temperatura.....	110
Tabela 46 - Teste Tukey entre traços para cada temperatura resistividade elétrica superficial.....	111
Tabela 47 – ANOVA temperatura 55°C e -5°C para velocidade de corrosão.	115
Tabela 48 – ANOVA 55°C para -5°C velocidade de corrosão.....	115
Tabela 49 – ANOVA -5°C para 55°C velocidade de corrosão.....	115
Tabela 50 - ANOVA início e fim do ciclo para cada temperatura velocidade de corrosão.....	117
Tabela 51 – Modelos numéricos para determinação de resistividade elétrica superficial do concreto e velocidade de corrosão de armaduras em função da temperatura.	122
Tabela 52 – Resistividade elétrica superficial mínima para velocidade de corrosão igual a $0,1\mu A/cm^2$ em concretos contaminados com cloretos.	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AASHTO	-	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	-	Relação água/cimento
ACI	-	American Concrete Institute
Al ₂ O ₃	-	Óxido de Alumínio
ANOVA	-	Análise de Variância
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
°C	-	Graus Celsius
CaCl ₂	-	Cloreto de Cálcio
C ₃ A	-	Aluminato Tricálcico
C ₄ AF	-	Ferroaluminato Tetracálcico
C ₂ S	-	Silicato Dicálcico
C ₃ S	-	Silicato Tricálcico
Cl ⁻	-	Cloreto
COPASA	-	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CPV ARI	-	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CSN	-	Companhia Siderúrgica Nacional
Cu	-	Cobre
CuSO ₄	-	Sulfato de Cobre
ddp	-	Diferença de Potencial
DRX	-	Difração de Raio-x
E _{corr}	-	Potencial de Corrosão

Fe^{2+}	-	Óxido de Ferro
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	-	Hidróxido de Ferro
FeCl_2	-	Cloreto de Ferro
H^+	-	Cátion Hidrogênio
H_2O	-	Água
i	-	Corrente Elétrica
i_{corr}	-	Velocidade ou Taxa de Corrosão
ICDD	-	International Centre For Diffraction Data
I_v	-	Índice de Vazios
mA	-	Miliampère
mV	-	Milivolt
m_{sat}	-	Massa Saturada de Água
m_i	-	Massa Imersa
m_s	-	Massa Seca
NaCl	-	Cloreto de Sódio
O_2	-	Oxigênio
OH^-	-	Hidróxido
pH	-	Potencial de Hidrogênio
R_p	-	Resistência de Polarização

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	21
3. REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1 CORROSÃO DE ARMADURAS	22
3.1.1 TIPOS DE CORROSÃO	26
3.1.2 AÇÃO DOS ÍONS CLORETOS	28
3.1.3 TEOR DE UMIDADE	32
3.1.4 TEMPERATURA	34
3.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO	39
3.2.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL	40
3.2.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA	43
3.3 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO	45
3.3.1 POTENCIAL DE CORROSÃO	45
3.3.2 POLARIZAÇÃO LINEAR	47
4. MATERIAIS E MÉTODOS	50
4.1 MATERIAIS	52
4.1.1 CIMENTO PORTLAND CPV ARI	52
4.1.2 AREIA QUARTZOSA	53
4.1.3 BRITA GNAISSE	55
4.1.4 ADITIVO	56
4.1.5 AÇO	57

4.1.6	ÁGUA.....	57
4.1.7	REAGENTES.....	57
4.2	PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DOS CONCRETOS	57
4.2.1	TRAÇOS UTILIZADOS.....	58
4.2.2	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	59
4.2.3	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS.....	60
4.3	MÉTODOS DE ANÁLISE / CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	66
4.3.1	SLUMP TEST	66
4.3.2	CALORIMETRIA.....	67
4.3.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	68
4.3.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE POR FREQUÊNCIA RESSONANTE.....	69
4.3.5	ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS	71
4.3.6	RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA	72
4.3.7	RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL.....	75
4.3.8	POTENCIAL DE CORROSÃO.....	76
4.3.9	POLARIZAÇÃO LINEAR	79
4.3.10	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	81
4.3.11	EXPOSIÇÃO DO CONCRETO A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	81
4.3.12	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	85
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	87
5.1.1.	SLUMP TEST	87

5.1.2 CALORIMETRIA.....	88
5.1.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS	88
5.1.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS	93
5.1.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE.	96
5.1.6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA	98
5.1.7 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	103
5.2 CICLOS DE TEMPERATURA.....	104
5.2.1 MONITORAMENTO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS.....	104
5.2.2 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA	108
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
7. REFERÊNCIAS	129

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado são constantemente expostas a diversos fatores ambientais, como amplitude térmica, variação dos teores de umidade e presença de agentes agressivos, o que torna o estudo da durabilidade uma tarefa central para alcançar o desempenho esperado na vida útil das estruturas (ANDRADE *et al.*, 1988; YI *et al.* 2020).

A corrosão das armaduras é apontada como o principal problema relacionado à durabilidade das estruturas de concreto armado, ocasionando em reparos dispendiosos, que por vezes faz-se necessária a substituição completa ou parcial das armaduras e/ou reforços estruturais a fim de se estender sua durabilidade e prolongar sua vida útil (HELENE, 1993; MELO, LAURENTINO E SANTOS, 2021). Isto ocorre pois o volume de produtos da corrosão causa fissuras no concreto, diminui a aderência entre as barras e o concreto, além de causar perda de seção e diminuição de sua capacidade portante (GJØRV, 2015; CHAUHAN e SHARMA, 2019).

Na avaliação da durabilidade no que tange a corrosão das armaduras deve-se levar em consideração a caracterização do concreto e do ambiente onde ficará exposto. A escolha correta dos materiais e definição compatível dos métodos construtivos a serem utilizados, assim como a manutenção ao longo de sua utilização também influenciará o desempenho do concreto no decorrer de sua vida útil (MEIRA, 2017).

Sendo assim a durabilidade passou a ser mensurada a partir de modelos que avaliam o grau de agressividade do meio ambiente, métodos de análise da qualidade do concreto, métodos de análise da qualidade da armadura, geometria da estrutura e análise de resistência da própria estrutura (HELENE, 1993; FREITAS e REGGIANI, 2019).

A corrosão é um processo agressivo que necessita de acompanhamento contínuo ao longo da vida útil da estrutura. A corrosão tem seu início após a despassivação da

armadura que pode ocorrer pelo efeito da carbonatação ou da ação de íons cloreto (HELENE, 1993).

Diferentes ensaios analisam o estado de corrosão das armaduras e as condições de mobilidades de íons no interior do concreto. Ensaios não destrutivos para determinação da resistividade elétrica e avaliação da corrosão são muito utilizados como uma maneira rápida e simples para inspeção e monitoramento de estruturas. Com estas técnicas é possível obter informações com relação às condições internas do concreto e processo corrosivo da armadura (WOSNIACK *et al.*, 2021).

Contudo, os valores obtidos pelos ensaios de resistividade elétrica, potencial de corrosão e velocidade de corrosão podem sofrer alterações devido a variação da temperatura. Esse parâmetro influencia diretamente na mobilidade iônica e, conseqüentemente, na cinética de corrosão. Compreender como a estrutura se comporta frente a ação de agentes agressivos em diferentes temperaturas contribui para o entendimento e interpretação dos resultados dos ensaios realizados em diversas condições climáticas (CHAUHAM e SHARMA, 2019).

A temperatura possui um significativo efeito na durabilidade das estruturas, assim como nos resultados de ensaios em diagnósticos das mesmas. Alguns autores como Polder *et al.* (2000); Resende *et al.* (2012); Chauhan e Sharma (2019); consideram que as variações climáticas, temperatura e umidade, resultam em uma flutuação das taxas de corrosão das armaduras e resistividade elétrica do concreto.

Quanto maior a amplitude térmica, maior será essa flutuação, por isso a importância de se obter maior conhecimento a cerca desta influência, principalmente na ciência diagnóstica de estruturas afetadas pela corrosão de armaduras.

Observa-se que são poucos os estudos sobre a influência dos fatores climáticos, temperatura e umidade, sobre concretos armados. Também não foram encontrados na literatura estudos que correlacionam relação água/cimento, temperatura e corrosão das armaduras. Neste contexto este trabalho analisa a influência da temperatura na resistividade elétrica e no processo corrosivo provocado pelo ataque de cloretos em armaduras de concreto armado com diferentes relações água/cimento.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da temperatura sobre a resistividade elétrica superficial e a cinética de corrosão da armadura do concreto contaminado com cloretos. Desta forma, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de concretos com diferentes relações água/cimento, contaminados e não contaminados com cloretos;
- Avaliar o efeito da temperatura e da relação água/cimento na resistividade elétrica superficial de concretos contaminados e não contaminados com cloretos;
- Analisar o efeito da temperatura e da relação água/cimento no potencial de corrosão e velocidade de corrosão de armaduras em concretos contaminados e não contaminados com cloretos;
- Apresentar correlações entre resistividade elétrica e cinética de corrosão para diferentes temperaturas em concretos contaminados e não contaminados com cloretos.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os principais tópicos relacionados à corrosão de armaduras, em especial àquela desencadeada pela ação de íons cloreto. Também são discutidos os principais fatores que influenciam esse processo, com foco no efeito da temperatura sobre os ensaios para determinação de resistividade elétrica e avaliação da corrosão.

3.1 CORROSÃO DE ARMADURAS

A corrosão do aço é um dos principais e mais comuns mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado. Ela está diretamente ligada às condições de durabilidade, e por isso os estudos sistemáticos relacionados a esse processo são cada vez mais relevantes (GJØRV, 2015).

De maneira geral, esse processo está relacionado com a interação destrutiva do material metálico com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica ou pela combinação destas (HELENE, 1993). Por isso normas como a NBR 6118 (ABNT, 2014), NBR 12655 (ABNT, 2015), ACI 318M (ACI, 2019), BS EN 206 (BSI, 2016) apresentam requisitos mínimos para projeto e execução das obras de engenharia. Esses requisitos dizem respeito, por exemplo, à relação água/cimento, compatibilidade de materiais com os agentes agressivos do meio, compatibilidade entre os materiais a serem usados, cobertura mínima das armaduras e consumo de cimento por metro cúbico de concreto.

As Tabelas 1, 2 e 3 ilustram alguns desses critérios especificados pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Os parâmetros determinados pelas normas têm como objetivo oferecer características de qualidade do concreto em relação a cada ambiente, para minimizar os processos destrutivos às estruturas. Entretanto, tais parâmetros não extinguem a necessidade de ações de manutenção ao longo da vida útil das estruturas (COSTA; LIMA; PERES, 2021).

Tabela 1 – Classe de agressividade ambiental.

Classe de Agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha Industrial	Grande
IV	Muito Forte	Industrial Respingo de maré	Elevado

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014)

Tabela 2 - Relações máximas para concreto armado de água/cimento e classe de concreto armado por classe de agressividade ambiental.

Concreto	Classe de agressividade			
	I	II	III	IV
Relação a/c em massa	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
Classe de concreto	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014)

Tabela 3 - Correspondência entre cobrimento nominal da armadura e classe de concreto por classe de agressividade ambiental em estruturas de concreto armado.

Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
	I	II	III	IV
	Cobrimento nominal mm			
Laje	20	25	35	45
Viga/ Pilar	25	30	40	50
Elementos estruturais em contato com o solo		30	40	50

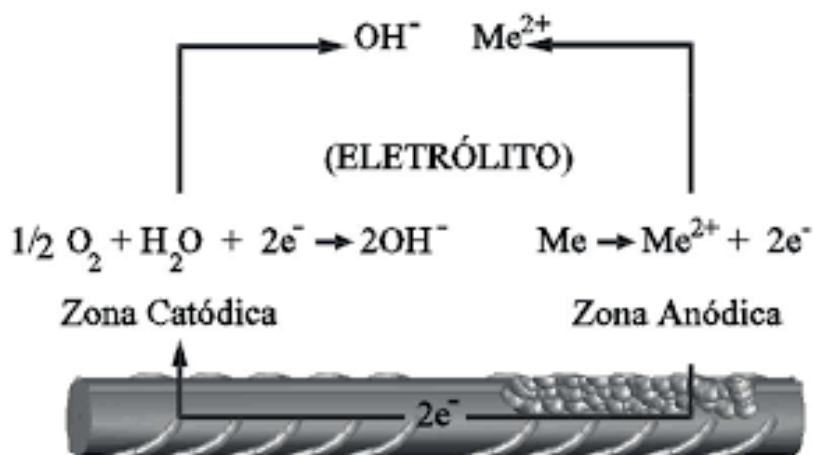
Fonte: Adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2014)

A corrosão é um processo que pode ocorrer de duas formas: processo de corrosão química e processo de corrosão eletroquímica. No caso da construção civil, o processo mais comum de ocorrer nas estruturas de concreto armado é o eletroquímico, gerando uma reação de oxidação e uma reação de redução pelo movimento de íons através de um eletrólito (ANDRADE *et al.*, 1988). Nesse processo, ocorre a formação de pilhas ou células eletroquímicas devido a presença de umidade, água ou uma solução aquosa na superfície das barras ou nos poros do concreto (HELENE, 1993). Devido a variedade de fatores, os ambientes podem ser classificados como mais ou menos agressivos para as estruturas, e isso irá interferir diretamente na geometria, nos materiais a serem utilizados, nos planos de manutenção preventiva e corretiva, entre outros detalhes do projeto (GJØRV, 2015).

De acordo com Helene (1986), para a evolução da corrosão das armaduras no interior do concreto armado é preciso que haja concomitantemente um eletrólito, uma diferença de potencial, e oxigênio. O eletrólito é o meio pelo qual os íons irão se deslocar gerando uma corrente iônica, e também onde haverá a dissolução do oxigênio. A diferença de potencial consiste no trabalho a ser realizado pela unidade de carga por um campo elétrico para que ocorra uma movimentação de uma carga elétrica. Oxigênio é necessário para regular integralmente as reações de corrosão.

Com a formação da pilha eletroquímica (Figura 1), surge uma zona anódica e uma zona catódica. O ânodo tipifica-se pela passagem do material em estado metálico para o estado iônico em um processo de oxidação, e o cátodo onde são consumidos os elétrons gerados na zona anódica em um processo de redução (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013).

Figura 1 - Representação de uma pilha de corrosão através do processo eletroquímico.

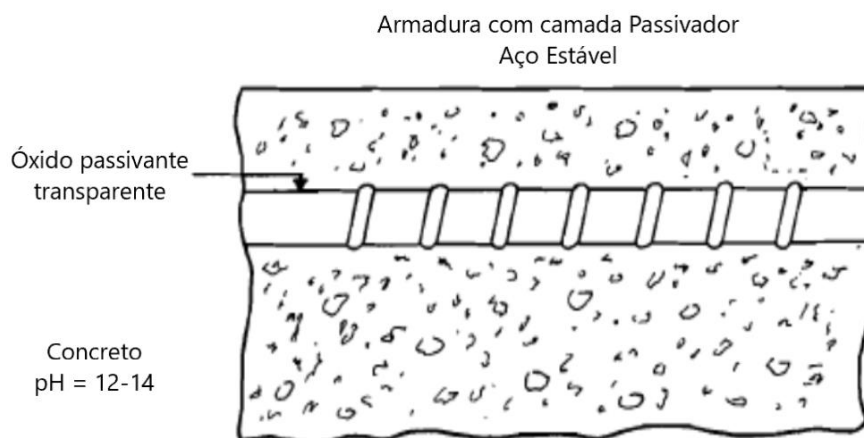


Fonte: (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013)

Na zona anódica ocorre a oxidação do metal que gera a liberação de elétrons, que deslocam pelo metal até a zona catódica onde ocorre a reação de redução, concluindo o circuito elétrico através do eletrólito (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013). O produto proveniente da corrosão eletroquímica é heterogêneo, poroso e de baixa aderência, formado por óxidos e hidróxidos de ferro na superfície das armaduras (HELENE, 1993).

Entretanto, o processo corrosivo da armadura de aço carbono só se dá com a despassivação da mesma. Esse fenômeno consiste na perda da camada passivadora, que se trata de uma película que envolve o aço devido à natureza alcalina do concreto. Ela é formada pela presença de hidróxidos de potássio e sódio (KOH e NaOH) presentes na composição cimentícia, normalmente com um pH entre 13 a 14 (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013). Esta película exerce uma proteção na armadura por apresentar uma elevada resistência ôhmica impedindo o fluxo de corrente ao longo das barras tornando desprezível a chance de ocorrência de corrosão (Figura 2).

Figura 2 - Representação da armadura imersa em concreto não contaminado.

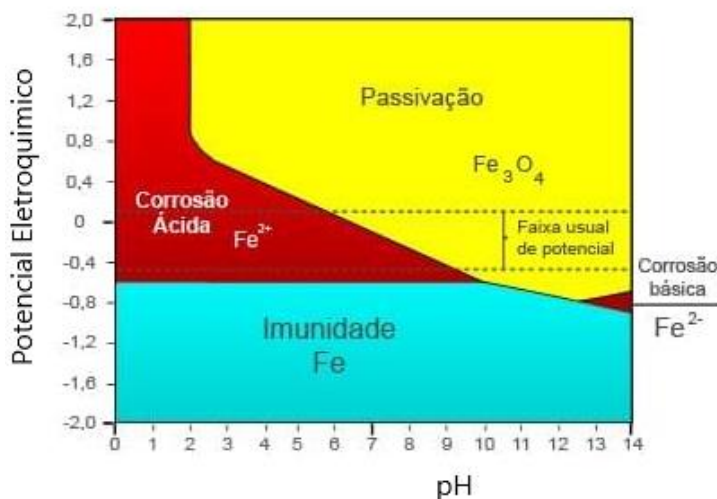


Fonte: Adaptado de (ANDRADE *et al.*, 1988)

Entretanto, com a alteração do pH para valores mais baixos através de processos químicos, esta película sofre alterações e perde sua condição passivadora. Pelo fato de o potencial elétrico estar diretamente ligado ao processo corrosivo e depender do valor do pH, é possível se estabelecer graficamente esta relação, como representado no diagrama de Pourbaix (Figura 3) (ANDRADE *et al.*, 1988).

O diagrama de Pourbaix determina o potencial elétrico (consequentemente o potencial de corrosão) de acordo com os valores do pH a uma temperatura de 25°C. Assim, são definidas as regiões em que o metal fica imune, passivado ou sofre corrosão em água pura. Fundamentalmente, os diagramas de Pourbaix são termodinâmicos e, por isso, não apresentam informações em relação às velocidades dos processos (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013).

Figura 3 - Diagrama de potencial elétrico / pH.



Fonte: Adaptado de POURBAIX (1974)

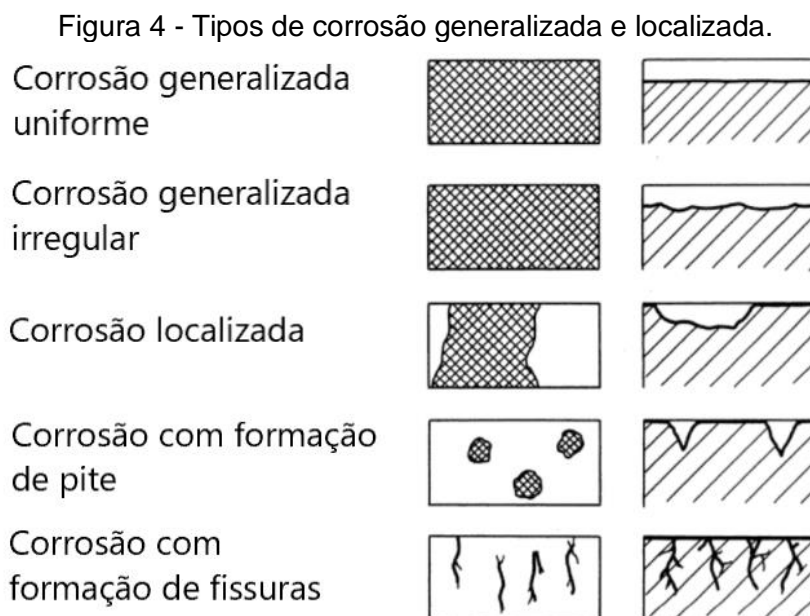
Por essa razão, não é somente necessário considerar se um metal entra em processo corrosivo, mas também a velocidade com que acontece esse processo. Isso porque tal fenômeno pode ocorrer tão lentamente, que para fins de vida útil e durabilidade, se torna insignificante. A perda da estabilidade da película passivadora da armadura é o fator que possibilita o processo de corrosão do aço, entretanto a cinética do fenômeno é influenciada pela natureza do eletrólito, teor de oxigênio e resistividade elétrica do meio (ANDRADE *et al.*, 1988).

3.1.1 TIPOS DE CORROSÃO

De acordo com Tuutti (1982), o processo corrosivo pode ser dividido em dois estágios: iniciação e propagação. O primeiro corresponde ao ingresso de agentes agressivos (como CO_2 e cloretos) no concreto até resultar na ruptura da camada passivadora da armadura. Já o segundo estágio corresponde ao processo ativo da corrosão até o estado final do processo corrosivo, caso medidas reparadoras não sejam tomadas.

A corrosão pode ocorrer de maneira generalizada e de maneira localizada. Na corrosão generalizada, o desgaste do material pode acontecer de forma mais ou menos uniforme, porém desenvolve-se em extensas áreas do metal. Já a corrosão localizada se desenvolve em uma área limitada do metal, normalmente se

desenvolvendo de forma mais rápida do que o processo generalizado. Devido a essas variações nos processos, a morfologia das corrosões também varia como pode se observar na Figura 4.



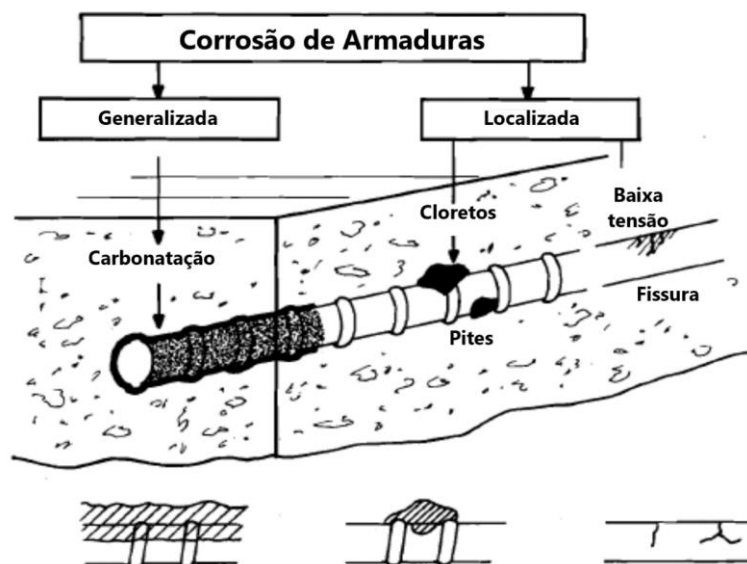
Fonte: Adaptado de FELIU (1984)

Na corrosão generalizada existem numerosos ânodos e cátodos produzindo micropilhas que estão sempre mudando. Neste caso, a perda de seção pode ser uniforme ou irregular. Na corrosão localizada ocorrerá corrosão intermediária entre a corrosão uniforme e a corrosão por pites. A corrosão ocorre em áreas mais ou menos extensas do material, que são anódicas em relação a outras áreas por diferentes razões. Uma das razões para isso ocorrer pode ser a mudança ou heterogeneidade da composição química dos materiais circundantes ou do eletrólito (ANDRADE *et al.* 1988).

Na corrosão por pites ocorrerá corrosão em áreas discretas do material, essas áreas são mais ativas que o restante da superfície. Esta forma de corrosão muito comum quando há a ação de contaminantes no concreto, como por exemplo a presença de cloretos acima dos valores críticos (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013). A corrosão com formação de fissuras acontece nos casos em que, além das circunstâncias capazes de desenvolver a corrosão, a estrutura encontra-se sob consideráveis tensões, sobretudo à tração (MEIRA, 2017).

Tratando-se de estruturas de concreto armado, os tipos mais comuns de corrosão são: a corrosão generalizada irregular desencadeada pela ação da carbonatação, e a corrosão por pites desencadeada pela ação de íons cloretos. Na Figura 5 é possível ver uma representação dos tipos de corrosão generalizada e localizada e suas causas e consequências.

Figura 5 - Tipos de corrosão e suas causas.



Fonte: adaptado de ANDRADE *et al.* (1988)

A compreensão das características dos mecanismos causadores do processo corrosivo é importante para o diagnóstico da manifestação patológica e influenciará na técnica de tratamento a ser realizada (MEIRA, 2017). O presente estudo é focado na corrosão de armaduras por ação dos cloretos, cujos conceitos e características são descritos a seguir.

3.1.2 AÇÃO DOS ÍONS CLORETOS

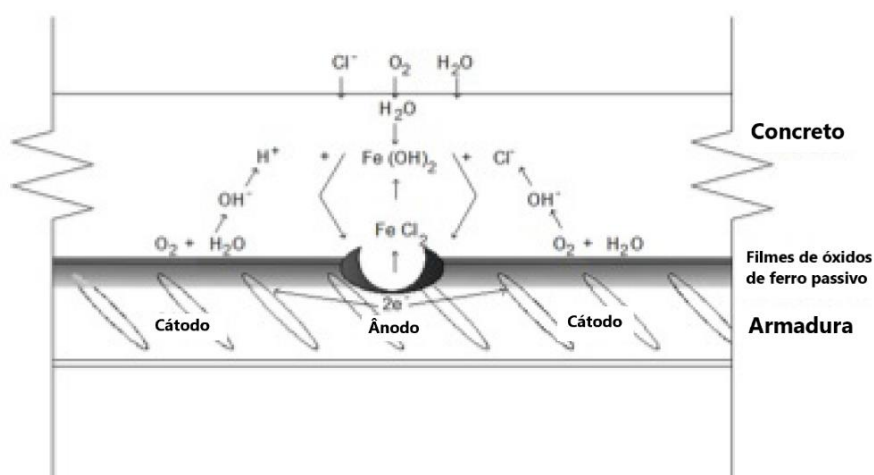
Os íons cloretos possuem papel importante no processo de despassivação da película protetora da armadura de aço. A corrosão induzida por cloretos é uma das causas mais comuns e preocupantes de degradação das estruturas de concreto armado, pois são do tipo pite formadas em áreas localizadas e profundas (TORRES, 2011). Nestes pontos onde os cloretos juntamente com a água e oxigênio entram em contato com o

aço são formados os ânodos da pilha. Devido à evolução do processo, ocorre a redução da barra, diminuindo sua seção e ocasionando em sua perda de resistência e, conseqüentemente, sua ruptura (ANDRADE *et al.* 1988).

Na literatura ainda não há um consenso em relação ao mecanismo do processo de despassivação gerado pelos íons cloreto. Isso se deve, de acordo com a ACI 222R-01 (2001), ao fato da dificuldade de se examinar o processo em escala atômica. De acordo com Helene (1993) existem três teorias para explicar os efeitos dos cloretos na corrosão do aço:

- I. *Teoria do complexo transitório:* os íons cloretos se combinam com os íons de ferro Fe^{2+} formando moléculas de cloreto de ferro ($FeCl_2$). Entretanto, ao perder estabilidade por intermédio da hidrólise, os íons cloretos são liberados para realizar novas reações, ocorrendo também a liberação dos íons de hidrogênio. A liberação destes íons de hidrogênio resulta em um aumento da acidez na zona anódica, tornando o potencial mais negativo nesta área. Já a liberação de hidróxidos (em razão das reações catódicas) eleva o pH dessas áreas, resultando na diminuição da possibilidade de corrosão na zona catódica. Com a evolução do processo, mais íons cloreto penetram no concreto para participar de novas reações. O processo é representado pela Figura 6.

Figura 6 - Formação de pite de corrosão.



- II. *Teoria do filme de óxido:* os íons cloreto penetram nos defeitos do filme de óxido (camada passivadora) do aço por possuir maior facilidade em comparação a outros íons agressivos, além de se dispersar nesta camada devido a sua natureza solúvel.
- III. *Teoria da adsorção:* os íons cloreto são adsorvidos na superfície do aço, concorrendo com as hidroxilas e o oxigênio dissolvido, resultando na hidratação do ferro e promovendo sua dissolução em cátions.

Em razão da natureza higroscópica dos cloretos, quando presente em grande quantidade no concreto, resulta em uma maior conservação da umidade. Isso leva a um aumento do risco de corrosão devido a diminuição da resistividade elétrica (TUUTTI, 1982).

De acordo com Helene (1993), os cloretos podem ser oriundos de água do mar, atmosferas marinhas, lavagem de fachadas e pisos com ácido muriático, atmosferas industriais, produtos armazenados em tanques industriais, utilização de sais de degelo. Entretanto, o autor também salienta a possibilidade de contaminação por cloretos no processo de fabricação do concreto. Isso pode ser dar na utilização de aditivos que possuam em suas composições cloreto de cálcio (CaCl_2) e agregados contaminados, além do cloro adicionado pelas companhias de saneamento no processo de tratamento de água.

Devido ao seu alto risco para a degradação de estruturas de concreto armado, teores máximos de cloretos no concreto são apresentados em normas nacionais e internacionais (Tabela 4).

Tabela 4 – Teores Máximos de Íons Cloreto para estruturas de concreto armado.

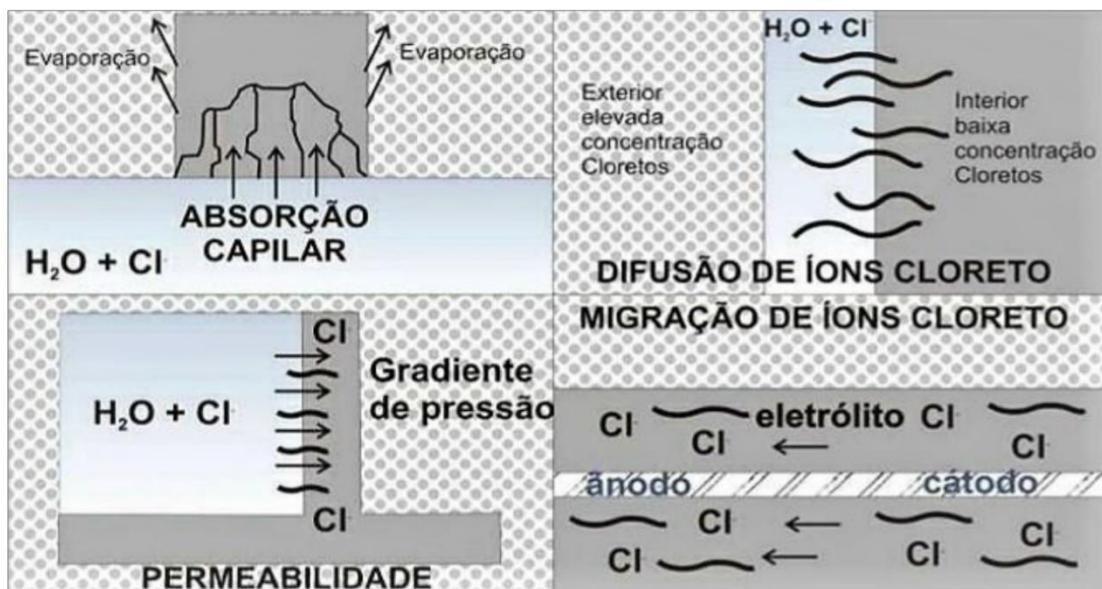
Norma	Faixa teores máximos em % em relação à massa de cimento
EN 206-1/2017	0,20 a 0,40%
NBR 12655/2015	Classe III e IV 0,15%, Classe II 0,30% e Classe I 0,40%
ACI 318	Classe C0 1%, Classe C1 0,30% e Classe C2 0,15%

Percebe-se que, quanto maior a classe de agressividade ambiental em que a estrutura se encontra, menor são os teores de íons cloretos permitidos no concreto.

Os cloretos agressivos às estruturas encontram-se naturalmente dissolvidos em água. Na forma de cristais não apresentam condições de penetração nos poros das estruturas. O risco de os cloretos induzirem um processo de corrosão aumenta com a facilidade de migração do íon através da matriz cimentícia. Isso devido à alta permeabilidade da microestrutura, presença e conectividade de poros, e existência de fissuras.

Os mecanismos de transporte para penetração dos íons cloretos nas estruturas de concreto são: absorção capilar, permeabilidade, difusão e migração (Figura 7).

Figura 7 - Mecanismos de transporte dos cloretos no concreto.



Fonte: Helene (1993).

A absorção capilar refere-se ao transporte de íons devido à diferença de teor de umidade, uma vez que a água contendo cloretos se move em direção às áreas com teores de umidade mais baixos. A permeabilidade se dá pelo transporte de íons cloretos devido a diferença de pressão hidráulica em diferentes áreas do concreto, uma vez que os cloretos buscam áreas de menor pressão. A migração é o transporte de íons cloretos devido a diferença de potencial elétrico, uma vez que os íons negativos do cloro se deslocam em direção ao ânodo, região de menor potencial

elétrico. Por fim, a difusão é o transporte de íons cloretos devido a diferença de concentração em diferentes áreas do concreto, acontecendo no sentido das áreas de menor concentração.

De acordo com Helene (1993), a absorção capilar é o processo de maior ocorrência e intensidade, seguidas pela difusão e pela permeabilidade por gradiente de pressão. Já a migração trata-se de um mecanismo secundário onde ocorre a movimentação dos íons originados pelos campos elétricos das pilhas eletroquímicas. Em regiões marinhas, onde o ambiente está sujeito a contato com água salgada, névoas marinhas e ciclos de molhagem e secagem, a difusão torna-se o mecanismo de transporte predominante (GJØRV, 2015).

Entretanto, os mecanismos de transporte dos íons podem ocorrer simultaneamente ou em momentos distintos ao longo do tempo dependendo das variações das condições ambientais aos quais se encontram. Por exemplo, a umidade e temperatura que variam ao longo das estações e podem alterar a intensidade e ocorrência dos fenômenos acelerando ou retardando o processo (HELENE, 1993). A seguir, são discutidas as influências desses dois parâmetros (teor de umidade e temperatura) no processo corrosivo da armadura em estruturas de concreto.

3.1.3 TEOR DE UMIDADE

A taxa de corrosão do aço presente no concreto armado é diretamente influenciada por fatores ambientais de macro e microclima. Tanto as taxas de oxigênio quanto os teores de umidade influenciam no processo de corrosão eletroquímico. Portanto, só haverá corrosão quando houver um nível mínimo de umidade. Uma estrutura que se encontra seca e/ou com baixa umidade não permitirá a mobilidade dos íons, uma vez que a umidade é o eletrólito do processo eletroquímico (GJØRV, 2015).

Por outro lado, é importante considerar que o concreto totalmente saturado impossibilita o acesso de oxigênio, fazendo com que o processo corrosivo ocorra de forma muito lenta. Os teores de umidade no qual a estrutura se encontra reflete nas condições de umidade presente na microestrutura da matriz do concreto, com reflexo na velocidade do processo de carbonatação e no transporte de íons cloreto. As

maiores taxas de corrosão ocorrem quando o concreto se encontra com alto teor de umidade (em torno de 70%), porém não saturado (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013).

Basicamente os poros do concreto se encontram em três condições: (I) baixa umidade relativa, onde há pouca presença de água nos poros e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade de eletrólito e gerando maior dificuldade da movimentação dos íons e aumento da resistividade; (II) alta umidade relativa, onde há presença de eletrólito e condições de acesso de oxigênio, sendo a condição onde ocorre de maneira mais intensa o processo corrosivo eletroquímico; (III) poros saturados, onde é a condição onde a resistividade é a menor possível, porém, devido a saturação o oxigênio, encontra maior dificuldade em acessar a armadura resultando em um controle do processo corrosivo (Figura 8) (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013). De acordo com Li *et al.* (2020), a ação dos cloretos nas zonas de respingos é considerada a mais severa e a exposição submersa a menos severa.

Figura 8 - Conteúdo da umidade nos poros em função da umidade ambiental.



Fonte: Adaptado de ANDRADE *et al.* (1988)

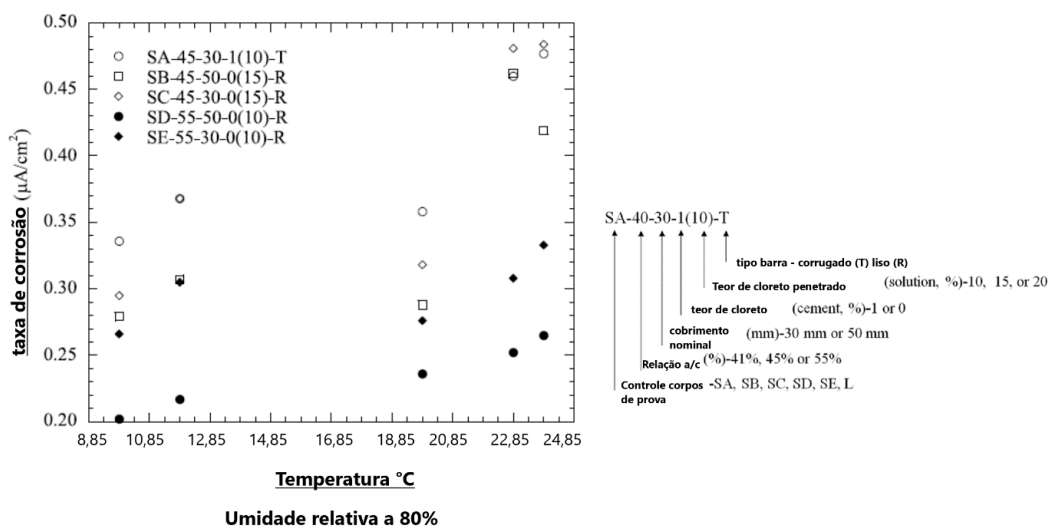
De acordo com Andrade *et al.*, (1988), o concreto é um material que absorve facilmente a umidade do ambiente, entretanto seca muito lentamente. Sendo assim, quando a umidade externa é constante, ocorre um equilíbrio entre o teor interno e o externo. Porém, quando o teor de umidade oscila, o interior da estrutura não detecta as variações, fazendo com que haja uma diferença entre o teor da umidade mais superficial e interna da estrutura.

3.1.4 TEMPERATURA

A temperatura desempenha um papel duplo nos processos deletérios. Ao se elevar a temperatura, a mobilidade das moléculas é estimulada, influenciando a interação íon-íon e íon-sólido, contribuindo com seu transporte através da microestrutura do concreto. Por outro lado, a diminuição da temperatura, acarreta a condensação da água no concreto, causando um aumento da umidade do material.

É importante salientar que a umidade, o oxigênio e a temperatura podem exercer efeitos conflitantes, por exemplo, uma maior umidade proporciona aumento nos mecanismos de transporte dos íons, mas impede o acesso do oxigênio em níveis de saturação, enquanto o aumento da temperatura acelera a corrosão, mas diminui a condensação (ANDRADE *et al.*, 1988; GOÑI *et al.*, 1989, HELENE, 1993; FIGUEIREDO, 2011). Lun *et al.* (2021) demonstra que o aumento da temperatura faz com que os coeficientes de difusão se tornam maiores, o que gera um aumento na taxa de corrosão (Figura 9). Isso afeta também o teor de cloreto, concentração de oxigênio e resistividade do concreto. Quando os valores de temperatura ultrapassam os 60°C ou a umidade relativa ultrapassa os 95%, a taxa de corrosão diminui. Isso devido à diminuição da quantidade de oxigênio dissolvido na água, o que é um dos fatores essenciais para que ocorra a reação catódica.

Figura 9 - Influência da temperatura na taxa de corrosão.



Fonte: Adaptado de LUN *et al.* (2021).

No estudo de Raphael e Shalon (1971), foi demonstrado que a cada 20°C acréscimos na temperatura, o processo corrosivo duplica. Além disso, tais valores de corrosão podem ocorrer de maneira mais expressiva se a umidade relativa se encontrar na faixa crítica entre 50 e 90%. Já Tuutti (1982) investigou os efeitos das baixas temperaturas nas estruturas de concreto e concluiu que a velocidade de corrosão do aço é reduzida 10 vezes a cada diminuição na ordem de 20°C (em temperaturas abaixo de 0°C). A temperatura do concreto desempenha uma relevante participação nos valores da taxa de difusão de íons cloreto, elevando-a com o aumento da temperatura e apresentando um papel importante na previsão da vida útil das estruturas. Assim, a temperatura é uma importante variável envolvida nas taxas de difusão dos cloretos nos poros do concreto (DOUSTI *et al.*, 2013).

De acordo com ensaios realizados por Al-Khaja (1997), a penetração de cloretos no concreto aumenta de maneira expressiva ao comparar duas temperaturas distintas, especialmente quando a temperatura se elevou de 20°C para 45°C. Além disso, também relata que o aumento significativo dos cloretos foi mais substancial em concretos convencionais em comparação a concretos de alta resistência, devido à maior porosidade do primeiro.

Já Alhozaimy *et al.*, (2014) concluíram que o aumento da temperatura acarretou alterações no filme passivador da armadura, desestabilizando as fases do óxido de tal forma a potencializar o processo corrosivo. Devido a influência que a temperatura exerce na mobilidade das moléculas, sua variação tem um importante efeito na cinética de difusão dos cloretos, podendo ser considerada um catalisador para o processo corrosivo (FIGUEIREDO, 2005, TOUIL *et al.*, 2017.). Outro ponto a ser considerado com relação a temperaturas elevadas é o fato da sua influência já nas idades iniciais do concreto. Isso resulta em uma microestrutura mais porosa, tanto em quantidade quanto em dimensão, facilitando a penetração dos íons cloreto (NEVILLE, 2015).

Em relação à resistividade elétrica do concreto, a variação da temperatura apresenta significativas alterações nos valores. Entende-se que a resistividade elétrica é tida como a capacidade de um determinado meio em resistir à passagem da corrente elétrica. Essa propriedade está diretamente ligada à porosidade do concreto e às

condições que ele oferece para penetração e transporte dos agentes deletérios (DI MAIO E ZACCARDI, 2014; DINIZ, 2018). Considerando um teor de umidade constante, a elevação da temperatura gera uma queda da resistividade elétrica. Isso ocorre devido a modificação causada na mobilidade dos íons na solução presente nos poros e devido a mudanças na interação entre os íons e a matriz cimentícia (POLDER, 2000).

Entretanto, é preciso observar que o aumento da temperatura proporciona uma maior evaporação na camada externa do concreto, podendo causar um efeito contrário. Levando em consideração a situação em que a temperatura não altera os teores de umidade interna do material, a elevação da temperatura contribui diretamente para o aumento do processo corrosivo. Em situações reais de exposição, não ocorre uma estabilidade da umidade, ou seja, ao se ter a elevação da temperatura resulta em uma perda de umidade interna do concreto e o processo corrosivo diminui. Porém os efeitos não são simultâneos, levando a uma diferença temporal entre o aumento da temperatura, a variação da umidade e a diminuição do processo corrosivo (MEIRA, 2017).

Portanto, a variação da temperatura nos ambientes devido a mudança climática é um parâmetro atuante na cinética do processo corrosivo. Além de contribuir para a diminuição da vida útil das estruturas, ela pode mascarar diagnósticos de ensaios não destrutivos nas estruturas investigadas *in loco*. Ensaios para determinação da resistividade elétrica e técnicas eletroquímicas têm sido amplamente utilizados para avaliar a ocorrência (ou susceptibilidade) de corrosão de armaduras. Isso seja por meio das características do concreto ou pela ação do meio com a estrutura (VALDÉS, MEDEIROS e MACIOSKI, 2021).

Essencialmente, a resistividade elétrica se reduz com um aumento no teor de umidade como um resultado da mudança no movimento do íon (ZACCARDI e DI MAIO, 2014). Akhtar e Daniyal (2019) e Raczkiwicz e Wójcicki (2020), em seus estudos sobre técnicas de controle para avaliação de corrosão, expõem como a variação de temperatura pode interferir diretamente no processo eletroquímico, gerando dados incorretos e resultando em indicadores com baixo nível de confiabilidade. Por isso, ao se realizar ensaios de durabilidade com medições *in loco*, deve-se registrar a

temperatura ambiente e buscar, sempre que possível, obter leituras em diferentes períodos climáticos.

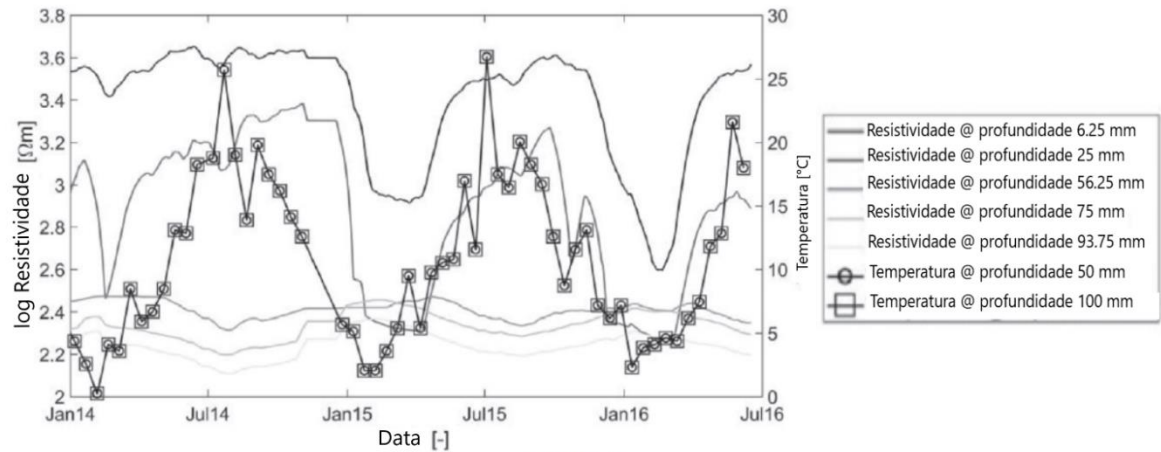
Realizando o monitoramento de uma estrutura exposta às condições ambientais em uma zona marítima pelo período de cinco anos, Michel, Sorensen, Geiker (2021) obtiveram dados da influência dos parâmetros de temperatura em relação à resistividade elétrica do concreto. Os resultados foram compilados em três gráficos, conforme apresentado na Figura 10.

Os valores de resistividade e temperatura foram obtidos em diferentes profundidades do concreto através de sensores incorporados em diferentes regiões da estrutura. Os locais foram discriminados em: MRE 3 (topo da zona de respingo de maré), MRE 4 (zona de respingo de maré) e MRE 5 (zona submersa).

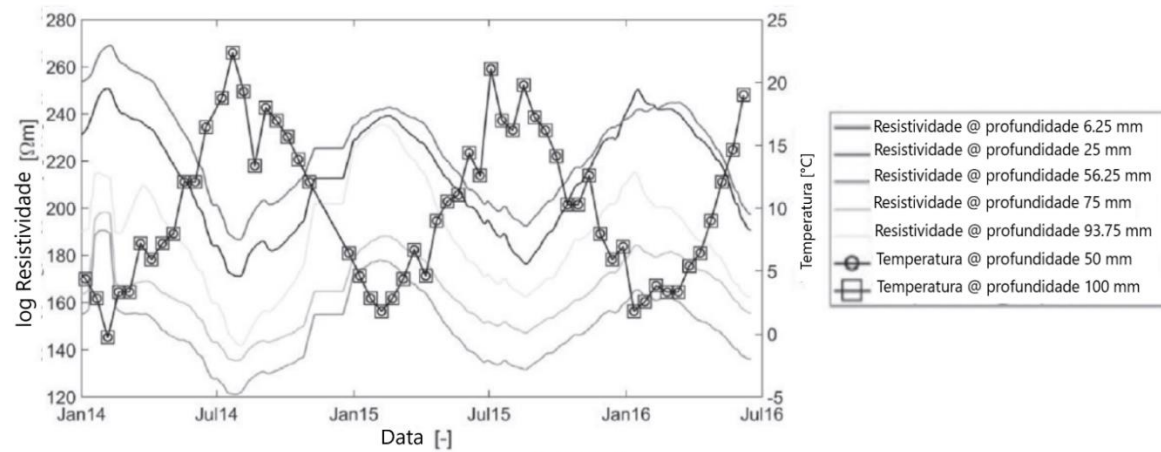
Chauhan e Sharman, (2019) concluíram que a variação das condições climáticas de umidade e temperatura em situações reais ambientais influenciaram diretamente os resultados da cinética da corrosão. Esses dados foram obtidos comparativamente com resultados estimados por modelos matemáticos onde umidade e temperatura possuíam valores constantes. Quanto maior a amplitude térmica maior deve ser a variação das taxas de corrosão.

Azarsa e Gupta (2017) também mostraram que os ensaios de resistividade elétrica podem apresentar valores alterados de acordo com as condições internas e externas da estrutura. Os principais fatores externos que influenciam os resultados são a temperatura e a umidade do ambiente. Leituras realizadas em estruturas submetida a teores de umidade mais baixos e temperaturas menores apresentam uma maior resistividade elétrica.

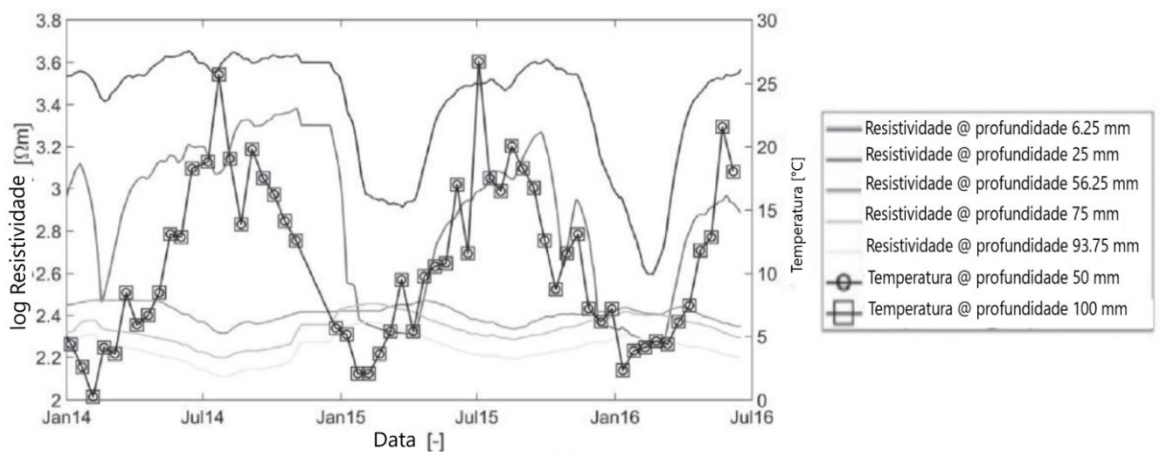
Figura 10 - Comparação entre resistividade e temperatura.



MRE 3



MRE 4



MRE 5

Fonte: Adaptado de MICHEL, A.; SØRENSEN, H. E.; GEIKER, M. R. (2021)

Apesar de alguns estudos recentes apresentarem a influência da temperatura nas medições de ensaios não destrutivos de estruturas de concreto, nota-se ainda a ausência de correlações práticas entre diversos parâmetros. Esses parâmetros são definidos pela natureza de cada tipo de ensaio. Para se determinar a resistividade elétrica do concreto, é possível recorrer aos ensaios de resistividade elétrica superficial (AASHTO T 358-15) e volumétrica (ABNT NBR 9204, 2012). A corrosão do aço na estrutura de concreto pode ser avaliada por meio do ensaio de potencial de corrosão (ASTM C-876, 2015) e velocidade de corrosão (por polarização linear).

A análise conjunta desses parâmetros se torna interessante para a obtenção de correlação de valores entre a resistividade elétrica, temperatura e corrosão da armadura. Com isso, busca-se compreender o efeito da temperatura no real desenvolvimento do processo corrosivo de uma estrutura.

Nos itens a seguir, são apresentados os princípios dos métodos de análise adotados no presente estudo, a saber: para análise de resistividade elétrica (superficial e volumétrica) e para avaliação da corrosão (potencial de corrosão e polarização linear).

3.2 TÉCNICAS DE ANÁLISE DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

A resistência do material à mobilidade elétrica é diretamente ligada à sua quantidade de elétrons livres. Quanto mais elétrons livres, maior a condutibilidade elétrica, resultando em uma menor resistividade elétrica. O concreto possui uma resistividade elétrica que varia entre $10^6 \Omega \cdot m$ para amostras secas em estufa e $10 \Omega \cdot m$ em concreto saturado (Azarsa e Gupta, 2017).

Para a determinação da resistividade elétrica de um material deve-se conhecer suas dimensões, seção transversal e comprimento e resistência, pois as mesmas têm relação na mobilidade dos elétrons (DINIZ, 2018).

A resistência elétrica baseada na lei de Ohm se apresenta a partir da Equação 1

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

Em que R é resistência elétrica do material (Ω); I é corrente elétrica que circula através do circuito (A); V é tensão entre os eletrodos em (V).

Assim que determinada a resistência elétrica do material, o cálculo da resistividade é realizado através da Equação 2:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2)$$

Em que R é resistência do material (Ω); L é comprimento do material condutor (m); A é área da seção reta do material condutor (m^2); ρ é resistividade elétrica ($\Omega.m$).

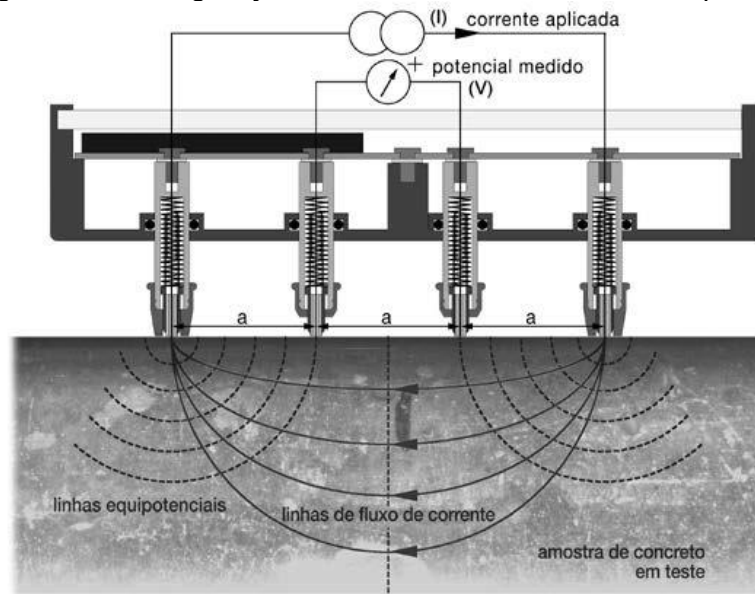
As técnicas de medição dos valores de resistividade mais comuns são através do método volumétrico (ou uniaxial) e o método superficial (sendo o mais conhecido o método dos 4 eletrodos ou método de Wenner).

3.2.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

O ensaio de resistividade elétrica superficial não é normatizado pela ABNT, porém é especificado pela T358 (AASHTO, 2015) e também pela UNE 83988-2 (AENOR, 2014). Além disso, os fabricantes dos equipamentos dispõem de procedimentos específicos para se obter uma medição adequada com valores confiáveis. Essa técnica consiste em um ensaio não destrutivo de simples e rápida realização.

Para execução do ensaio é utilizado uma sonda com quatro eletrodos (conhecida como sonda Wenner), dispostos de maneira equidistante e linear. Os eletrodos das extremidades geram uma corrente alternada (i) e os eletrodos internos medem a tensão (V) entre os pontos, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Configuração ensaio resistividade elétrica superficial.



Fonte: Proceq S. A. (2017).

Os valores da resistividade elétrica são obtidos através da Equação 3:

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

Em que ρ é resistividade elétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$); a é espaçamento entre os eletrodos (cm); V é diferença de potencial (V); i é corrente aplicada (A).

Essa técnica é muito aplicada em campo devido a facilidade de transporte do equipamento, fácil operação e rápida apresentação de resultados. Entretanto a correta realização dos processos do ensaio deve ser levada em consideração para que não ocorra erros interpretativos (DINIZ,2016).

De acordo com Polder (2000), alguns fatores influenciam as leituras realizadas com esta técnica, são eles: a geometria das estruturas, a não homogeneidade do concreto, presença de barras de aço, camadas superficiais com resistividades diferentes da massa do concreto.

A

Tabela 5 apresenta valores referentes à penetração de íons cloreto na estrutura em relação aos valores de resistividade elétrica em corpos de prova cilíndricos de dimensão 0,10m de diâmetro e 0,20m de comprimento (AASHTO, 2015).

Tabela 5 – Relação Penetração íons cloreto x Resistividade elétrica superficial.

Penetração de íons cloreto	Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm)
Alta	< 12
Moderada	12-21
Baixa	21-37
Muito baixa	37-254
Insignificante	>254

Fonte: AASTHO T358 (2015)

De acordo com Langford e Broomfield (1987), as medições de resistividade elétrica superficial através do método das quatro sondas possuem uma relação com a despassivação do aço e a taxa de corrosão, os valores de correlação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Risco de corrosão vs. Resistividade elétrica.

Risco de corrosão da armadura	Resistividade elétrica (kΩ.cm)
Muito alto	<5
Alto	5-10
Moderado	10-20
Baixo	>20

Fonte: Langford and Broomfield (1987)

Segundo Bromfield *et al.*, (2000) e Bertolini *et al.*, (2004), a partir da utilização de um equipamento de campo que afere a resistividade elétrica superficial e também a taxa de corrosão por meio do método da polarização linear apresentam os valores de resistividade elétrica para a probabilidade de corrosão conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Resistividade elétrica vs. Risco de corrosão

Risco de Corrosão	Resistividade Elétrica
Insignificante	> 100
Baixa	50 - 100
Moderada a alta em aço despassivado	10 - 50
Resistividade não serve como parâmetro	< 10

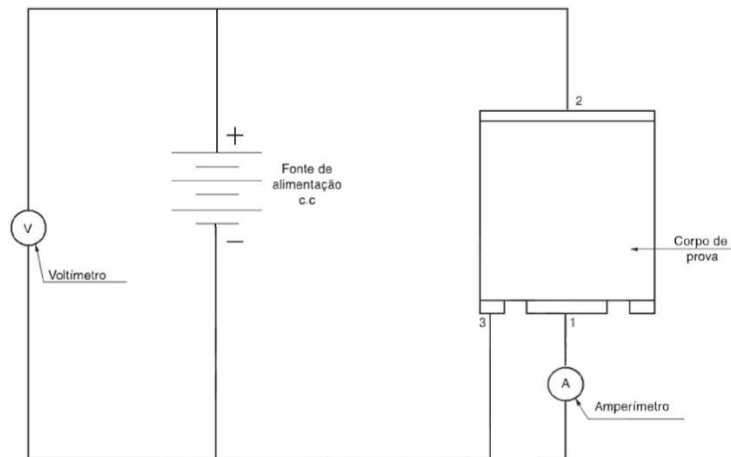
Fonte: Bromfield *et al.*, (2000) e Bertolini *et al.*, (2004).

3.2.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA

A resistividade elétrica volumétrica é especificada pela NBR 9204 (ABNT, 2012). De acordo com a norma, a resistividade elétrica de um material consiste na relação entre o gradiente de potencial paralelo à direção da corrente nesse material e a densidade da corrente. Para a realização desse ensaio é preciso a utilização dos aparelhos descritos a seguir, e dispostos de acordo com a Figura 12.

- Voltímetro, com função de aferição de corrente contínua, digital ou analógico, com impedância mínima de $1\text{k}\Omega/\text{V}$ que permita ler tensão de 50V com precisão de $\pm 1\%$.
- Miliamperímetro, digital ou analógico, que permita ler correntes no intervalo de 0,15 mA a 200 mA, com precisão de $\pm 1\%$.
- Fonte de alimentação, com tensão contínua estabilizada, de valor fixo ou ajustável em 50V, com variação máxima de 0,5V durante a realização do ensaio.
- Eletrodos, sendo 3, um principal ou blindado, um secundário ou não blindado e um de blindagem.
- Balança, com capacidade mínima de 20kg e resolução de 1g.
- Estufa, com dimensões internas para conter os corpos de prova e capacidade de manter temperatura a $110\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$.
- Paquímetro, com recursos para medir até 200mm, com resolução de 0,1mm.

Figura 12 - Esquema ensaio resistividade elétrica volumétrica.



Legenda:

- 1 - Eletrodo principal ou blindado;
- 2 - Eletrodo secundário ou não blindado;
- 3 - Eletrodo de blindagem.

Fonte: NBR 9204 (ABNT, 2012)

A resistência medida no ensaio pode ser calculada pela Equação 4.

$$Rv = \frac{U}{i \cdot 1000} \quad (4)$$

Em que Rv é resistência elétrica-volumétrica do corpo de prova (Ω); U é diferença de potencial aplicada ao corpo de prova (V); i é corrente elétrica que percorre o corpo de prova (mA).

Com isso, obtém-se o valor da resistividade elétrica-volumétrica conforme Equação 5.

$$\rho v = \frac{Rv \cdot A}{h} \quad (5)$$

Em que ρv é resistividade elétrica-volumétrica do corpo de prova ($\Omega \cdot \text{cm}$); Rv é resistência elétrica-volumétrica do corpo de prova (Ω); A é área do eletrodo principal (cm^2); h é altura total do corpo de prova (cm).

3.3 TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO

A análise do processo corrosivo da armadura pode ser realizada através de técnicas eletroquímicas que permitem obter resultados relacionados ao comportamento da estrutura diante a formação da pilha eletroquímica. Existem técnicas classificadas como perturbativas e as não-perturbativas. A primeira consiste em enviar uma corrente contínua ou alternada estimulando o processo corrosivo da armadura. Já a segunda, são técnicas que não há esse estímulo. Para este estudo foram escolhidas duas técnicas classificadas como não perturbativas: potencial de corrosão e polarização linear.

3.3.1 POTENCIAL DE CORROSÃO

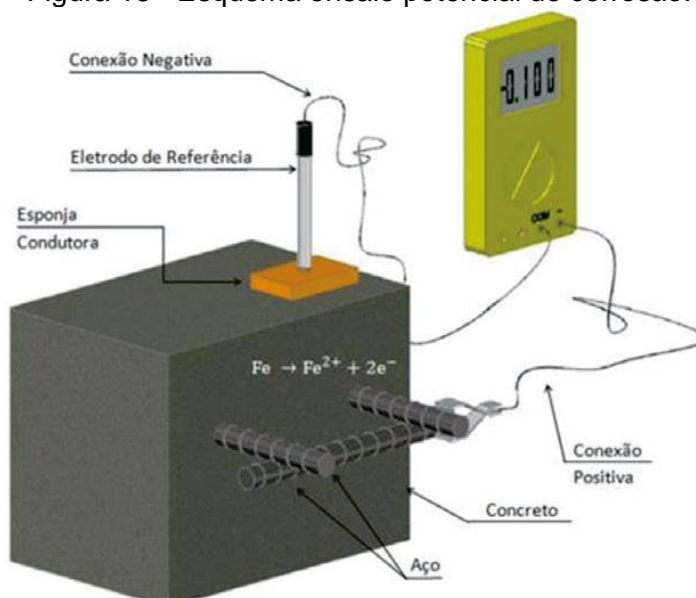
Esta técnica é empregada como um método eletroquímico que auxilia o monitoramento do processo corrosivo em estruturas de concreto armado. Elaborado nos Estados Unidos, com publicações que datam do ano de 1957, o método foi desenvolvido devido à falta de alternativas que pudessem identificar, avaliar e controlar o processo de corrosão em tabuleiros de pontes (BERTOLINI *et. al*, 2014).

Essa técnica tem a vantagem de ser simples realização, os equipamentos utilizados não possuem um custo elevado, além do ensaio ser classificado como não destrutivo. Entretanto o resultado fornece valores relativos e aproximados do estado de corrosão, ou seja, não se obtém nenhum dado quantitativo da velocidade de corrosão. Segundo Figueiredo (1994), a utilização desta técnica proporciona a obtenção de um mapa de linhas equipotenciais bastante útil na identificação das zonas anódicas de uma estrutura, o que torna conveniente para o planejamento dos reparos a serem realizados nas estruturas de concreto armado.

O método é especificado pela norma C-876 (ASTM, 2015). Ele constitui-se em aferir diferença de potencial elétrico entre o aço (da estrutura de concreto armado a ser avaliada) e um eletrodo de referência (que possui a capacidade de manter seu potencial elétrico estável). O eletrodo de referência, usualmente de cobre e sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), e a barra de aço são conectados em série em um voltímetro de alta impedância, equipamento utilizado para medir a diferença de potencial elétrico

entre dois pontos. Para que o circuito elétrico seja fechado é preciso criar uma interface condutiva entre o eletrodo de referência e a armadura da estrutura. Assim, a ponta do eletrodo de referência deve estar em contato com a superfície do concreto da estrutura analisada. Com isso, surge então um fluxo de elétrons da armadura de aço em direção ao eletrodo de referência, que possui um potencial mais positivo. Este fluxo, ao passar pelo voltímetro, indica a intensidade desta diferença de potencial entre a armadura e o eletrodo de referência (Figura 13).

Figura 13 - Esquema ensaio potencial de corrosão.



Fonte: adaptado por Rocha (2012).

A Tabela 8 apresenta as correlações entre intervalos de tensão elétrica em relação à armadura e o eletrodo de referência (Cu/CuSO_4) com a probabilidade de ocorrência de corrosão.

Tabela 8 – Diferença de potencial elétrico x probabilidade de corrosão.

E_{corr} (mv, Cu/CuSO_4)	Probabilidade de Corrosão
> - 200	<10%
Entre -200 e -350	10 a 90%
< -350	>90%

Fonte: C876-15 (ASTM, 2015).

Nota-se que na faixa compreendida entre -200mV a -350mV tem-se uma variação de probabilidade de 10 a 90%, tornando o resultado como incerto em relação à probabilidade de corrosão.

3.3.2 POLARIZAÇÃO LINEAR

O método de polarização linear, também conhecido como método de Stearn-Geary, consiste em um método não-perturbativo para obtenção da velocidade de corrosão em armaduras de aço.

De acordo com Andrade e Gonzalez (1978) a resistência de polarização (RP) trata-se da capacidade do sistema em impedir o desenvolvimento de um processo eletroquímico de corrosão quando submetido a polarização forçada. Empregando uma diferença de potencial à armadura assim exercendo uma polarização ao redor do potencial de corrosão (E_{corr}).

A partir da razão entre a tensão aplicada (ΔE) e a corrente resultante (ΔI), encontra-se a RP (Equação 6). Quanto maior o valor de Rp menor será a taxa de corrosão.

$$Rp = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (6)$$

Em que Rp é Resistencia de polarização (k Ω); ΔE é tensão aplicada (mV); ΔI é Corrente resultante da aplicação da tensão (mA).

Stern (1958) propôs que se ΔE apresentar valores inferiores que 10mV, pode-se extrair o valor de Rp utilizando-se de somente uma medida.

O sistema é montado utilizando um eletrodo de referência, um contra-eletrodo e o eletrodo de trabalho ligado a um potenciostato de maneira que se obtenha um circuito fechado.

Aplica-se sobre tensões na faixa de ± 10 a 30mV, evitando valores mais elevados para não comprometer a premissa básica da linearidade da curva e não ocasionar uma perturbação em excesso do sistema.

Através da R_p encontra-se a corrente instantânea e, conseqüentemente, a intensidade de corrosão (I_{corr}) (Equação 7).

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (7)$$

Em que I_{corr} é Intensidade de corrosão; B é constante de Stern; Geary (1957), sendo $B = 52\text{mV}$ para armadura no estado passivo e 26 mV para armadura no estado ativo.

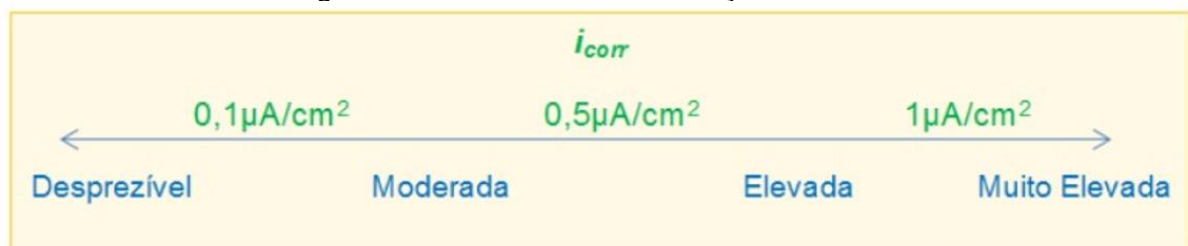
A intensidade de corrosão dividida pela área perturbada da armadura resulta na densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) (Equação 8).

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p \cdot A} \quad (8)$$

Em que i_{corr} é densidade de corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$); B é constante de Stearn e Geary (mV); A é área de exposição da armadura (cm^2); R_p é resistência de polarização ($\text{k}\Omega$).

Os valores encontrados podem ser analisados ao grau de corrosão como demonstra a Figura 14.

Figura 14 - Faixas de i_{corr} em relação à corrosão



Fonte: ANDRADE *et al.*, (1997).

Segundo Ismail e Ohtsu (2005) é possível determinar a taxa de corrosão através dos valores de densidade de corrente, pela seguinte fórmula, derivada da lei de Faraday (Equação 9).

$$Tx = \frac{3,27 \cdot I_{corr} \cdot Peq}{d} \quad (9)$$

Em que Tx é taxa de corrosão ($\mu\text{m}/\text{ano}$); i_{corr} é densidade de corrente; Peq é peso equivalente do aço (27,93 g); d é densidade da barra de aço ($7,8 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Substituindo os valores do peso equivalente e da densidade das Equações 5 e 6, obtém-se uma simplificação na Equação 10.

$$Tx = \frac{304,2}{Rp} \quad (10)$$

Em que Tx é taxa de corrosão (mm/ano); Rp é Resistencia de polarização ($\Omega \cdot \text{cm}^2$).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo do efeito da temperatura na resistividade elétrica e cinética de corrosão da armadura do concreto contaminado com cloretos foi de cunho experimental e realizado em quatro etapas.

Na primeira foram caracterizados os materiais a serem utilizados na produção dos concretos com e sem adição de cloreto, e duas diferentes relações água/cimento.

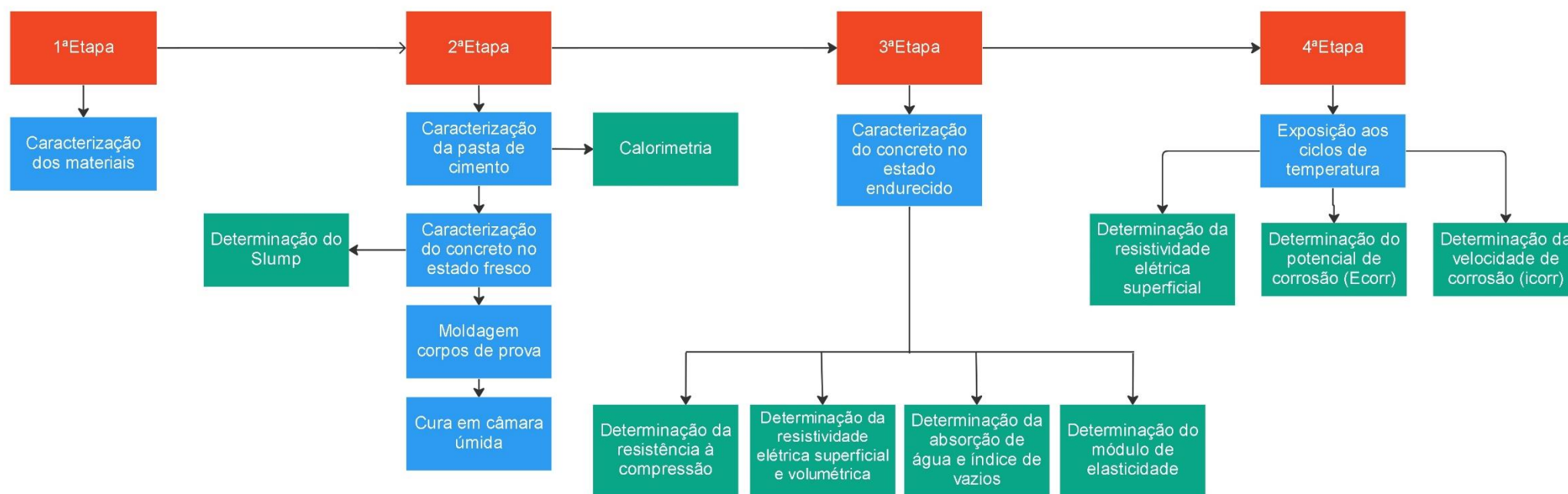
Na segunda etapa foi feita a caracterização da pasta de cimento e do concreto no estado fresco, moldados corpos de prova com e sem armadura, e curados em câmara úmida.

Na terceira etapa foi feita a caracterização do concreto no estado endurecido.

Na quarta etapa os corpos de prova com e sem armadura foram submetidos a ciclos de temperaturas e avaliados quanto a resistividade elétrica superficial, potencial de corrosão e densidade de corrosão.

O fluxograma ilustra o procedimento experimental do estudo (Figura 15).

Figura 15 - Fluxograma do programa experimental.



4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de concreto foram: cimento Portland CPV ARI; areia quartzosa fina como agregado miúdo, brita gnaisse como agregado graúdo; água potável; aditivo superplastificante e cloreto de sódio. E também foram utilizados produtos químicos para o procedimento de limpeza e preparação das barras e confecção do eletrodo de referência. Como armadura se utilizou vergalhões corrugados de aço carbono. O cimento CPV ARI, a areia, a brita, a água e o aditivo foram disponibilizados pela concreteira Supermix, onde se deu a realização dos ensaios de caracterização da areia e brita e também a moldagem e cura dos corpos de prova, a caracterização do cimento foi fornecido em laudo técnico emitido pela fabricante CSN.

4.1.1 CIMENTO PORTLAND CPV ARI

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI Plus) produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional. A escolha deste cimento é por se tratar de um tipo com baixo teor de adições apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Cimento CPV ARI.

Tipo de cimento	Clínquer + Sulfatos de Cálcio (em % de massa)	Material carbonático (em % de massa)
CPV ARI	90- 100	0-10

Fonte: NBR 16697 (ABNT,2018).

Os resultados de ensaios de caracterização do cimento encontram-se na Tabela 10 emitido pela fabricante.

Tabela 10 - Caracterização cimento CPV ARI.

Ensaio					
Ensaio					
Ensaio	NBR nº	Unidade	Média	Especificação norma NBR 16697/18	
PF950C	NM18/12	%	5,82	≤ 6,50	
SO ₃	NBR 14656/01	%	2,72	≤ 4,50	
RI	NM 15/12	%	1,32	≤ 3,50	
MgO	NBR 14656/01	%	0,65	≤ 6,50	
Ensaio					
Ensaio					
Ensaio	NBR nº	Unidade	Média	Especificação norma NBR 16697/18	
Blaine	NBR 16372/15	cm ² /g	4770	Não aplicável	
Ret.38mic	NBR 12826/14	%	3,8	Não aplicável	
IP	NBR 16607/18	Min.	150	≥ 60	
FP	NBR 16607/18	Min.	205	≤ 600	
Resistência à compressão					
Ensaio	NBR nº	Unidade	Desvio	Média	Especificação Norma NBR 16697/18
Aos 28 d.	NBR 7215/19	MPa	0,28	48,3	Não aplicável
Principais fases do cimento					
Fase		Valor			
C ₃ S		55,47%			
C ₂ S		9,15%			
C ₃ A		6,80%			
C ₄ AF		9,53%			
Al ₂ O ₃		4,71%			

Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (2022)

4.1.2 AREIA QUARTZOSA

A areia quartzosa utilizada foi caracterizada em relação a sua granulometria, massa específica, massa unitária no estado seco e solto e absorção de água. Os ensaios foram realizados no laboratório de controle técnico da Supermix – sede olhos d'água, Belo Horizonte – MG.

O ensaio de granulometria foi baseado na NBR NM 248 (ABNT, 2003) utilizando amostras secas de 500g em seguida a amostra foi peneirada por peneirador mecânico pelo período de 10 minutos em peneiras de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). Após o período a massa retida em cada peneira foi determinada resultando em valores de dimensão máxima, absorção, coeficiente de vazios módulo de finura e curva granulométrica.

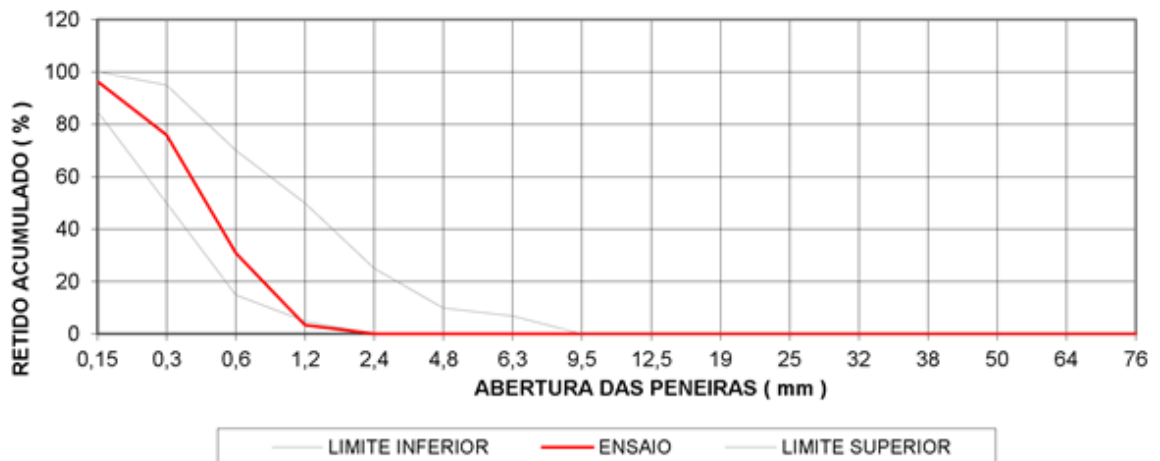
A dimensão máxima característica do agregado foi de 1,2 mm. A composição granulométrica foi apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Granulometria agregado miúdo.

Peneira (mm)	Peso retido (g)	Retida	Acumulada
1,2	17	3,4%	3,4%
0,6	138	27,6%	31%
0,3	225	45%	76%
0,15	102	20,4%	96,4%
Fundo	18	3,6%	100%
Total	500	100%	-

A representação gráfica da distribuição granulométrica está na Figura 16, bem como os limites definidos por essa norma.

Figura 16 – Curva granulométrica areia quartzosa.



A caracterização física da areia utilizada no programa experimental pode ser verificada na Tabela 12.

Tabela 12 – Caracterização física da areia quartzosa.

Propriedade	Valor
Massa unitária	1,301 kg/dm ³
Massa específica	2,604 kg/dm ³
Absorção	0,60%
Módulo de finura	2,068
Diâmetro máximo	1,2 mm
Coefficiente de vazios	50,04%

De acordo com o módulo de finura, a areia utilizada se enquadra na faixa da zona utilizável inferior conforme norma NBR 7211 (ABNT,2009) que delimita os limites entre 1,55 a 2,20. As características obtidas nos ensaios estão em conformidade pelo apresentado nas normas NBR 7225 (1993) e 7211 (2019) para areia fina.

4.1.3 BRITA GNAISSE

A brita gnaisse utilizada foi caracterizada em relação a sua granulometria, massa específica, absorção de água, módulo de finura, diâmetro máximo e coeficiente de vazios. Os ensaios foram realizados no laboratório de controle técnico da Supermix – sede olhos d'água, Belo Horizonte - MG.

O ensaio de granulometria foi baseado na NBR NM 248 (ABNT,2003). A composição granulométrica foi apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Granulometria agregado graúdo.

Peneira (mm)	Peso retido (g)	Retida	Acumulada
12,5	22	0,73%	0,73%
9,5	341	11,37%	12%
6,3	1534	51%	63%
4,8	845	28,2%	91,4%
Fundo	258	8,63%	100%
Total	3000	100%	-

A representação gráfica da granulometria da brita Gnaisse foi apresentada na Figura 17. A granulometria da brita Gnaisse está situada entre as zonas 4,75/12,5.

A caracterização física da brita Gnaisse foi realizada de acordo com a NBR NM 53 (ABNT,2009) e é apresentada na Tabela 14. Os valores encontrados estão de acordo com a classificação da brita 0 nas normas NBR 7225 (1993) e 7211 (2019).

Figura 17 – Curva granulométrica brita gnaisse.

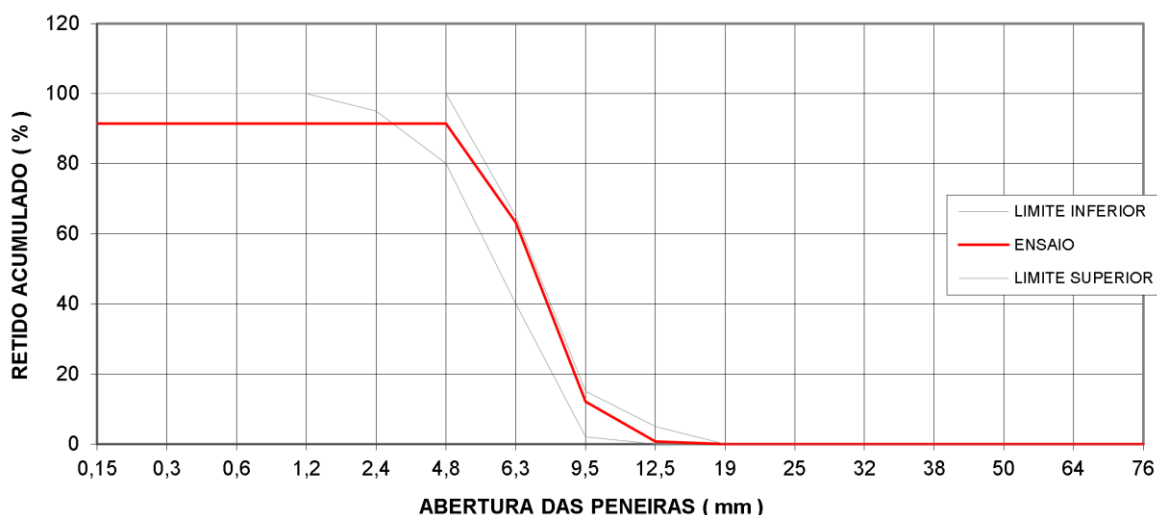


Tabela 14 – Caracterização física da brita gnaisse.

Propriedades	Valor
Massa unitária	1,388 kg/dm ³
Massa específica	2,646 kg/dm ³
Absorção	0,50%
Módulo de finura	5,603
Diâmetro máximo	12,55 mm
Coefficiente de vazios	47,52%

4.1.4 ADITIVO

O aditivo utilizado foi o Sika® Viscocrete® - 5800 FTN que possui base química de solução de policarboxilato em meio aquoso. As especificações do aditivo estão descritas na Tabela 15, conforme indicações do fabricante.

Tabela 15 – Caracterização aditivo.

Propriedades	Valor
Massa específica	1,07±0,02kg/L
pH	4,5±1,0
Teor de íons cloreto	Isento

Fonte: Sika® Viscocrete® (2021)

De acordo com o fabricante, a dosagem recomendada do aditivo é de 0,2 a 2,0% em relação a massa do aglomerante.

4.1.5 AÇO

Como armaduras foram utilizadas barras de aço CA-50, de 10mm de diâmetro nominal (área da seção igual a 0,785 cm²). A barra de aço foi produzida pela ArcelorMittal, para uso na construção civil. A escolha do CA-50 foi por se tratar do tipo mais utilizado na construção civil. Antes de sua utilização, as barras passaram por um processo de preparação que consiste no corte de acordo com as dimensões estipuladas, processo de limpeza de acordo com a norma ASTM G-1/03 (ASTM, 2017), armazenagem e preparação para evitar a atividade corrosiva em certas regiões da barra, descritas no item 4.2.3.

4.1.6 ÁGUA

Foi utilizada água potável para a produção dos concretos, fornecida pela companhia de saneamento de Minas Gerais- COPASA. Para as soluções foi utilizada água destilada e deionizada da marca Iceltec.

4.1.7 REAGENTES

Para o procedimento de limpeza das barras foram utilizados os seguintes reagentes químicos: Hexametilenotetramina P.A da marca ACS Científica, Ácido clorídrico 37% da marca química moderna e Acetona pura 100% da marca Synth.

Para a contaminação da água de amassamento das amostras contaminadas por cloretos, foi utilizado o cloreto de sódio (NaCl) da marca Synth com teor de pureza de 99,00%.

Para a confecção da solução saturada do eletrodo de referência foi utilizado sulfato de cobre anidro com teor de 97% de pureza da marca ACS científica.

4.2 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DOS CONCRETOS

Neste tópico são definidos os traços e os procedimentos de produção dos concretos, bem como a preparação dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.

4.2.1 TRAÇOS UTILIZADOS

Foram confeccionados dois traços básicos que diferem na relação água/cimento na proporção: 1: 2: 2,5: 0,60 e 1: 2: 2,5: 0,45 (cimento: areia: brita: água). Para alcançar a trabalhabilidade no traço com relação água cimento 0,45, foi necessário a adição de 0,3% de aditivo em relação a massa de cimento.

Os valores da relação água/cimento são baseados na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) para classe de agressividade II, moderada - áreas urbanas, e classe de agressividade IV, muito forte – áreas industriais e com respingos de maré, a escolha das classes foi com o objetivo de simular dois cenários diferentes para observar a influência dos parâmetros de projeto nos resultados.

Em parte de cada um dos traços foi adicionado na água de amassamento, a fim de tornar a contaminação mais homogênea, cloreto de sódio na proporção de 1,65% em relação à massa de cimento com o objetivo de atingir 1% de cloretos na massa devido à composição atômica de 60,66% de cloro na molécula de Cloreto de Sódio. Os traços utilizados assim como a nomenclatura utilizada para identifica-los é apresentada na Tabela 16. Os concretos foram produzidos na Supermix sede Olhos d'água de Belo Horizonte, MG.

Tabela 16 – Traços dos concretos (em massa).

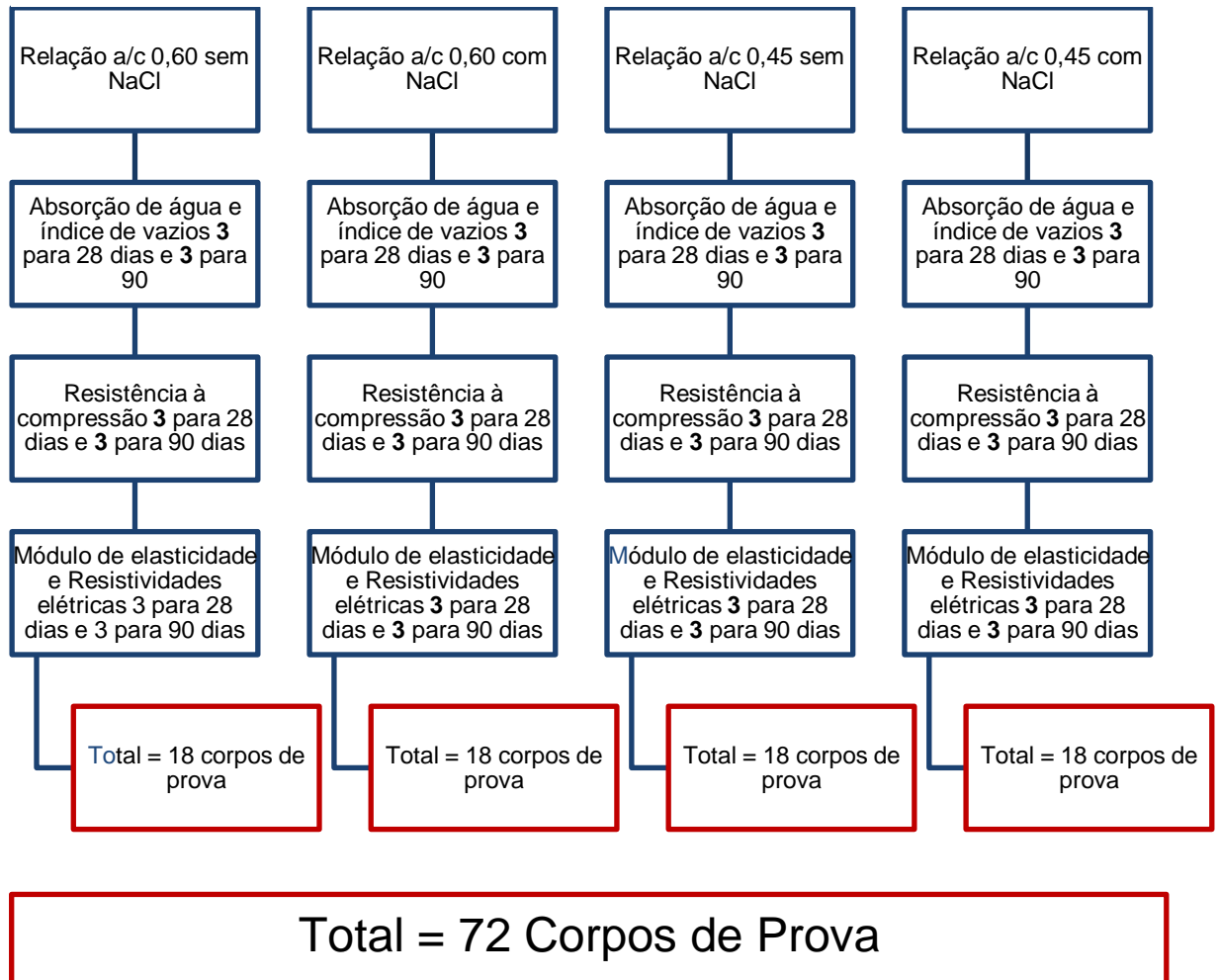
Nome	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo	NaCl
CP 0,60 s/ NaCl	1	2	2,5	0,60	-	-
CP 0,60 c/ NaCl	1	2	2,5	0,60	-	0,0165
CP 0,45 s/ NaCl	1	2	2,5	0,45	0,003	-
CP 0,45 c/ NaCl	1	2	2,5	0,45	0,003	0,0165

Foram moldados dois tipos de corpos de prova: cilíndricos (para caracterização do concreto e influência da temperatura em relação à resistividade elétrica superficial) e prismáticos (para estudo da influência da temperatura em relação ao potencial de corrosão e a velocidade de corrosão).

4.2.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados em triplicata para cada idade e tipo de ensaio, totalizando 72 amostras conforme Figura 18.

Figura 18 – Corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios de caracterização do concreto.



A moldagem do concreto, com e sem adição de NaCl, em corpos cilíndricos nas dimensões de 0,10m de diâmetro e 0,20m de comprimento, seguem o indicado pela NBR 5738 (ABNT, 2015) (Figura 19a).

Figura 19 - Corpos de prova cilíndricos: (a) Moldagem, (b) Cura em câmara úmida.



A desmoldagem dos corpos cilíndricos se deu após 24 horas de realizada a moldagem. A cura foi realizada em câmara úmida com umidade relativa de $95 \pm 5\%$ e temperatura média de $24 \pm 2^\circ\text{C}$ (Figura 19b) até a idade dos ensaios (28 e 90 dias) para a caracterização física e mecânica.

Os corpos de foram curados até a idade de 28 dias e 90 dias para caracterização física e mecânica. Os corpos cilíndricos utilizados na quarta etapa experimental foram mantidos na câmara úmida sendo monitorados com relação à resistividade elétrica superficial até o momento de exposição aos ciclos de temperatura.

4.2.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

Os corpos de prova prismáticos foram preparados para simular uma amostra de concreto armado. Para isso, foi realizada a limpeza das barras de aço, confecção das fôrmas nas dimensões determinadas, moldagem, desmoldagem e por fim a cura das amostras.

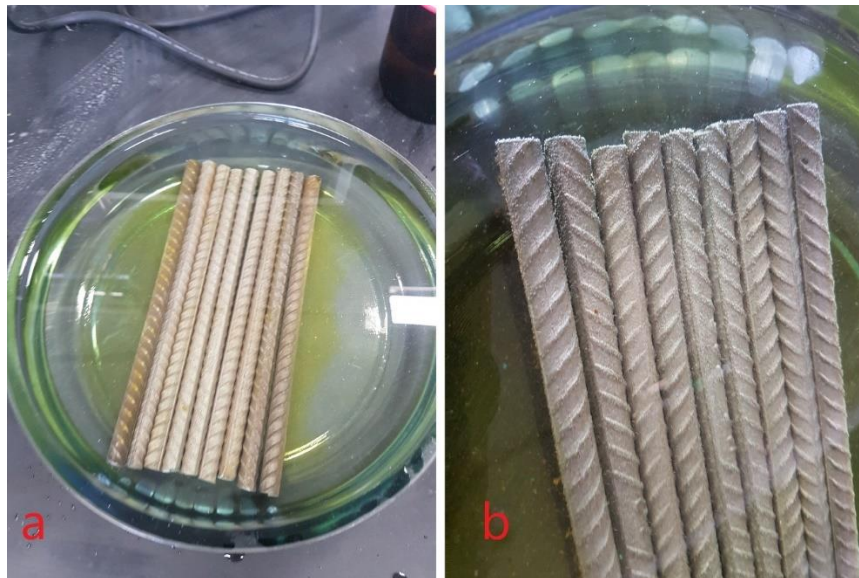
A limpeza das barras foi realizada baseando no que preconiza a norma internacional ASTM G1-03 (ASTM, 2017). Tal procedimento realizado também por Almeida (2013) e Carvalho (2014), possui extrema relevância para que as barras apresentem um estado potencial semelhante, diminuindo a heterogeneidade das amostras. A limpeza foi realizada no laboratório de caracterização de materiais de

construção civil e mecânica – DEMC-UFMG. O processo consiste na retirada do filme de óxidos presente na superfície das barras

Figura 20a) através das seguintes ações: Imersão das barras em uma solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/L de hexametilenoctetramina pelo período de dez minutos para que ocorra a remoção dos óxidos presentes sem atacar o metal

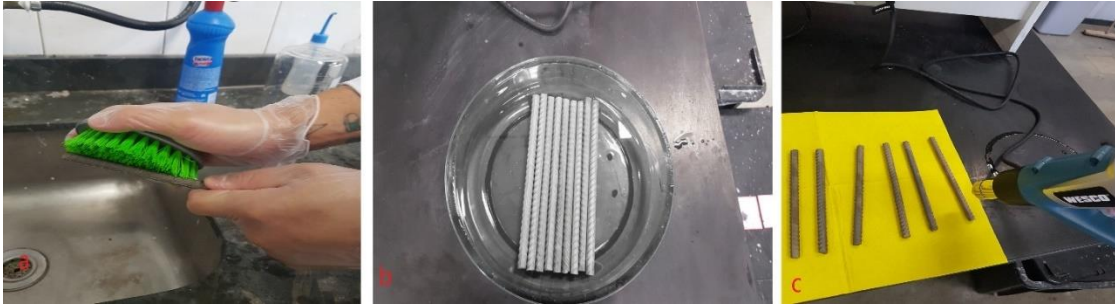
Figura 20b), a hexametilenoctetramina presente na solução atua como um inibidor de corrosão.

Figura 20 – (a) Barras imersas na solução de reagentes (b) Barras com óxidos removidos.



Em seguida, realizou-se a lavagem e escovação das barras em água corrente com a utilização de uma escova com cerdas plásticas para a remoção final dos óxidos (Figura 21a). Feito isso, imergiu-se as barras em acetona por dois minutos com a finalidade de retirar elementos gordurosos e facilitar a evaporação da água e o processo de secagem (Figura 21b). Por fim realizou-se a secagem das barras com um soprador térmico (Figura 21c).

Figura 21 – (a) Escovação barras (b) Imersão em Acetona (c) Secagem com soprador térmico.



Como apresentado por Almeida (2013), no processo de imersão das barras na solução de ácido clorídrico 1:1 e hexametilenotetramina é possível observar a redução do hidrônio com a liberação de gás hidrogênio (H_2) através da presença de bolhas na superfície das barras, o que indica a reação de oxiredução da barra com o ácido clorídrico (HCl) como apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Redução de hidrônio no processo de limpeza das barras.



Finalizado o procedimento de limpeza, as barras foram embaladas em papel absorvente e encapadas com plástico filme e armazenadas em um recipiente com um dispositivo absorvedor de umidade, a fim de não alterar suas condições até o dia da moldagem dos corpos de prova (Figura 23).

Figura 23 – Armazenamento das barras livres de umidade.



Todas as barras foram revestidas conforme esquema da Figura 24 com fita isolante para delimitar a área de exposição a ser atacada pelo agente.

Figura 24 – Área de exposição barra de aço.



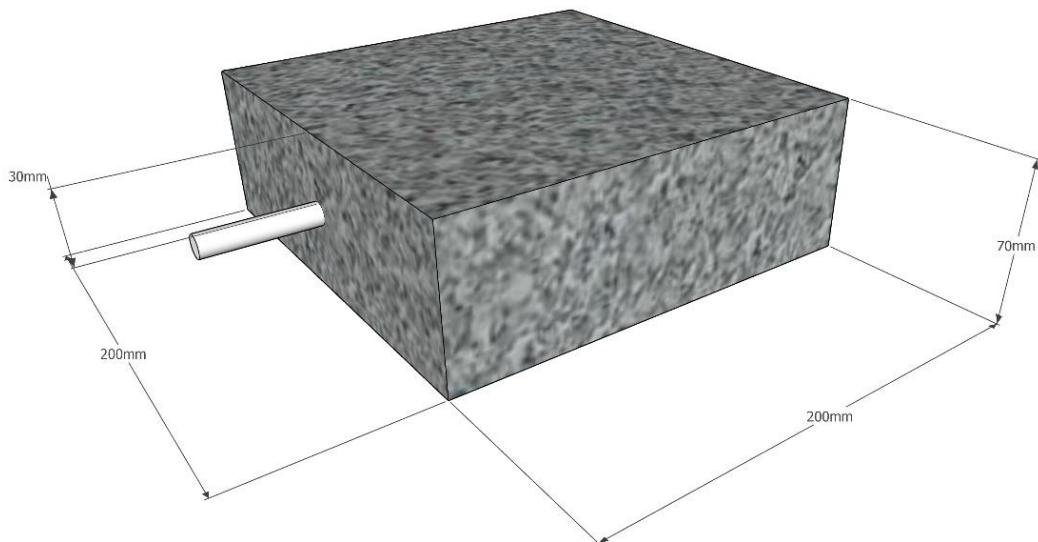
Os corpos de prova prismáticos foram confeccionados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram utilizadas fôrmas de madeira (Figura 25a) com a presença de uma barra de aço carbono de classe CA50 de diâmetro de 10mm centralizada (Figura 25b).

Figura 25 – (a) Fôrmas de madeira (b) Barra posicionada na fôrma.



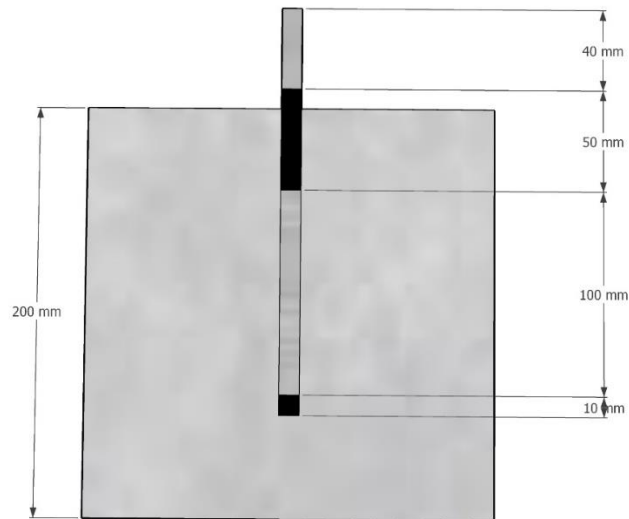
As dimensões adotadas para as amostras foi de 200 x 200 x 70mm (Figura 26). O cobrimento nominal das barras foi de 30mm, conforme indicação da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para classe de agressividade II em elementos de viga/pilar. Foram preparados 4 corpos de prova prismáticos (2 de cada relação a/c sendo 1 com adição de NaCl e 1 sem adição de NaCl).

Figura 26 - Geometria corpo de prova prismático.



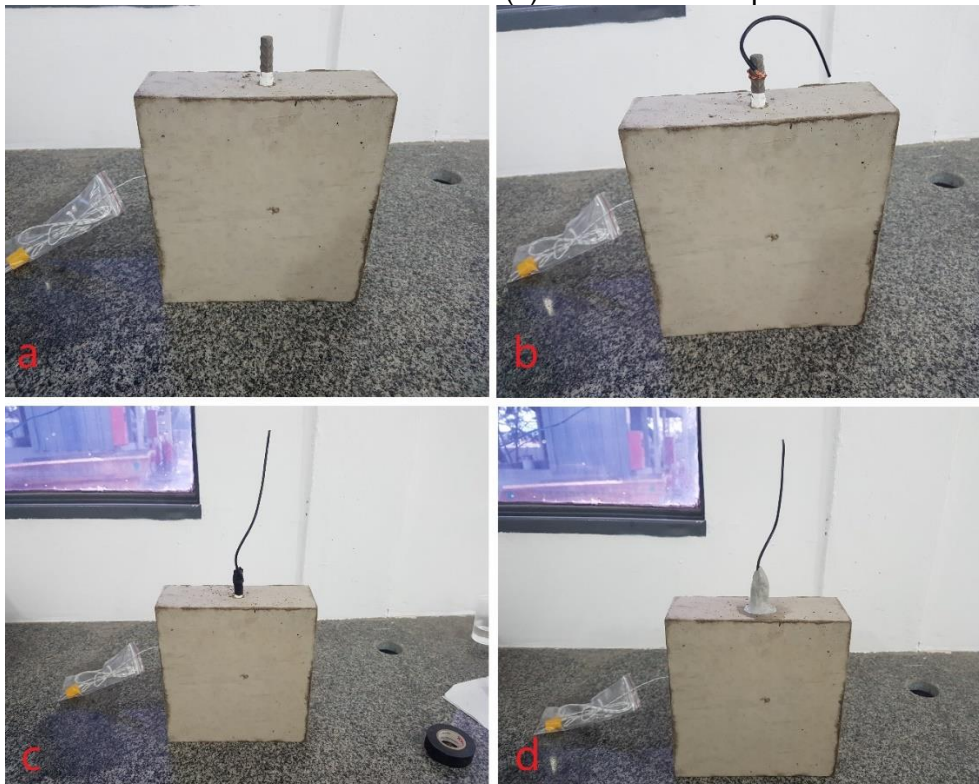
As barras foram posicionadas de maneira que a parte exposta se localizasse na região central do corpo de prova (Figura 27).

Figura 27 - Configuração externa e interna da armadura.



A desmoldagem dos corpos prismáticos se deu após 48 horas de realizada a moldagem (Figura 28a), e logo após fios elétricos flexíveis de cobre de 2,5mm de diâmetro foram conectados às barras (Figura 28b) e envolvidos com fita isolante (Figura 28c), Em seguida, para realizar a proteção, a conexão foi revestida com resina epóxi (Figura 28d).

Figura 28 - (a) Corpo desmoldado (b) Fio de cobre conectado à armadura (c) Fio e armadura envolvida com fita isolante (d) Revestimento epóxi na conexão.



Assim como os corpos de prova cilíndricos, os prismáticos foram curados em câmara úmida com umidade relativa de $95 \pm 5 \%$ e temperatura média de $24 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. até a data de ensaio da quarta etapa experimental.

4.3 MÉTODOS DE ANÁLISE / CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Na segunda e terceira etapa a caracterização do concreto se deu pela análise de suas propriedades no estado fresco (consistência e calor de hidratação), e estado endurecido (resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e índice de vazios, resistividade elétrica superficial e volumétrica).

A quarta etapa consistiu na análise dos parâmetros de durabilidade das amostras expostas a ciclos de temperatura. Foram avaliadas a resistividade elétrica superficial do concreto, bem como o potencial de corrosão e velocidade de corrosão das armaduras.

4.3.1 SLUMP TEST

A determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, “*Slump Test*”, foi realizada no concreto ainda em estado fresco de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Com auxílio de um cone metálico de dimensões: diâmetro da base inferior igual a $200\text{mm} \pm 2\text{mm}$, diâmetro da base superior igual a $100\text{mm} \pm 2\text{mm}$ e de altura de $300\text{mm} \pm 2\text{mm}$, apoiado a uma placa metálica conhecida como placa de base, que deve ser plana, quadrada ou retangular com dimensões dos lados não inferior a 500mm e espessura igual ou superior a 3mm e uma haste feita de aço ou outro metal adequado com diâmetro de 16mm e comprimento de 600mm com as extremidades arredondadas.

O ensaio compreendeu em umedecer o molde e a placa de base e posteriormente encher o molde em etapas de 3 camadas com cerca de $1/3$ da altura do molde. Cada camada foi compactada com 25 golpes da haste de maneira distribuída uniformemente na seção Figura 29a. Após finalizado os golpes, o concreto do topo

foi rasado e posteriormente realizada a limpeza da placa de base, e em seguida o molde levantado do concreto na direção vertical totalmente em um intervalo de tempo de 5 a 10 segundos. Imediatamente após a retirada do molde, foi realizada a medição do topo do corpo de prova e o topo do cone molde, conforme a Figura 29b.

Figura 29 - Slump test: (a) Preenchimento do molde, (b) Medida do abatimento.



Este ensaio tem por finalidade avaliar a trabalhabilidade do concreto para realizar o lançamento e moldagem dos elementos.

4.3.2 CALORIMETRIA

O ensaio de calorímetro apresenta valores proporcionais às taxas de reação durante a hidratação do cimento permitindo acompanhar a transformação da reação exotérmica nas amostras analisadas.

O ensaio de calorimetria foi realizado no laboratório técnico da concreteira Supermix com a utilização do equipamento GRACE Adiacal que consiste em uma caixa lacrada com 4 canais de entrada e 4 termopares (Figura 30) que apresenta o fluxo de calor através de uma curva de calor de hidratação ao longo do tempo.

Figura 30 - Calorímetro utilizado no programa experimental.



O ensaio foi realizado com amostras de pasta de cimento, considerando as relações a/c de 0,45 e 0,60, bem como a incorporação do aditivo plastificante. O tempo de duração do ensaio foi de 20 horas.

4.3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Antes da realização dos ensaios as bases dos corpos de prova foram preparadas conforme a norma NBR 5738 (ABNT,2015) através do método de retificação, que consiste na remoção por meios mecânicos de uma fina camada de material das bases dos corpos de prova para proporcionar uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos (Figura 31).

Figura 31 – Capeamento dos corpos de prova.



A resistência à compressão foi realizada em uma prensa hidráulica Forney (Figura 32), seguindo as orientações da Norma da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Figura 32 - Prensa Forney para ensaio de compressão.

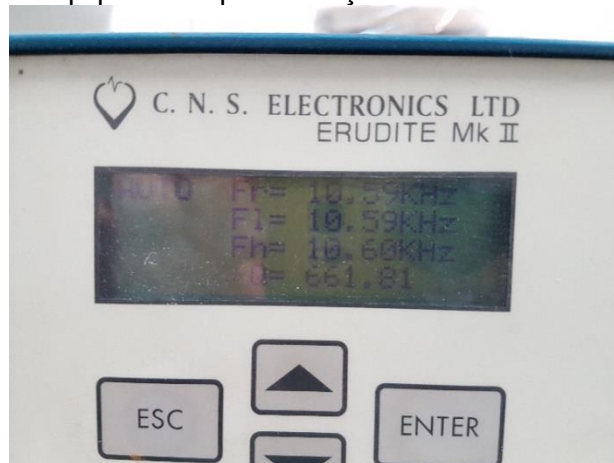


O carregamento utilizado seguiu o preconizado na norma NBR 5739(ABNT, 2018) de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

4.3.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE POR FREQUÊNCIA RESSONANTE

O Módulo de elasticidade foi medido pela da técnica de frequência ressonante forçada utilizando o equipamento Erudite MKII da C.N.S Eletronics LTDA (Figura 33). Foram realizadas três medições para cada corpo de prova. Foram aplicadas vibrações com a frequência na faixa de 7.000 – 15.000 Hertz e tensão de 0,5V. Com base na norma ASTM C215-19.

Figura 33 - Equipamento para aferição do módulo de elasticidade.



Neste método o corpo de prova é colocado em um suporte de maneira a ficar centrado, em uma de suas extremidades é colocado um excitador e na outra extremidade é colocado um coletor de sinal (Figura 34). O excitador é ativado por um oscilador de frequência variável. Ao se propagarem ao longo do corpo de prova, as frequências são coletadas, amplificadas e sua amplitude é medida por um indicador.

Figura 34 - Ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada.



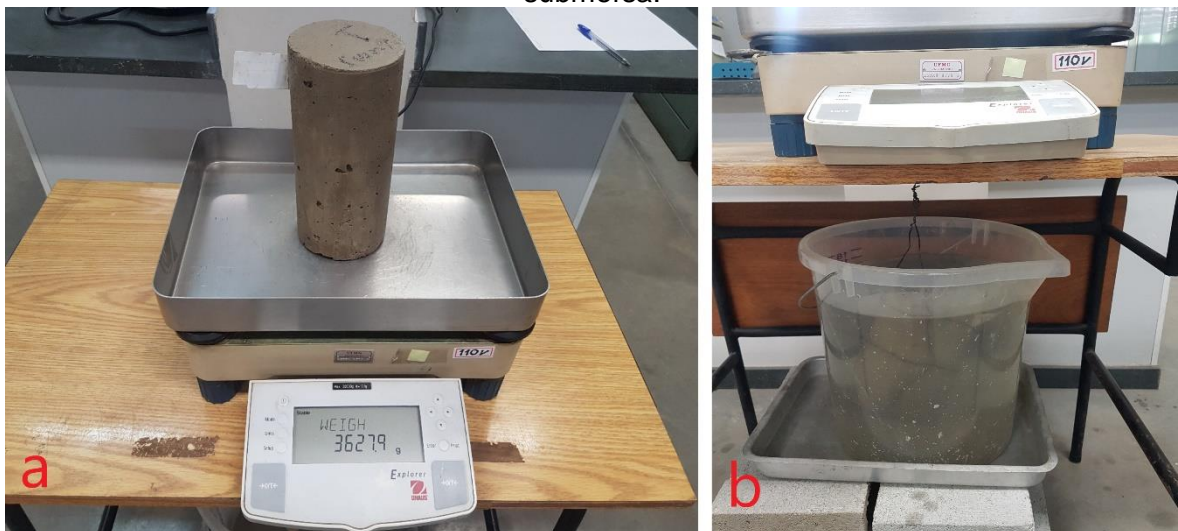
A frequência de excitação sofre variação dentro de uma faixa pré-definida na configuração do aparelho para que obtenha a ressonância na frequência fundamental do corpo de prova, isto ocorre quando a frequência forçada coincide com uma das frequências naturais não-amortecidas do sistema (AGUILAR *et al.* 2012).

4.3.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2009). Através do ensaio foram determinados a absorção de água, o índice de vazios, a massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e a massa específica real.

Foram determinadas as massas das amostras secas (Figura 35a), saturadas e submersas (Figura 35b) conforme norma.

Figura 35 – (a) Pesagem amostra após secagem em estufa (b) Pesagem amostra submersa.



Os valores da absorção de água e índice de vazios foram obtidos através da Equação 11 e 12, respectivamente.

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (11)$$

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (12)$$

Em que A é absorção de água; I_v é índice de vazios; m_{sat} é massa da amostra saturada em água; m_s é massa da amostra seca; m_i é massa da amostra imersa.

4.3.6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA

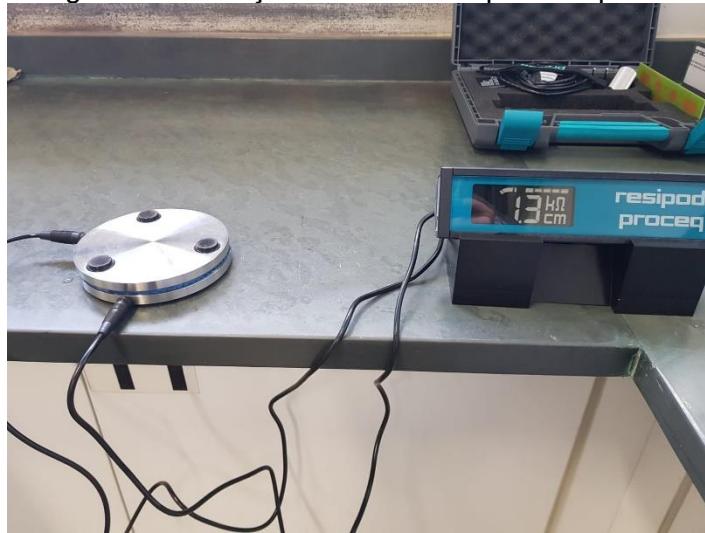
O ensaio da resistividade elétrica volumétrica foi realizado por meio do método uniaxial, no qual o corpo de prova é colocado entre dois eletrodos metálicos com a presença de contatos esponjosos úmidos nas interfaces para melhorar o contato entre os eletrodos e o corpo de prova. Foi utilizado o equipamento Resipod da Proceq (Figura 36).

Figura 36 - Equipamento para aferição da resistividade elétrica volumétrica.



Para a determinação dos valores de resistividades elétricas volumétricas, o fabricante determina alguns processos a serem realizados. Deve se medir e registrar a resistência existente entre os eletrodos e as espumas utilizadas na leitura, através de um processo de contato direto entre os componentes. Começando pela medição da resistência da espuma superior conforme Figura 37.

Figura 37 - Aferição resistência espuma superior.



Depois medir e registrar a resistência com o peso do cilindro acima dos componentes para determinar a resistência da espuma inferior (Figura 38).

Figura 38 - Aferição resistência inferior.



E por fim a configuração de leitura da resistência do corpo de prova (Figura 39).

Figura 39 - Aferição resistividade elétrica volumétrica do corpo de prova de 0,10m de diâmetro e 0,20m de comprimento.



A resistência do corpo é calculada através do valor medido na configuração final subtraindo os valores das resistências das espumas superiores e inferiores. Em posse do valor aferido anteriormente deve-se dividir por um fator indicado pelo fabricante baseado no espaçamento dos eletrodos do equipamento. O equipamento utilizado possui o espaçamento entre sondas de 38mm o fator utilizado foi 23,88. Realizada a divisão, o valor encontrado deve ser multiplicado pela média do raio do cilindro aferida com paquímetro digital (Figura 40), encontrando assim o valor final da resistividade elétrica volumétrica da amostra.

Figura 40 - Aferição dimensões corpo de prova cilíndrico de 0,10m de diâmetro e 0,20m de comprimento.



4.3.7 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL

O ensaio da resistividade elétrica superficial foi realizado por meio do método dos quatro pontos, ou método de Wenner, no qual o corpo de prova é colocado apoiado em uma base de maneira que não se mova e seja possível realizar a leitura em sua superfície longitudinal. Foi utilizado o equipamento Resipod da Proceq com espaçamento entre sondas de 38mm (Figura 41).

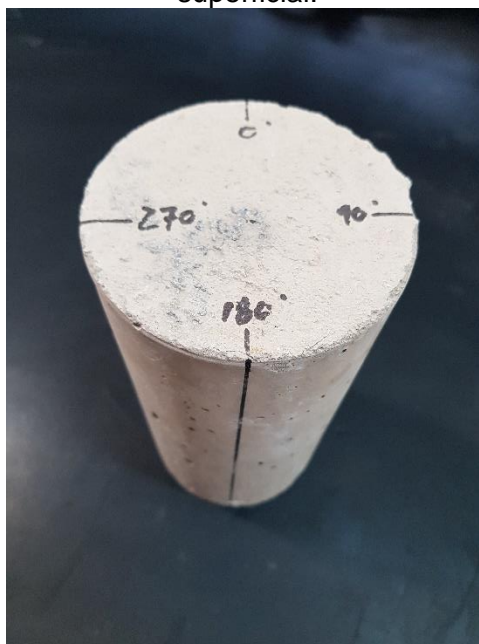
Figura 41 - Ensaio de resistividade elétrica superficial.



O equipamento opera pelo princípio do dispositivo de Wenner, aplicando uma corrente às duas sondas das extremidades as sondas internas realizam a aferição da diferença de potencial entre elas. O valor da resistividade é dado pela Equação 3 e depende da distância entre as sondas. O equipamento opera com uma corrente alternada de 40Hz a 38V máxima, Proceq (2017).

Foram realizadas quatro marcações permanentes na face superior a cada 90° da circunferência (Figura 42) e estendida pelas laterais da amostra conforme norma T 358-15 (AASHTO,2015).

Figura 42 – Marcações dos graus no corpo de prova para ensaio de resistividade elétrica superficial.



Foram realizadas oito leituras para cada amostra, sendo duas por cada marcação e extraída as médias conforme norma T358 (AASHTO,2015) e preenchida a tabela por cada sequência de leituras.

De acordo com norma europeia UNE 83988-2 (2014) e Andrade e Climent (2020), após a leitura deve-se realizar o tratamento do valor multiplicando-o por um fator conhecido como fator de forma, que é definido de acordo com o espaçamento dos eletrodos do equipamento utilizado e a dimensões e geometria dos corpos de prova. No caso deste estudo, por ter sido utilizado corpos de prova cilíndricos de dimensão 100x200mm e o espaçamento das sondas do equipamento ser de 38mm, o fator empregado foi de 0,57.

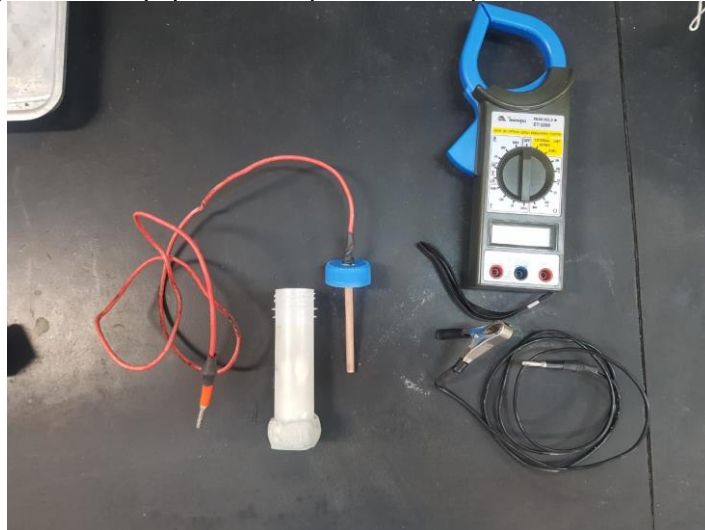
4.3.8 POTENCIAL DE CORROSÃO

O método de ensaio do potencial de corrosão, trata-se de uma estimativa do potencial elétrico de corrosão eletroquímica de armaduras não revestidas em concreto armado. Para tal é preciso que haja uma célula eletroquímica formada pelo eletrodo de trabalho, armadura do corpo de prova, e eletrodo de referência.

Este método de ensaio é aplicável em elementos de concreto armado independente de sua geometria, pode ser aplicada a qualquer idade durante a vida útil do elemento de concreto e por se tratar de um método de fácil aplicação e baixo custo, torna-se um método atrativo para a análise de corrosão de estruturas.

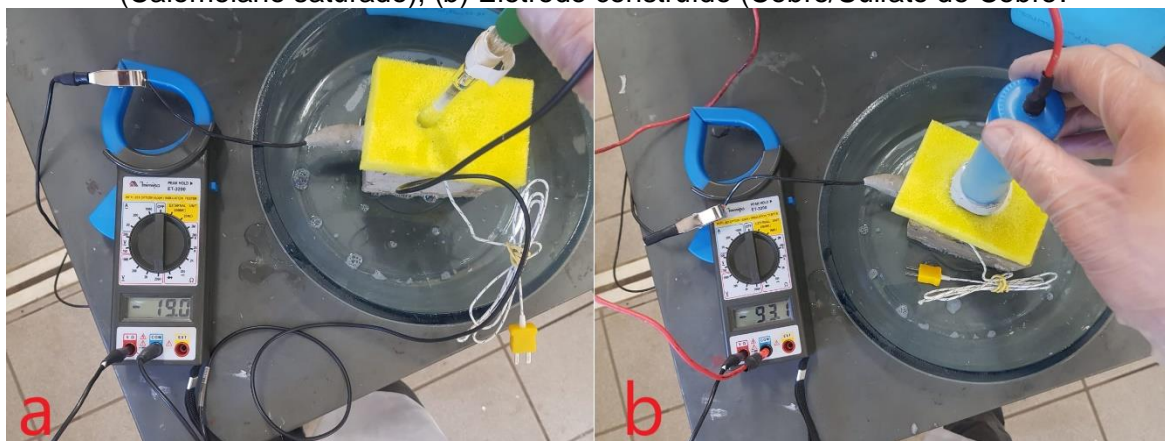
Para a realização do ensaio foi confeccionado um eletrodo de referência de cobre/sulfato de cobre, em solução saturada de sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) conforme indicação da norma ASTM C876-15. Para isso foi utilizado um cilindro de cobre com diâmetro de 8mm, um tubo plástico, um fio de cobre fundido no cilindro de cobre e um disco poroso de madeira pinus (Figura 43).

Figura 43 - Equipamentos para ensaio potencial de corrosão.



Para aferir a qualidade do eletrodo confeccionado, foram realizadas leituras comparativas com um eletrodo de referência comercial de calomelano saturado (Figura 44).

Figura 44 - Comparativo leituras eletrodos de referência: (a) eletrodo comercial (Calomelano saturado), (b) Eletrodo construído (Cobre/Sulfato de Cobre).



As leituras realizadas entre os dois eletrodos apresentaram uma diferença de 74mV e, de acordo com a literatura, a diferença esperada entre os eletrodos corresponde a 72mV (Tabela 17).

Tabela 17 – Potenciais dos eletrodos de referência em relação ao eletrodo padrão de Hidrogênio (EPH).

Eletrodo de referência	Potencial (mV vs. EPH)
Cu/CuSO ₄ , sat.	+ 316
Hg/Hg ₂ Cl ₂ /KCl sat.	+ 244

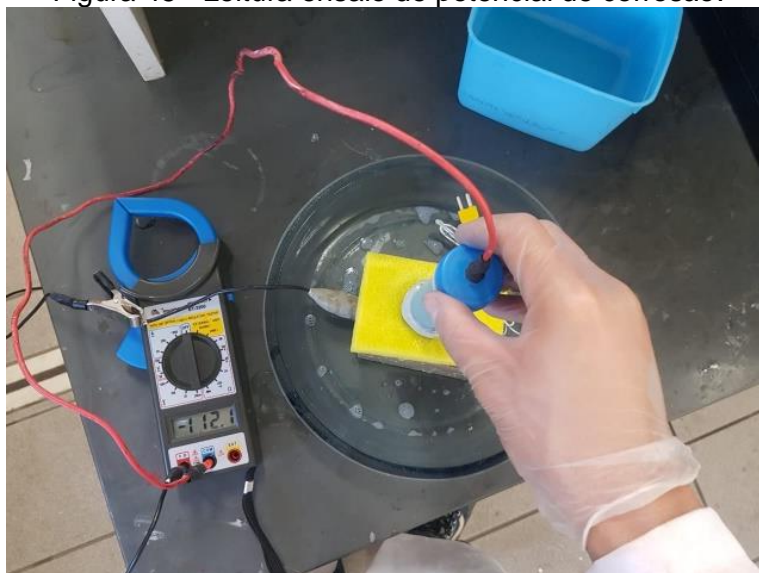
Fonte: Vennesland *et al.*, (2007)

Desta forma, o eletrodo construído de cobre/sulfato de cobre obteve desempenho satisfatório ao eletrodo comercial de calomelano saturado.

A montagem do sistema para medida do potencial de corrosão ocorre conectando o eletrodo de trabalho (armadura presente no interior do corpo de prova) no polo positivo e o eletrodo de referência ao polo negativo de um voltímetro de alta impedância.

Para a leitura deve-se realizar um pré-umedecimento de uma das faces do corpo de prova através de uma esponja embebida em uma solução de água e 0,5% de detergente neutro em relação a água, posteriormente o eletrodo de referência é posicionado no centro do corpo de prova em contato com a esponja e a superfície do concreto, fechando o circuito e gerando a leitura (Figura 45) (ASTM C876, 2015).

Figura 45 - Leitura ensaio de potencial de corrosão.



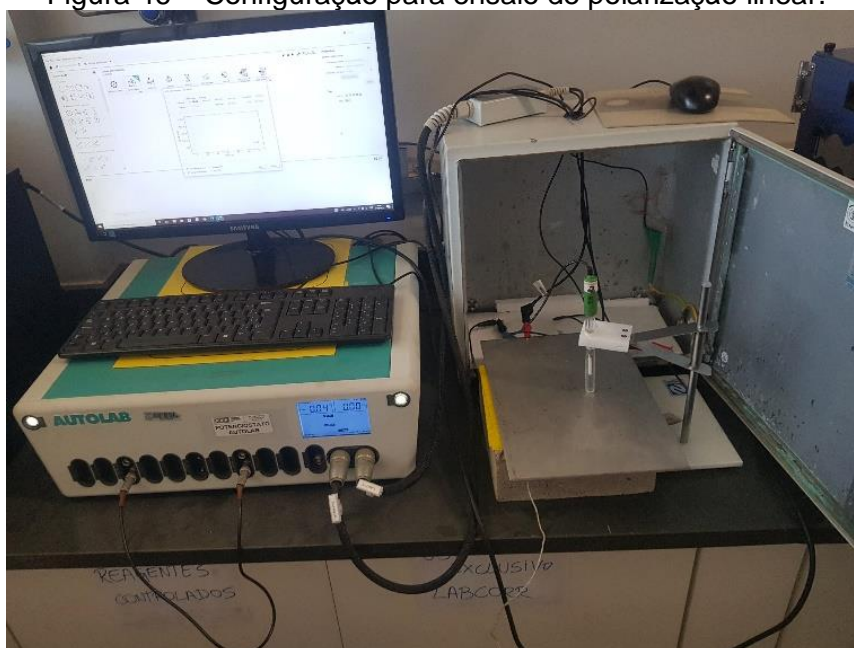
O ensaio foi realizado para controle da probabilidade de corrosão das amostras e para analisar a influência da variação de temperatura nos resultados.

4.3.9 POLARIZAÇÃO LINEAR

Para a realização do ensaio de polarização linear foi utilizado um potenciostato/galvanostato da marca Metrohm Autolab, modelo PGSTAT302N com o software NOVA 2.1.4, conectados a um computador e para tratamento dos dados utilizou-se o software Microcal® Origin® 8.0. O intervalo de varredura utilizado foi de 15mV abaixo e 15mV acima do potencial de circuito aberto para obtenção da taxa de corrosão.

O contra-eletrodo para os ensaios de polarização linear foi o de calomelano saturado da marca *Hannah Instruments*, como contra eletrodo foi utilizado uma chapa de aço inox com dimensões que cobriam toda a face do corpo de prova e entre o corpo de prova e o contra eletrodo foi colocado uma flanela absorvente umedecida com água e 0,5% de detergente neutro a fim de melhorar o contato entre os componentes no circuito (Figura 46).

Figura 46 – Configuração para ensaio de polarização linear.



De acordo com Wolyneq (2002), a vantagem de utilizar este método é a de que não se faz necessário aplicar potenciais muito afastados do potencial de corrosão valores de até 50mV ou mesmo valores menores já são suficientes. Desta maneira o ensaio se torna não perturbativo visto que a corrente utilizada é pequena e problemas relacionados à queda ôhmica praticamente inexistentes.

De acordo com Machado (2004) *apud* Silva (2006), na determinação da R_p a alta resistividade do concreto deve ser levada em consideração devido à queda ôhmica, utilizando um potenciostato a compensação ôhmica é feita automaticamente. Tal informação foi confirmada para o modelo em questão pela assistência técnica da fabricante no Brasil.

Após os ensaios de potencial de corrosão apresentarem valores de diferença de potencial elétrico inferiores a -350mV para as amostras contaminadas por cloretos, o que apresenta uma probabilidade de 90% de corrosão conforme valores para eletrodos de referência de cobre/sulfato de cobre. Foi realizado ensaios de polarização linear nos corpos de prova para avaliar a velocidade de corrosão e obter valores para que comprovem que os corpos contaminados entraram em processo corrosivo.

O ensaio foi realizado para controle do início do processo corrosivo e na etapa final a cada temperatura do ciclo foi realizado para levantamento de valores de i_{corr} para análise da influência da temperatura.

Foram realizadas leituras em triplicata para cada corpo de prova por temperatura de exposição do ciclo.

4.3.10 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

As características mineralógicas das amostras foram determinadas por meio da técnica de difração de raios X. As amostras foram analisadas no Difratômetro Philips-Panalytical modelo Empyrean, do DEMET - UFMG, utilizando radiação $CuK\alpha$ com comprimento de onda de $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, tempo de contagem de 1 segundos e medição de ângulo a cada $0,06^\circ$. O software M.A.U.D. foi empregado para a remoção do ruído de fundo das difrações e para conferir a localização dos picos de intensidade de difração. A identificação dos picos foi feita por meio das cartas do International Centre for Diffraction Data – ICDD.

4.3.11 EXPOSIÇÃO DO CONCRETO A DIFERENTES TEMPERATURAS

Os corpos de prova foram expostos a diferentes temperaturas, e submetidos a ensaios de resistividades elétricas superficial, potencial de corrosão e polarização linear.

Para a exposição às temperaturas foi utilizado uma câmara climática do laboratório de engenharia de estruturas (LAEES) da UFMG, com controle de Temperatura e umidade, da marca Feutron, modelo 3423/16 KPK200 com faixa de temperatura de -40 a 100°C e umidade relativa de 10 a 95% (Figura 47).

Figura 47 – Câmara climática.



Os corpos de prova foram acondicionados de acordo com seus traços, buscando facilitar o processo de organizar nos momentos das leituras (Figura 48), foram expostos 3 corpos cilíndricos de prova de cada traço e um corpo de prova prismático armado por traço.

Figura 48 – Acondicionamento dos corpos de prova.



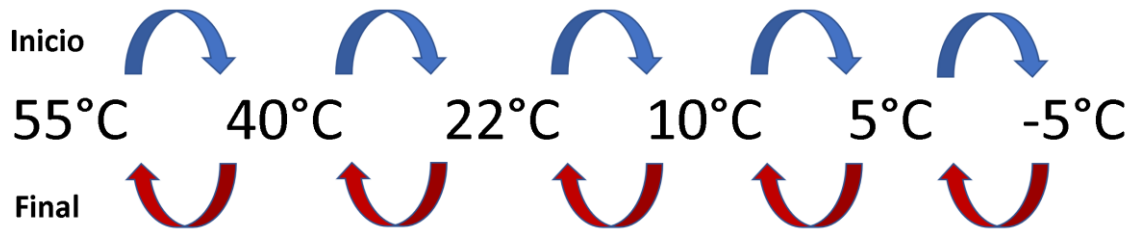
A umidade foi fixada de forma a se ter o menor número de variáveis na análise. O valor de 80% de umidade (Figura 49) foi definido por se tratar de um valor onde a quantidade de água presente nos poros é alta, porém não saturada facilitando o movimento iônico através dos poros e permitindo a penetração de oxigênio. (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013).

Figura 49 - Tela de comando câmara apresentando valores de temperatura e umidade pré-estabelecidos.



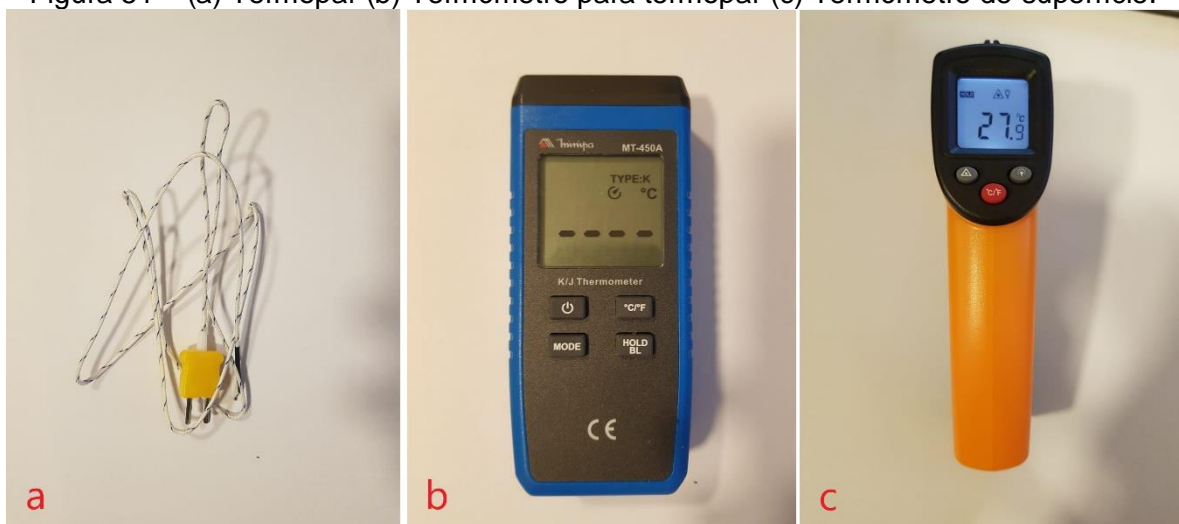
Os ciclos foram realizados partindo da temperatura mais alta até atingir a temperatura mais baixa e retornando até a mais alta conforme Figura 50.

Figura 50 - Ciclos de temperatura.



As temperaturas foram aferidas por meio de um termopar tipo k modelo MTK-01 com faixa de leitura de -40°C a 204°C da marca Minipa (Figura 51a) presente no interior do corpo de prova ligado a um termômetro digital modelo MT-450^a também da marca Minipa (Figura 51b) e através também de um termômetro infravermelho de superfície modelo GM320 da marca GM eletronic com faixa de leitura -50°C a 380°C (Figura 51c).

Figura 51 – (a) Termopar (b) Termômetro para termopar (c) Termômetro de superfície.



O tempo de exposição foi o necessário para que o interior e superfície do corpo atingisse a estabilidade de cada temperatura fixada no ciclo, conforme aferições apresentadas na Figura 52.

Figura 52 – Aferição de temperaturas: imagens do topo indicam as medidas do termômetro de superfície e as imagens inferiores indicam as medidas do termopar no interior.



Observa-se que nas imagens da linha superior, as leituras foram realizadas na superfície dos corpos de prova. Além disso, as imagens mostradas na linha inferior foram realizadas no interior da amostra com auxílio de um termopar. Foi admitido uma diferença de até $\pm 2^{\circ}\text{C}$ em cada patamar dos ciclos de temperatura.

4.3.12 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas dos resultados obtidos no programa experimental foram realizadas através da análise de variância (ANOVA) e teste Tukey (quando necessário), por meio da utilização dos softwares Microsoft Excel e Past4Project versão 1.0.

A análise de variância foi utilizada para verificar a existência de diferença significativa comparando as médias dos resultados obtidos, ou seja, se o tipo de traço e a contaminação por cloretos influenciou nos valores finais. A análise de variância considera a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1). Aceitando a hipótese nula compreende-se que a média dos grupos não se diferem estatisticamente. Porém, se houver rejeição significa que ao menos uma média distingue-se das demais, atribuindo uma influência nas variáveis independentes.

Pode-se testar as hipóteses (H0 e H1) por meio do P-valor (probabilidade de significância), correspondente ao nível de significância α , que para este trabalho foi definido em 5%, resultando em um nível de confiança do teste de 95%.

O Teste Tukey é um procedimento de comparação múltipla de etapa única e teste estatístico que foi utilizado nesta pesquisa para comparar resultados médios, buscando avaliar quais são significativamente diferentes uns dos outros.

Para as equações obtidas através da curva de tendência entre os resultados de resistividade elétrica e temperatura; e velocidade de corrosão e temperatura foram gerados o coeficiente de determinação (R^2) e correlação (R) através do software Microsoft Excel. A correlação entre as propriedades estudadas foi estimada pelo método de regressão. O valor de R entre -1 e +1 representa uma medida da intensidade da relação entre duas variáveis. De acordo com Shimakura (2002) pode-se interpretar os resultados dos coeficientes de correlação (R) de acordo com seu grau de correlação (Tabela 18).

Tabela 18 - Interpretação do coeficiente de correlação (R).

Coeficiente de correlação (R) (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	correlação muito fraca
0,20 a 0,39	correlação fraca
0,40 a 0,69	correlação moderada
0,70 a 0,89	correlação forte
0,90 a 1,00	correlação muito forte

Fonte: Shimakura (2002).

A função adotada através da linha de tendência de cada parâmetro estudado foi aquela que apresentou o maior valor de correlação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados de caracterização do concreto no estado fresco e endurecido. Além disso, foram apresentados os resultados da influência da temperatura nas análises de resistividade elétrica superficial, potencial de corrosão e velocidade de corrosão.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

Neste tópico são apresentados os resultados de ensaios de caracterização do concreto em seu estado fresco e endurecido.

5.1.1. SLUMP TEST

Os resultados de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) são expressos na Tabela 19.

Tabela 19 – Índice de consistência dos concretos.

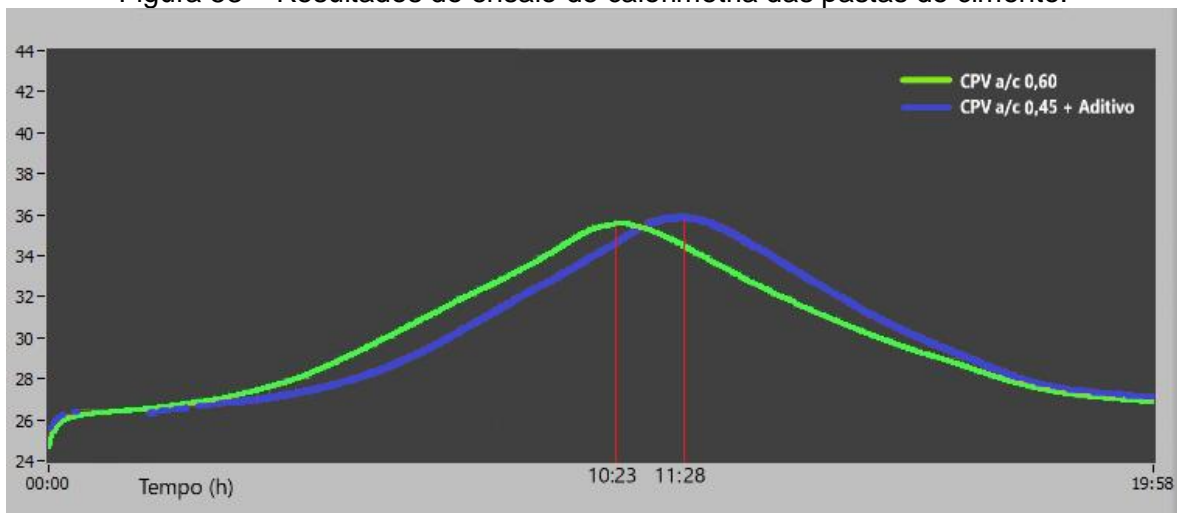
Traço	Consistência (mm)
CP 0,60 s/ NaCl	105
CP 0,60 c/ NaCl	100
CP 0,45 s/ NaCl	110
CP 0,45 c/ NaCl	110

Todos os traços confeccionados alcançaram medidas 105 ± 5 mm nos ensaios realizados, apresentando consistências e trabalhabilidades similares. Sendo assim os traços atenderam a premissa de S100 da NBR 8953 (2015) que define uma faixa de consistência de $100 \leq a < 160$ mm para elementos estruturais com lançamento convencional.

5.1.2 CALORIMETRIA

O resultado do calor de hidratação das pastas de cimento analisadas pode ser visualizado na Figura 53. A pasta com relação a/c 0,60 alcançou um pico de temperatura na faixa de 35,8°C, enquanto a pasta com relação a/c 0,45 e aditivo superplastificante alcançou um pico de temperatura de 36 °C.

Figura 53 – Resultados do ensaio de calorimetria das pastas de cimento.



Ambas as amostras apresentaram um pico de calor de hidratação em torno dos 36°C, entretanto a amostra com a relação a/c 0,45 apresentou o seu pico de temperatura cerca de uma hora depois da amostra a/c 0,60, devido a presença do aditivo. O resultado assemelhasse com o apresentado por Salvador (2011) e Scaquetti e Pimentel (2019) para o cimento CPV ARI.

5.1.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

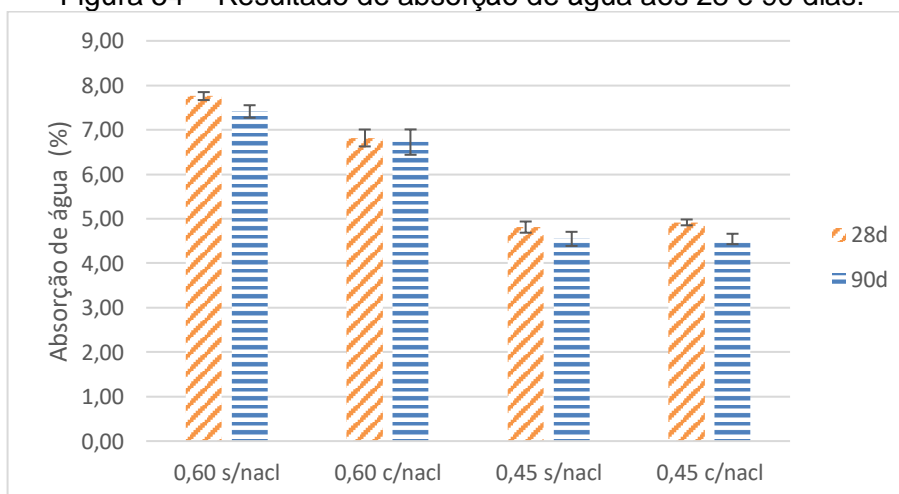
Neste ensaio avalia-se indiretamente a porosidade do concreto, indicando a resistência à penetração de agentes agressivos. Os resultados do ensaio de absorção dos traços utilizados no programa experimental são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultados de absorção de água 28 e 90 dias.

Traço	Absorção (%)		Desvio Padrão (%)		Coeficiente de Variação (%)	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
CP 0,60 s/NaCl	7,76	7,41	0,09	0,14	1,0	2,0
CP 0,60 c/NaCl	6,82	6,72	0,19	0,29	3,0	4,0
CP 0,45 s/NaCl	4,81	4,55	0,13	0,16	3,0	3,0
CP 0,45 c/NaCl	4,92	4,55	0,07	0,12	1,0	3,0

Os resultados de absorção de água nos 4 traços da pesquisa experimental são apresentados também de maneira gráfica na Figura 54.

Figura 54 – Resultado de absorção de água aos 28 e 90 dias.



Para a verificação da variação dos resultados nas duas idades de cura e entre os traços do concreto, realizou-se o teste ANOVA, com nível de significância de 5%, cuja análise apresenta-se na Tabela 21.

Tabela 21 – ANOVA Absorção de água 28 e 90 dias.

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Fc	Resultado
Idade	0,43	1	0,43	16,64	0,00087	4,49	significativo
Traços	38,74	3	12,92	497,55	5,32E-16	3,24	significativo
Interações	0,07	3	0,02	0,91	0,459	3,24	não significativo
Erro	0,42	16	0,03	-	-	-	

SQ= soma dos quadrados; C= número de categorias; MQ média dos quadrados; F= parâmetro de Fisher para o teste de significância; Fc= fator crítico.

Devido ao fato do valor de F ser maior do que o valor de F crítico para a análise entre idades e entre traços, existe uma diferença de valores significativa entre os traços, levando a rejeição da hipótese nula. Para análise das variâncias entre as

idades, e verificar quais possuem diferença e quais podem ser consideradas estatisticamente semelhantes, foi realizada o teste de Tukey em par de médias com significância de 5% (Tabela 22).

Tabela 22 - Teste de Tukey entre mesmo traço e diferentes idades.

Traços	Resultado
0,60 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,60 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	não significativo
0,45 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,45 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo

Através do teste de Tukey comparando o mesmo traço em diferentes idades foi possível verificar que para o traço com relação a/c 0,60 contaminado com cloretos não houve alteração dos resultados em diferentes idades, podendo assim concluir que não houve uma evolução significativa dos valores de absorção de água no mesmo.

Foi realizada uma comparação dos traços entre si nas diferentes idades através do teste de Tukey para analisar uma possível alteração dos resultados. A comparação é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – Teste de Tukey Absorção de água aos 28 e 90 dias.

28 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
90 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl		significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl		-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl		-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-

Observa-se que os valores encontrados nas duas idades das amostras de relação a/c 0,45 contaminadas e não contaminadas por cloretos não apresentaram valores

significativos de variância. Sendo assim a contaminação por cloretos nos corpos de prova não foi significativa para alterar a absorção de água no concreto.

O índice de vazios foi analisado para os traços e são apresentados na Tabela 24 aos 28 dias e aos 90 dias de idade. Neste ensaio avalia-se indiretamente a compressibilidade e permeabilidade do concreto.

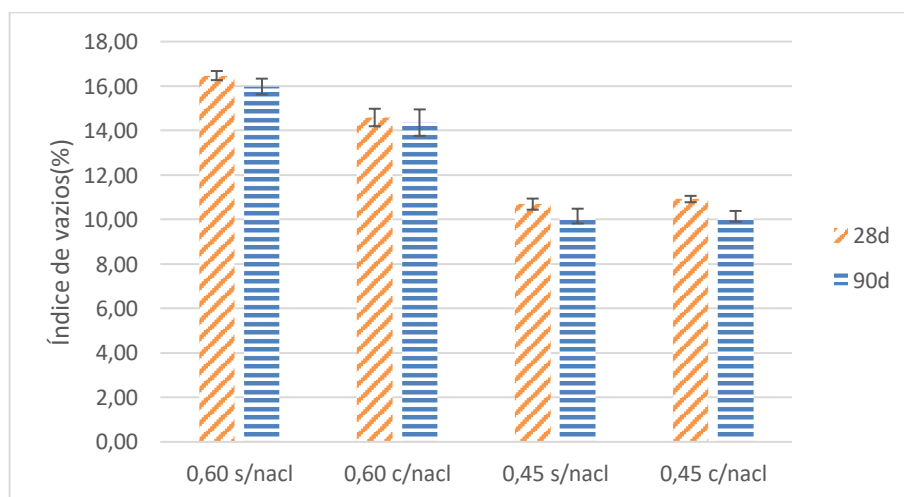
Tabela 24 – Resultados dos índices de vazios aos 28 e 90 dias.

Traço	Índice de vazios (%)		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação (%)	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
CP 0,60 s/NaCl	16,47	15,98	0,20	0,35	1,0	2,0
CP 0,60 c/NaCl	14,59	14,36	0,39	0,59	3,0	4,0
CP 0,45 s/NaCl	10,69	10,15	0,25	0,33	2,0	3,0
CP 0,45 c/NaCl	10,92	10,14	0,14	0,24	1,0	2,0

Os resultados dos índices de vazios nos 4 traços da pesquisa experimental são apresentados também de maneira gráfica na

Figura 55.

Figura 55 –Resultado do Índice de vazios aos 28 e 90 dias.



Para a verificação da variação dos resultados entre os traços e nas duas idades de cura do concreto, realizou-se o teste ANOVA, com nível de significância de 5%, cuja análise apresenta-se na Tabela 25.

Tabela 25 - ANOVA Índice de vazios 28 e 90 dias.

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Fc	Resultado
Idade	1,54	1	1,54	13,36	0,0021	4,49	significativo
Traços	151,6	3	50,56	438,51	1,44E-15	3,24	significativo
Interações	0,22	3	0,07	0,64	0,6016	3,24	não significativo
Erro	155,3	23	-	-	-	-	

SQ= soma dos quadrados; C= número de categorias; MQ média dos quadrados; F= parâmetro de Fisher para o teste de significância; Fc= fator crítico.

Por meio da análise ANOVA, foi verificado que o índice de vazio apresentou o valor de F maior que o valor de F crítico, resultando em uma diferença de valores significativa entre os traços e entre as idades, levando a rejeição da hipótese nula.

Assim como nos resultados do ensaio de absorção de água, para os resultados do índice de vazios, também foi realizada uma comparação dos traços entre si nas diferentes idades através do teste de Tukey para analisar uma possível alteração dos resultados, a comparação é apresentada na (Tabela 26).

Tabela 26 – Teste de Tukey índice de vazios mesmo traço diferente idades.

Traços	Resultado
0,60 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	não significativo
0,60 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	não significativo
0,45 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	não significativo
0,45 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo

O resultado do teste de Tukey comparando o mesmo traço em diferentes idades apresentou uma diferença significativa entre as duas idades analisadas somente para o traço de relação a/c 0,45 contaminada por cloretos, podendo assim concluir que houve uma evolução significativa dos valores de índice de vazios neste traço.

Para análise das variâncias entre os traços por idade e para verificar quais diferença entre os pares foi realizada o teste de Tukey (Tabela 27).

Tabela 27 - Teste de Tukey índice de vazios aos 28 e 90 dias.

28 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
90 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl		significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl		-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl		-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-

Bem como os resultados obtidos no ensaio de absorção de água, os valores encontrados nas duas idades das amostras de relação a/c 0,45 contaminadas e não contaminadas por cloretos não apresentaram valores significativos de variância. Sendo assim a contaminação por cloretos nos corpos de prova de relação a/c 0,45 também não alterou esta propriedade no concreto para as duas idades analisadas.

Os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e índice de vazios, demonstram que existe uma diferença entre os tipos de traço de diferentes relações a/c sendo o traço com a relação a/c 0,45 apresentando menores valores, o que já era esperado devido ao fato de a relação a/c interferir diretamente na existência de poros e permeabilidade do concreto.

5.1.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS

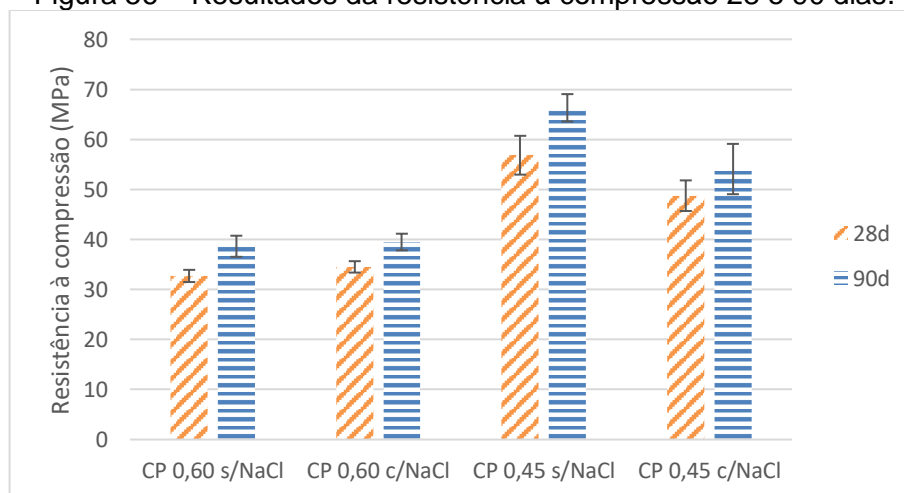
Para a caracterização da resistência à compressão dos concretos, os corpos de prova cilíndricos foram submetidos à ensaios de resistência à compressão axial. Os resultados da resistência à compressão do concreto aos 28 e 90 dias são apresentados Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados de resistência à compressão aos 28 e 90 dias.

Traço	Resistência à Compressão (MPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação (%)	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
CP 0,60 s/NaCl	33	39	1,22	2,11	4,0	5,0
CP 0,60 c/NaCl	35	40	1,14	1,66	3,0	4,0
CP 0,45 s/NaCl	57	66	3,88	2,74	7,0	4,0
CP 0,45 c/NaCl	49	54	3,06	5,03	6,0	9,0

Através dos resultados foi possível demonstrar os resultados do ensaio de compressão axial de forma gráfica na Figura 56.

Figura 56 – Resultados da resistência à compressão 28 e 90 dias.



Para a verificação da variação dos resultados nas duas idades de cura do concreto, realizou-se o teste ANOVA, com nível de significância de 5%, cuja análise apresenta-se na

Tabela 29.

Tabela 29- ANOVA resistência à compressão 28 e 90 dias.

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Fc	Resultado
Idade	247,6	1	247,62	29,48	5,56E-05	4,49	significativo
Traços	2752	3	917,34	109,23	7,21E-11	3,24	significativo
Interações	19,21	3	6,40	0,76	0,53	3,24	não significativo
Erro	3153	23	8,49	-	-	-	

SQ= soma dos quadrados; C= número de categorias; MQ média dos quadrados; F= parâmetro de Fisher para o teste de significância; Fc= fator crítico.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão apresentaram um valor de F maior do que o valor de F crítico, existindo então uma diferença de valores significativa entre os traços e entre as idades, levando a rejeição da hipótese nula. Para analisar a variância na evolução da resistência à compressão dos traços utilizados na pesquisa experimental, foi realizado um teste de Tukey comparando o mesmo traço nas duas idades, o resultado está na Tabela 30.

Tabela 30 – Teste de Tukey mesmo traço diferentes idades.

Traços	Resultado
0,60 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,60 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,45 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,45 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	não significativo

O traço 0,45 com NaCl não apresentou uma evolução significativa em seus resultados nas diferentes idades analisadas, tal constatação corrobora com o resultado apresentado na análise por método de Tukey para índice de vazios comparando o mesmo traço para idades distintas.

Para análise das variâncias entre os traços, e verificação se há algum comparativo entre os quatro traços que possa ser considerada equivalentes, foi realizada o teste de Tukey (Tabela 31).

Tabela 31 – Teste de Tukey resistência à compressão 28 e 90 dias.

28 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	não significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
90 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl		não significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl		-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl		-	-	significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-

O teste de Tukey demonstrou que não houve variância significativa entre os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão entre os traços de relação a/c 0,60 contaminados e não contaminados, o que se pode concluir que a contaminação não alterou de maneira expressiva a resistência à compressão para as duas idades analisadas. Já os corpos de prova com relação a/c 0,45 apresentaram uma diferença de resultados entre os contaminados e os não contaminados, chegando a uma diferença média de 12 MPa aos 90 dias de idade.

Os valores de resistência à compressão apresentaram um aumento comparando as duas idades em três dos quatro traços analisados, isso se deu ao fato de o processo de hidratação do concreto continuar ativo, configurando mais produtos internos das reações de hidratação e assim conferindo maior resistência ao longo do tempo. Nota-se, como esperado, que os valores obtidos para o traço de relação a/c 0,45 foram superiores aos das amostras com relação a/c de 0,60, por gerar um concreto com maior densidade e menor porosidade.

5.1.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE.

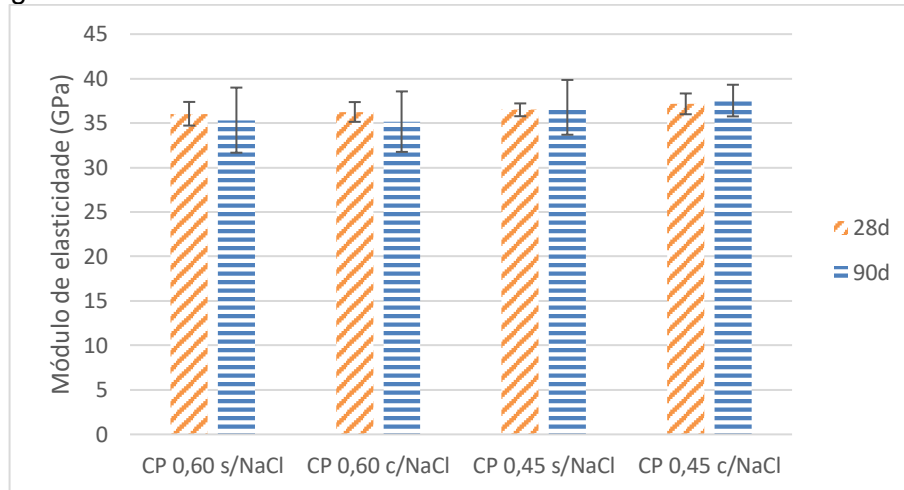
Os resultados dos módulos de elasticidade através do método de frequência ressonante forçada nos corpos de prova aos 28 dias e 90 dias de idade dos quatro traços, são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade 28 e 90 dias.

Traço	Módulo de Elasticidade (GPa)		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação (%)	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
CP 0,60 s/NaCl	36	35	1,33	3,66	4,0	10,0
CP 0,60 c/NaCl	36	35	1,11	3,40	3,0	10,0
CP 0,45 s/NaCl	36	36	0,72	3,08	2,0	8,0
CP 0,45 c/NaCl	37	37	1,17	1,78	3,0	5,0

Os resultados das médias obtidos através do ensaio de módulo de elasticidade são demonstrados graficamente na Figura 57

Figura 57 –Resultados do ensaio de módulo de elasticidade 28 e 90 dias.



Para verificar a diferença dos resultados obtidos nas duas idades específicas, foi realizado um teste ANOVA com nível de significância de 5%, cuja análise é apresentada na Tabela 33.

Tabela 33 - ANOVA módulo de elasticidade dinâmico 28 e 90 dias.

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Fc	Resultado
Idade	1479920	1	1479920	0,11	0,74	3,99	não significativo
Traços	34565801	3	11521934	0,84	0,48	2,75	não significativo
Interações	7065593	3	2355198	0,17	0,92	2,75	não significativo
Erro	9,22E+08	71		-	-	-	

SQ= soma dos quadrados; C= número de categorias; MQ média dos quadrados; F= parâmetro de Fisher para o teste de significância; Fc= fator crítico.

Os resultados dos ensaios de modulo de elasticidade apresentaram um valor de F menor do que o valor de F crítico, sendo possível confirmar que os valores encontrados para os quatro traços são estatisticamente equivalentes por não apresentarem variação significativa, isso se deve ao fato do módulo de elasticidade estar associado à rigidez do material analisado. Os valores encontrados estão semelhantes aos de Godinho e Santos (2017), Martins, Marcantonio e Lenine (2018) e Ferrari e Camargo (2021).

5.1.6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

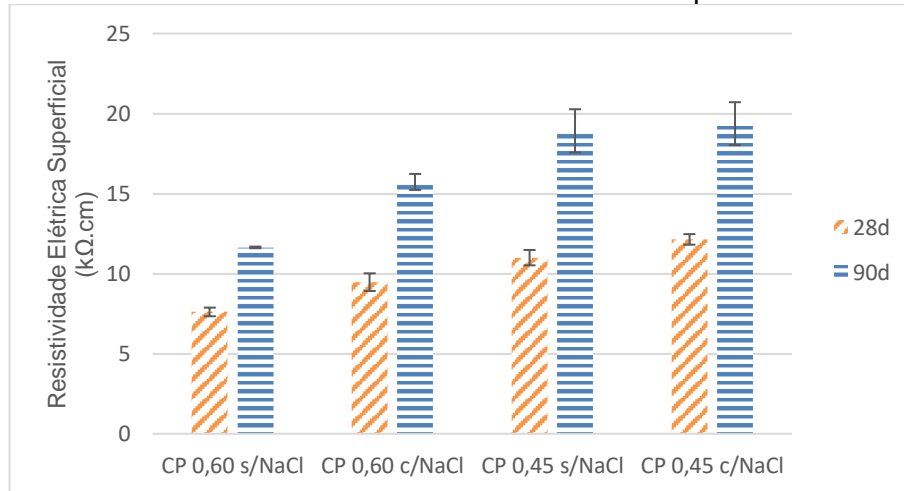
Para caracterização dos traços produzidos em relação à resistividade elétrica, foram realizados ensaios de resistividade elétrica volumétrica e superficial nos corpos de prova aos 28 e 90 dias de idade. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados do ensaio de Resistividade elétrica superficial 28 e 90 dias.

Traço	Resistividade Elétrica Superficial (kΩ.cm)		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação (%)	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
CP 0,60 s/NaCl	7,61	11,64	0,27	0,05	4,0	0,4
CP 0,60 c/NaCl	9,47	15,73	0,55	0,5	6,0	3,2
CP 0,45 s/NaCl	11	18,92	0,48	0,48	4,0	7,1
CP 0,45 c/NaCl	12,14	19,37	0,33	0,33	3,0	6,9

Os valores são apresentados também graficamente na Figura 58.

Figura 58 – Resultado ensaio de resistividade elétrica superficial 28 e 90 dias.



O resultado da análise de variância, considerando um nível de significância α de 5% para os valores das leituras da resistividade elétrica superficial nas duas idades aferidas para os quatro traços da pesquisa experimental são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - ANOVA resistividade elétrica superficial aos 28 e 90 dias.

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Fc	Resultado
Idade	5854,62	1	5854,62	1968,40	3,3E-100	3,89	significativo
Traços	3367,71	3	1122,57	377,42	2,44E-78	2,65	significativo
Interações	322,13	3	107,38	36,10	2,14E-18	2,65	significativo
Erro	10091,74	191		-	-	-	

SQ= soma dos quadrados; C= número de categorias; MQ média dos quadrados; F= parâmetro de Fisher para o teste de significância; Fc= fator crítico.

Excluindo a hipótese nula, a ANOVA dos valores da resistividade elétrica superficial nas duas idades dos concretos analisados apresentou um F superior ao F-crítico indicando uma diferença significativa, para comparativo par a par foi realizado um teste de Tukey (Tabela 36).

Tabela 36 – Teste de Tukey resistividade elétrica superficial mesmo traço diferentes idades.

Traços	Resultado
0,60 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,60 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,45 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,45 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo

Para todos os traços foi constatado que houve variação significativa entre os valores nas diferentes idades. Para analisar a variância entre os traços nas duas diferentes idades foi realizado um teste de Tukey e os resultados são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 – Teste de Tukey resistividade elétrica superficial aos 28 e 90 dias.

28 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
90 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl		significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl		-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl		-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-

Através do teste de Tukey foi possível afirmar que, para a idade de 28 dias os quatro traços apresentaram variâncias significativas entre si, entretanto aos 90 dias de cura os traços com relação a/c 0,45 não apresentaram diferença significativa podendo ser considerados estatisticamente semelhantes.

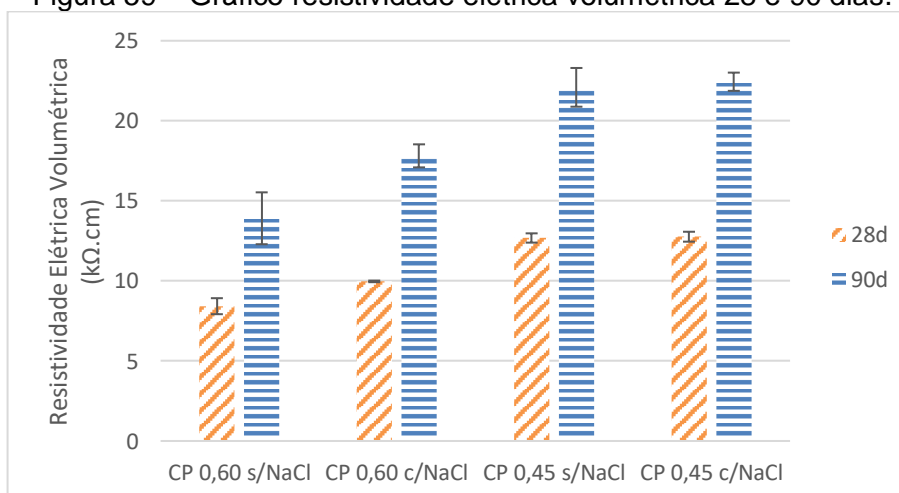
Para a etapa de caracterização do concreto foi realizado também o ensaio de resistividade elétrica volumétrica, os resultados das leituras nas duas idades são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Resistividade elétrica volumétrica 28 e 90 dias.

Traço	Resistividade Elétrica Volumétrica (kΩ.cm)		Desvio Padrão		Coeficiente de Variação (%)	
	28d	90d	28d	90d	28d	90d
CP 0,60 s/NaCl	8,4	13,9	0,5	1,62	6,0	12,0
CP 0,60 c/NaCl	10,0	17,8	0,05	0,72	1,0	4,0
CP 0,45 s/NaCl	12,7	22,1	0,29	1,21	2,0	5,0
CP 0,45 c/NaCl	12,8	22,4	0,31	0,57	2,0	3,0

Os resultados das médias das leituras de resistividade elétrica volumétrica são apresentados também de maneira gráfica na Figura 59.

Figura 59 – Gráfico resistividade elétrica volumétrica 28 e 90 dias.



A ANOVA foi realizada também para os resultados obtidos pelo método volumétrico de aferição da resistividade elétrica dos concretos, e é apresentada na Tabela 39.

Tabela 39- ANOVA resistividade elétrica volumétrica aos 28 e 90 dias.

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Fc	Resultado
Idade	394,06	1	394,06	585,43	4,99E-14	4,49	significativo
Traços	170,47	3	56,82	84,41	5,05E-10	3,23	significativo
Interações	16,75	3	5,58	8,29	0,001	3,23	significativo
Erro	592,06	23	-	-	-	-	

SQ= soma dos quadrados; C= número de categorias; MQ média dos quadrados; F= parâmetro de Fisher para o teste de significância; Fc= fator crítico.

ANOVA apresentou F maior que F-crítico para as duas idades e para os quatro traços analisados, para verificação da variância entre os pares para mesmo traço em diferentes idades o teste de Tukey é apresentado na Tabela 40.

Tabela 40- Teste Tukey resistividade elétrica volumétrico mesmo traço diferentes idades.

Traços	Resultado
0,60 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,60 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,45 s/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo
0,45 c/ NaCl 28 dias x 90 dias	significativo

Assim como na análise realizada para a resistividade elétrica superficial, os resultados da resistividade elétrica volumétrica apresentaram uma variância significativa do mesmo traço em diferentes idades.

Nos resultados dos dois métodos de ensaio de resistividade elétrica do concreto (superficial e volumétrico) foi possível perceber um crescimento nos valores da resistividade elétrica aos 90 dias comparativamente aos 28 dias para todos os traços, isso se dá devido à evolução do processo de hidratação do cimento e como resultado o preenchimento dos poros e endurecimento evolutivo do concreto. Tal comportamento está de acordo com outros resultados de pesquisas como Di Maio e Zaccardi (2014) e Yousuf, Wei e Tao (2017). A evolução dos valores se deu de maneira proporcional para os dois métodos analisados ao longo das idades.

Foi realizado também a análise através do teste de Tukey para comparativo entre os traços na mesma idade (Tabela 41).

Tabela 41 – Teste de Tukey resistividade elétrica volumétrica 28 e 90 dias.

28 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
90 dias				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl		significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl		-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl		-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-

Diferindo do resultado do teste de Tukey apresentado no ensaio de resistividade elétrica através da técnica superficial, o volumétrico apresenta um resultado comparativo de variância entre os traços com relação a/c 0,45 não significativo nas duas idades analisadas.

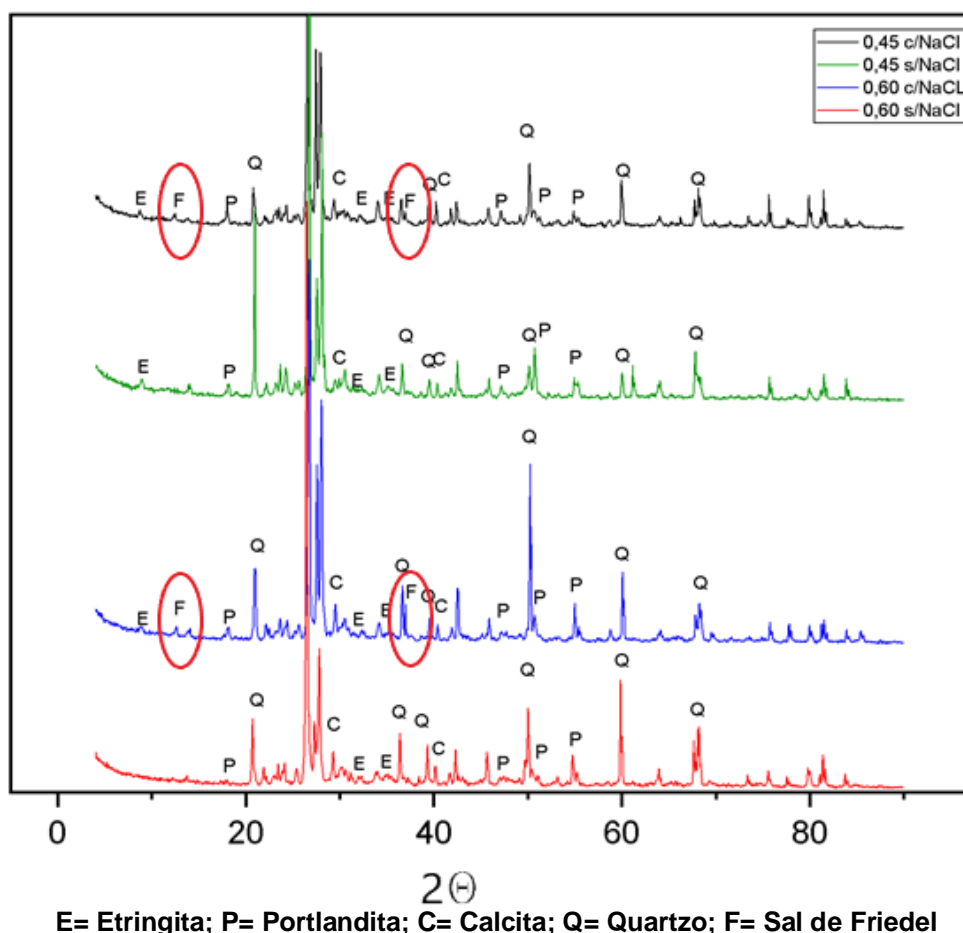
Esperava-se que os valores de resistividade elétrica para os corpos contaminados com cloretos, para ambas relações a/c, fossem menores que os corpos não contaminados. Entretanto, neste programa experimental isto não foi observado. Isso se deve ao fato de o cloreto utilizado como contaminante ter sido incorporado dissolvido na água de amassamento do concreto, sendo assim presente nas primeiras idades de cura do concreto. Desta maneira ocorrendo a formação de cloroaluminatos (Sal de Friedel) o que gerou a formação de cristais que além de retirar parte dos cloretos de sua forma livre, atuaram tamponando alguns vazios presentes na microestrutura do concreto, o tornando mais denso, tal fenômeno se apresentou de maneira mais expressiva nos traços de relação a/c 0,60.

5.1.7 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Para identificar as fases formadas na microestrutura que acarretaram em alterações dos resultados esperados para os ensaios de resistividade elétrica, foram realizados ensaios de difratometria de Raios-X em amostras dos quatro traços de concreto utilizados na pesquisa experimental.

Na Figura 60, são apresentados os gráficos do difratograma de Raios-X realizado nas amostras dos quatro traços.

Figura 60 – Difratometria de Raios-X para amostras dos quatro traços de concreto.



Foi possível verificar as principais fases resultantes do processo de hidratação do cimento, como a portlandita, a calcita e a etringita, além do quartzo oriundo do agregado miúdo. Tais fases se apresentaram em todos os traços, dado que os concretos se encontravam em processo avançado de cura (acima de 200 dias) o que significa um processo de hidratação já bem consolidado.

Nas amostras contaminadas por cloretos foi possível observar picos característicos de formação de cloroaluminatos (Sal de Friedel) na posição 2θ 13,2° e 36,5°, tais formações combinam com o padrão apresentado por Yue *et al.*, (2018).

5.2 CICLOS DE TEMPERATURA

Os corpos de prova foram submetidos ao início do ciclo de temperatura aos 204 dias de idade, após apresentarem resultados de ensaios de potencial de corrosão e polarização linear que sugerem atividade corrosiva na armadura de aço dos corpos de prova contaminados com cloretos.

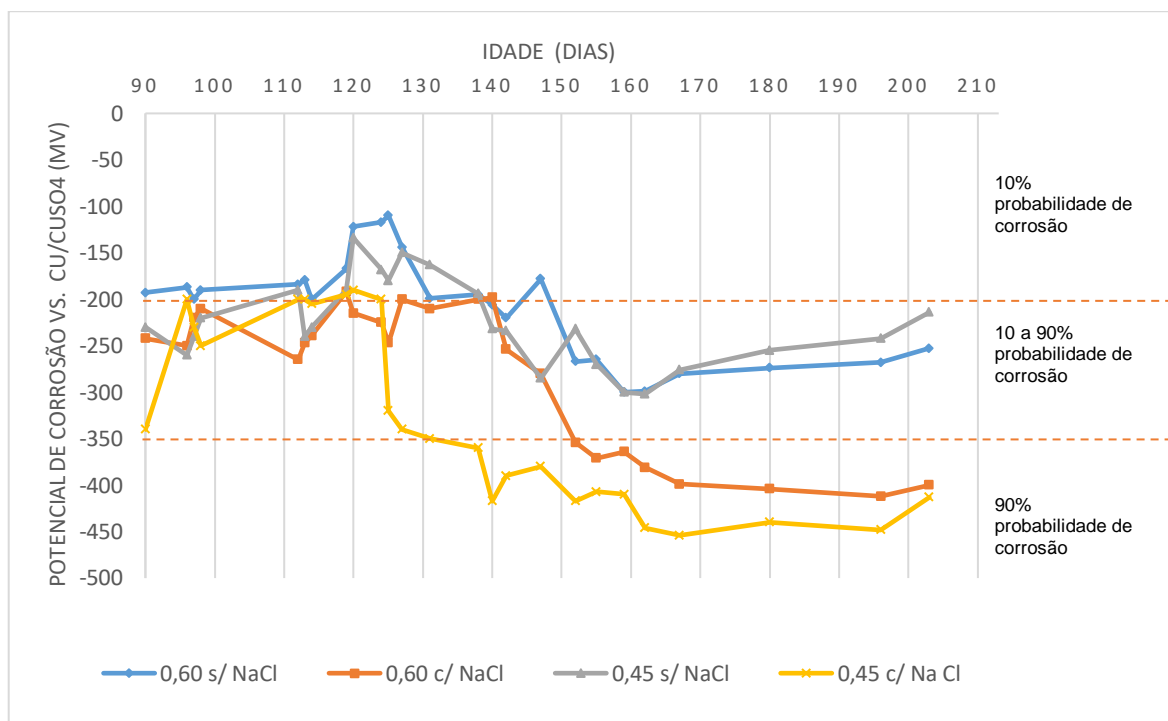
5.2.1 MONITORAMENTO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS DOS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS

Foram realizadas leituras de potencial de corrosão e resistividade elétrica superficial a partir dos 90 dias de idade nos corpos de prova, com a finalidade de avaliar a probabilidade de corrosão da armadura.

Na Figura 61 são apresentados os valores de potencial de corrosão dos corpos de prova com e sem contaminação de cloretos, assim como as faixas indicativas de probabilidade de corrosão da armadura segundo a norma C876-15 (ASTM, 2015).

Os dados foram considerados estáveis após três leituras consecutivas. Observa-se que os corpos de prova contaminados com cloretos dos traços de relação a/c de 0,60 e 0,45, apresentaram valores de potencial de corrosão que indicam probabilidade de corrosão de 90% da armadura após 152 dias da concretagem armazenados em câmara úmida.

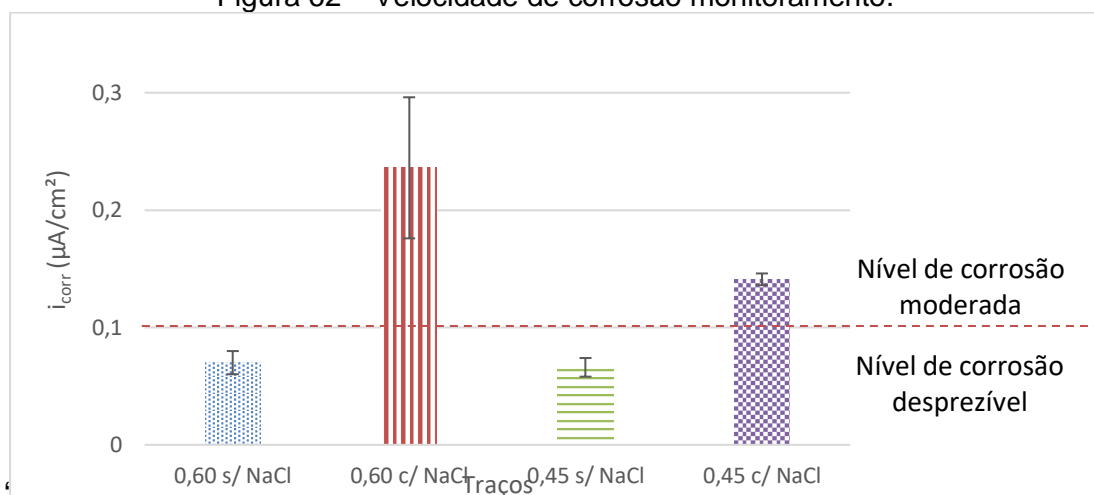
Figura 61 – Potencial de corrosão monitoramento.



A técnica de potencial de corrosão indica apenas o balanço entre a reação anódica e a catódica, não fornecendo informações quantitativas no que diz respeito a corrosão. Para uma análise quantitativa foi realizado o ensaio de polarização linear para confirmar o início do processo corrosivo nos corpos de prova contaminados com cloretos.

Os resultados da velocidade de corrosão obtidos através do ensaio de polarização linear para efeito de controle realizados aos 180 dias de idade dos corpos de prova são apresentados na Figura 62, assim como as faixas propostas por ANDRADE *et al.*, (1997).

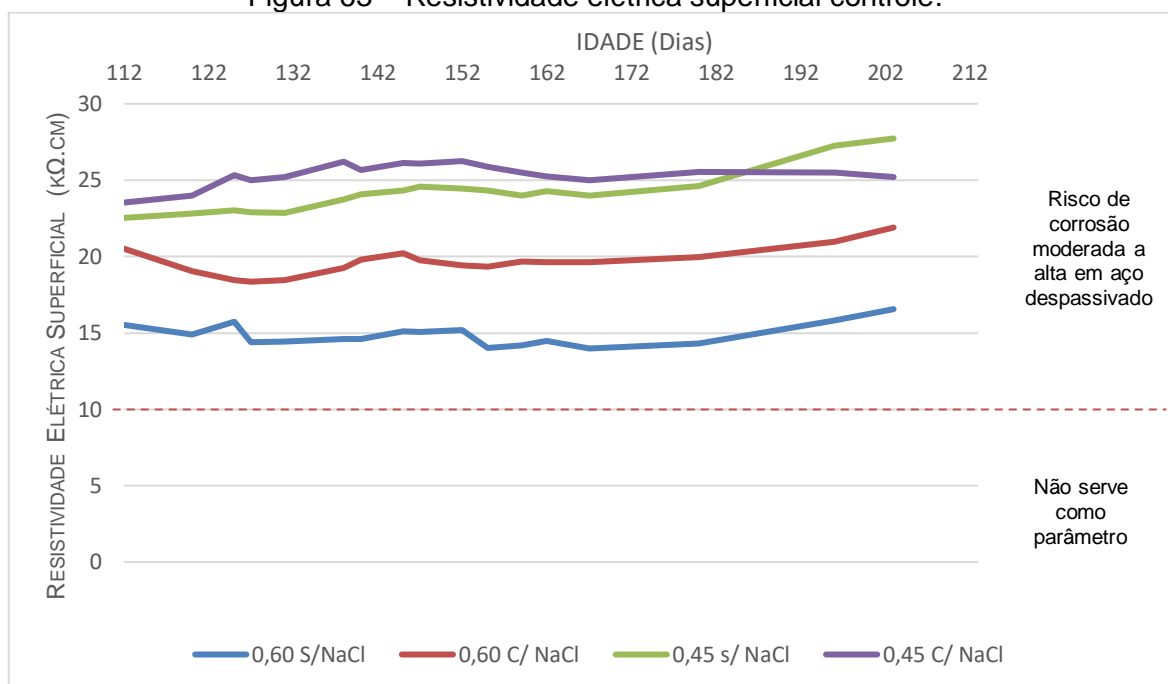
Figura 62 – Velocidade de corrosão monitoramento.



Os resultados do ensaio de polarização linear representam que os corpos de prova contaminados com cloretos atingiram um nível de corrosão moderado e os não contaminados um nível desprezível.

A resistividade elétrica superficial também foi monitorada ao longo deste período que precedeu a quarta etapa experimental, exposição dos corpos ao ciclo de temperatura. Os resultados das médias das leituras em cada idade para cada traço, assim como as faixas indicativas de risco de corrosão da armadura de acordo com Bromfield *et al.*, (2000) e Bertolini *et al.*, (2004), são apresentados na Figura 63.

Figura 63 – Resistividade elétrica superficial controle.



Foi realizada uma ANOVA para comparativo entre os valores de cada traço por idade ensaiada no ensaio de resistividade elétrica superficial (Tabela 42).

Tabela 42 – ANOVA resistividade elétrica superficial ao longo das idades do período de controle para os quatro traços.

Efeito	SQ	C	MQ	F	P	Fc	Resultado
Idade	3199	16	199,99	61,69	5,3E-105	1,66	significativo
Traços	27891	3	9297,25	2868,04	3E-304	2,62	significativo
Interações	928	48	19,34	5,97	2,17E-26	1,38	não significativo
Erro	33563	543		-	-	-	

SQ= soma dos quadrados; C= número de categorias; MQ média dos quadrados; F= parâmetro de Fisher para o teste de significância; Fc= fator crítico.

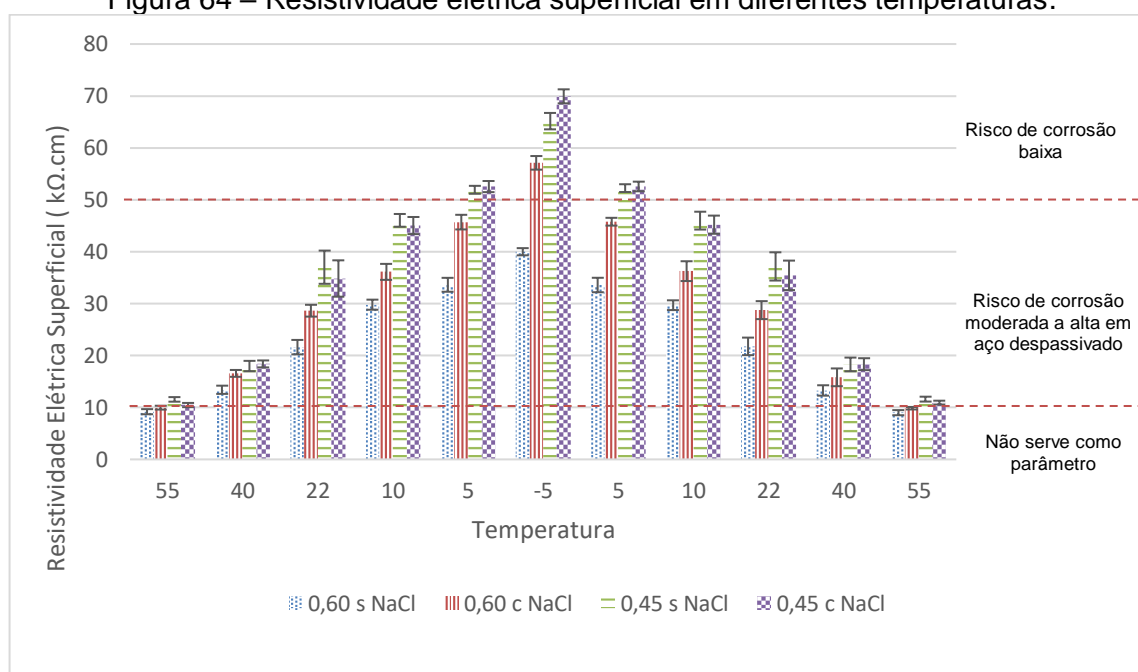
Apesar de os resultados apresentarem uma significância de variância, foi possível perceber uma tendência dos valores ao longo das idades. Isto pode ser interpretado devido ao fato de as amostras permanecerem durante o período de cura até o início da quarta etapa experimental (exposição aos ciclos de temperatura) em um ambiente de umidade relativa e temperatura controlada.

5.2.2 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA

Após constatado o princípio do processo corrosivo nos corpos de prova armados contaminados por cloretos, deu-se início a quarta etapa. Os corpos de prova foram expostos à ciclos de diferentes temperaturas conforme apresentado no item 4.3.11 e realizado ensaios de resistividade elétrica superficial, potencial de corrosão e polarização linear (velocidade de corrosão) para análise da influência da temperatura nestes parâmetros.

Os ensaios de resistividade elétrica superficial foram realizados com o objetivo de avaliar a influência da temperatura nos resultados aferidos nos concretos com diferentes relações a/c e também entre os contaminados por cloretos e os não contaminados. Os resultados das leituras ao longo da exposição das diferentes temperaturas para os quatro traços estudados são apresentados na Figura 64.

Figura 64 – Resistividade elétrica superficial em diferentes temperaturas.



Os resultados apresentaram, com a variação de temperatura, uma mudança de faixa analítica em relação ao risco de corrosão. Para a temperatura mais alta (55°C), os quatro traços analisados estão na zona limítrofe entre moderada a alto risco de corrosão para armaduras de aço despassivadas e valores que não servem

de parâmetro. Já para a temperatura de 40°C, 22°C e 10°C, todos os traços se encontram na faixa de moderada a alto risco de corrosão.

Na temperatura de 5°C os traços com relação a/c de 0,45 se encontram na faixa de baixo risco de corrosão e os traços de relação a/c 0,60 na faixa de moderada a alto risco de corrosão. Na temperatura negativa (-5°C) o traço com relação a/c 0,60 sem contaminação, permaneceu na faixa de moderada a alto risco de corrosão, o traço 0,60 contaminado migrou para a faixa de baixo risco de corrosão onde os traços com relação a/c 0,45 permaneceram.

Para análise estatística dos resultados foram realizados testes ANOVA para avaliação da variância. A primeira análise consiste em verificar a variação entre os resultados encontrados para diferentes temperaturas e diferentes traços. Para isso são apresentados resultados do início do ciclo de 55°C até o -5°C e na sequência o retorno, partindo de -5°C para 55°C, respectivamente (Tabela 43 e Tabela 44).

Tabela 43 - ANOVA 55°C para -5°C resistividade elétrica superficial.

Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	4,77.10 ⁵	9245,21	0	2,23	significativo
Traços	5,81.10 ⁴	1872,33	8,49E-289	2,62	significativo
Interações	2,33.10 ⁴	150,66	7,36E-184	1,68	significativo
Erro	5,65.10 ⁵	-	-	-	

Tabela 44 - ANOVA -5°C para 55°C resistividade elétrica superficial.

Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	4,80.10 ⁵	96057,02	0	2,23	significativo
Traços	5,85.10 ⁴	19518,20	0	2,62	significativo
Interações	2,23.10 ⁴	1489,23	5,56E-227	1,68	significativo
Erro	5,65.10 ⁵	-	-	-	

Baseado nos valores encontrados na análise de variância, pode-se concluir que a variação de temperatura, assim como, a diferença dos traços são parâmetros que influenciam os resultados obtidos no ensaio de resistividade elétrica superficial.

Analizando o efeito da variação da temperatura nos resultados encontrados, é possível concluir que o seu aumento influencia diretamente os valores em todos os traços analisados. O aumento da temperatura faz com que a resistividade elétrica

do concreto diminua, e o inverso também se faz verdadeiro, à medida que a temperatura diminui observa-se um aumento da resistividade.

É possível constatar também que os valores de resistividade elétrica nos concretos com maior relação a/c são inferiores a aqueles com menor relação a/c. Isso se deve ao fato da relação a/c possuir uma forte influência na rede de poros do concreto endurecido. Sendo assim, quanto maior essa relação maior será a probabilidade da presença de uma microestrutura porosa, assim como a existência de poros maiores e interconectados. A resistividade elétrica depende da permeabilidade do concreto, volume da solução presente nos poros e concentração de íons nessa solução (GJØRV, 2015).

Para verificar a variação dos resultados entre os traços para as mesmas temperaturas (início do ciclo e final) foram realizadas análises de variância para cada temperatura, os resultados das análises são apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 – ANOVA início e fim do ciclo para cada temperatura

55°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	0,32	0,59	0,44	3,89	não significativo
Traços	500,56	309,36	1,3E-71	2,65	significativo
Interações	10,07	6,22	0	2,65	significativo
Erro	610,19	-	-	-	-
40°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	3,82	1,04	0,30	3,89	não significativo
Traços	2376,89	215,64	5,58E-60	2,65	significativo
Interações	21,93	1,99	0,11	2,65	não significativo
Erro	3078,71	-	-	-	-
22°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	6,19	0,33	0,56	3,89	não significativo
Traços	21510,26	388,71	2,36E-79	2,65	significativo
Interações	9,59	0,17	0,91	2,65	não significativo
Erro	24920,12	-	-	-	-
10°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	17,19	0,87	0,35	3,89	não significativo
Traços	28198,18	478,88	1,21E-86	2,65	significativo
Interações	30,09	0,51	0,67	2,65	não significativo
Erro	31856,96	-	-	-	-
5°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	1,24	0,40	0,52	3,89	não significativo
Traços	34396,91	11465,64	3,4E-164	2,65	significativo
Interações	3,02	1,00	0,32	2,65	não significativo
Erro	34970,81	-	-	-	-

A partir da análise de variância apresentada na tabela 45, entre os mesmos traços para mesmas temperaturas (início e fim de ciclo). É possível afirmar que não houve variação significativa em nenhuma delas. Concluindo que a exposição dos concretos às temperaturas dentro da faixa do estudo experimental não foi capaz de alterar de modo significativo a microestrutura a ponto de alterar os valores aferidos nas mesmas temperaturas no início e final do ciclo.

Após a análise do gráfico das resistividades elétricas superficiais em diferentes temperaturas, foi realizada um teste Tukey entre os resultados dos quatro traços para análise da variação entre os resultados por cada temperatura (Tabela 46).

Tabela 46 - Teste Tukey entre traços para cada temperatura resistividade elétrica superficial.

55°C				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
40°C				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
22°C				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
10°C				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
5°C				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	não significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-
-5°C				
Traços	0,60 s/ NaCl	0,60 c/ NaCl	0,45 s/ NaCl	0,45 c/ NaCl
0,60 s/ NaCl	-	significativo	significativo	significativo
0,60 c/ NaCl	-	-	significativo	significativo
0,45 s/ NaCl	-	-	-	significativo
0,45 c/ NaCl	-	-	-	-

Foi possível através da análise do teste Tukey realizado em cada temperatura para cada traço, constatar que os concretos com relação a/c 0,45 não contaminados não

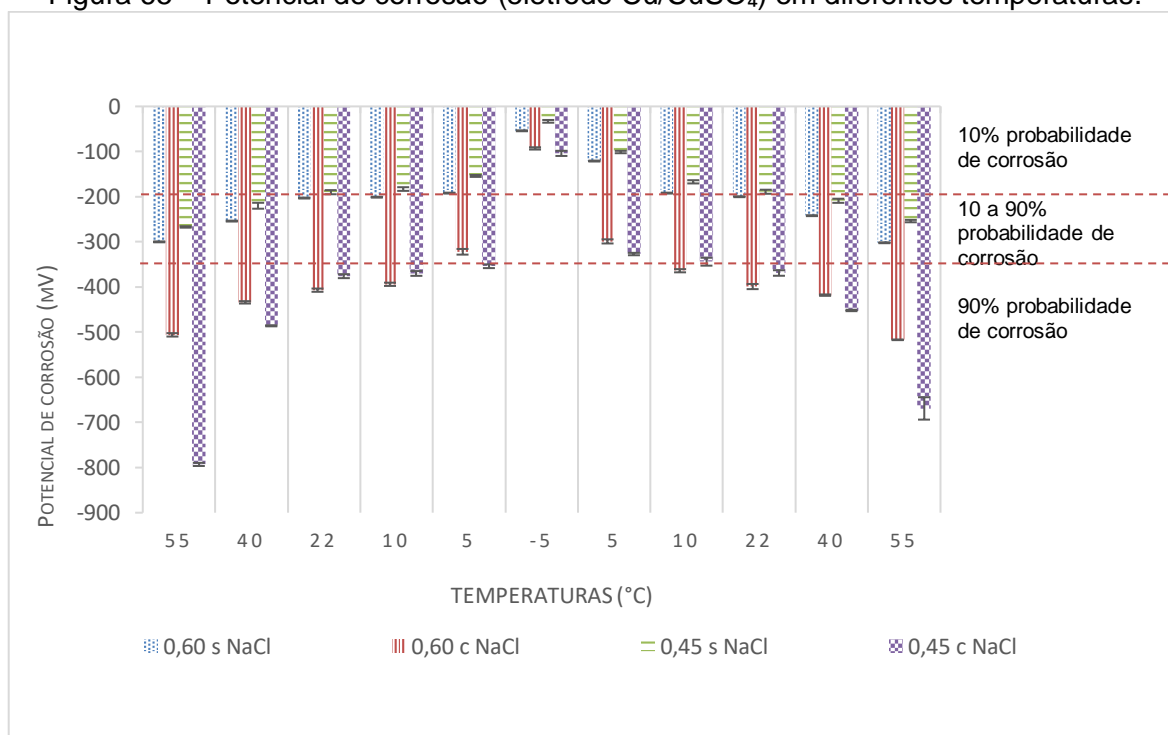
obtiveram variações significativas de resultados comparativamente aos contaminados com cloretos entre a faixa de temperatura de 5°C a 40°C.

Os concretos apresentaram variações nos resultados da resistividade elétrica entre si na temperatura mais alta (55°C) e na mais baixa (-5°C), mas assim como aponta Tomlinson *et.al.*, (2017), foi possível perceber variações mais significativas nos patamares entre a temperatura mais baixa.

Assim como as análises realizadas para o ensaio de resistividade elétrica superficial, foram examinados os resultados das leituras de potencial de corrosão feitas com o eletrodo de referência de Cobre/Sulfato de Cobre.

O gráfico da Figura 65 apresenta os valores de potencial de corrosão aferidos para os quatro traços ao longo dos ciclos de temperatura.

Figura 65 – Potencial de corrosão (eletrodo Cu/CuSO₄) em diferentes temperaturas.



Através da análise dos resultados pode se inferir que leituras realizadas abaixo da temperatura de 10°C, gerou resultados que indicam a baixa probabilidade de corrosão nas armaduras devido ao aumento da resistividade elétrica do concreto.

Sobretudo em temperaturas negativas, onde os resultados indicaram uma ausência de corrosão.

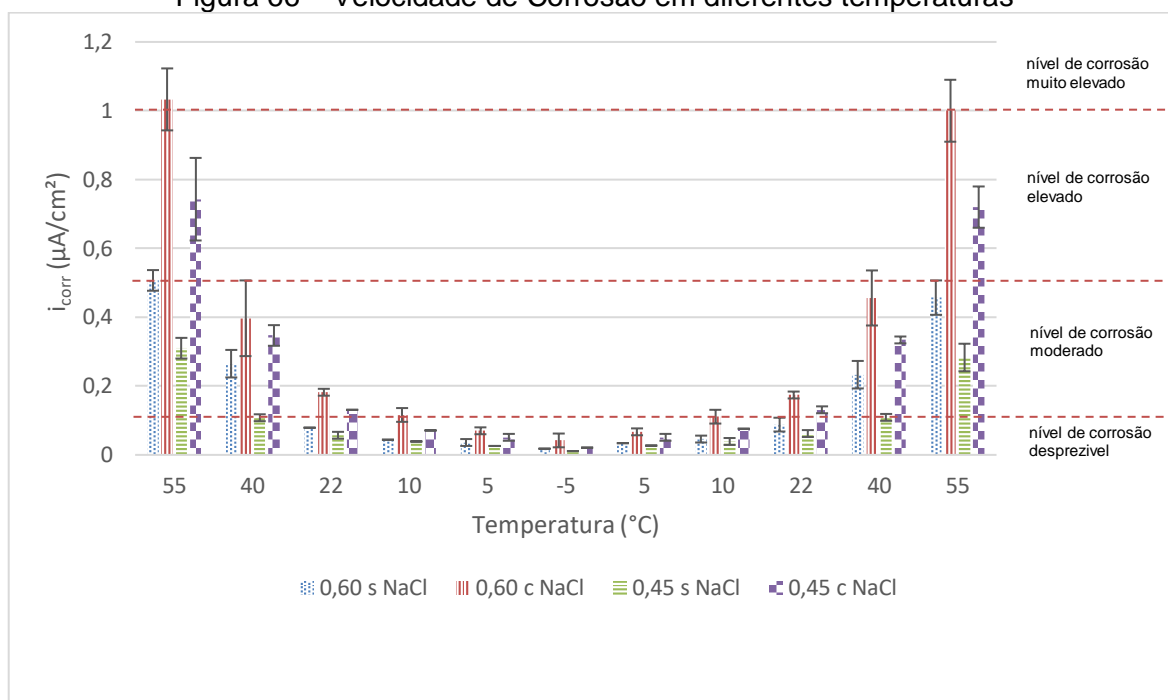
Em contrapartida em temperaturas acima de 22°C existe uma tendência de se observar resultados mais eletronegativos. Mesmo os corpos de prova de concreto não contaminados apresentaram resultados dentro da faixa de incerteza de corrosão.

Devido a direta influência da temperatura nas leituras de potencial de corrosão é recomendado que as aferições ocorram em temperatura na faixa de $22,2^{\circ}\text{C} \pm 5,5^{\circ}\text{C}$. A norma C876 (ASTM,2015) especifica, que caso a leitura seja realizada fora desta faixa, seja realizada uma correção de 0,5 mV para cada $0,5556^{\circ}\text{C}$ de diferença na temperatura. Helene (1993) recomenda uma correção de 0,9 mV a cada 1°C de variação de temperatura. Entretanto nenhuma destas correções sugeridas se adequaram em relação aos resultados obtidos.

As variações dos resultados entre os traços por temperatura foram mais expressivas entre os concretos contaminados e os não contaminados de mesma relação a/c. Já a diferença entre os valores dos contaminados de diferentes relações a/c e dos não contaminados de diferentes relações a/c, seguiram uma mesma tendência ao longo da mudança das temperaturas, ocupando juntos a mesma faixa analítica ao longo dos ciclos.

Foram realizados ensaios de polarização linear nos corpos de prova armados, para cálculo da resistência de polarização e por conseguinte os valores de velocidade de corrosão (i_{corr}). Os resultados dos ensaios dos traços a cada temperatura são apresentados na Figura 66.

Figura 66 – Velocidade de Corrosão em diferentes temperaturas



A partir dos resultados deste ensaio foi possível verificar que todos os traços seguiram uma mesma tendência de aumento da velocidade de corrosão em temperaturas mais altas, exibindo os maiores patamares de diferença entre eles na temperatura mais elevada ($55^{\circ}C$).

De acordo com Østvik (2004), em temperaturas mais altas, a probabilidade de duas moléculas colidirem é maior. Essa taxa de colisão mais elevada gera um aumento na energia cinética, o que afeta a energia de ativação da reação, sendo que a energia de ativação é a energia necessária para garantir que uma reação aconteça.

Para analisar a relação de valores, principalmente nas duas temperaturas extremas foi realizada uma ANOVA entre os resultados dos traços nas temperaturas de $55^{\circ}C$ e na de $-5^{\circ}C$, o resultado destas análises de variância é representada na Tabela 47.

Tabela 47 – ANOVA temperatura 55°C e -5°C para velocidade de corrosão.

55°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Entre grupos	2724,69	109028,55	5,66E-19	3,84	significativo
Dentro dos grupos	0,0499				
Erro	2724,75	-	-	-	
-5°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Entre grupos	0,0016	3,65	0,06	4,06	não significativo
Dentro dos grupos	0,0012				
Erro	0,0029	-	-	-	

A partir do resultado da ANOVA da tabela 47, foi possível constatar que o patamar da temperatura mais alta (55°C) apresenta uma expressiva variação entre os resultados de cada traço para a mesma temperatura, já na temperatura mais baixa (-5°C) os resultados não apresentaram uma variação significativa, sendo assim as leituras na temperatura de -5°C podem ser consideradas estatisticamente equivalentes para todos os traços.

A fim de analisar a variação entre os resultados encontrados para diferentes temperaturas e diferentes traços, é apresentado resultados do início do ciclo de 55°C até o -5°C e logo após, os valores de retorno, partindo de -5°C para 55°C (Tabela 48 e Tabela 49)

Tabela 48 – ANOVA 55°C para -5°C velocidade de corrosão.

Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	3,8291	448,08	4,87E-39	2,41	significativo
Traços	0,5287	103,13	6,23E-21	2,80	significativo
Interações	0,7020	27,38	1,89E-18	1,88	significativo
Erro	5,1420	-	-	-	

Tabela 49 – ANOVA -5°C para 55°C velocidade de corrosão.

Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	3,4982	545,51	4,77E-41	2,41	significativo
Traços	0,5510	143,21	6,01E-24	2,80	significativo
Interações	0,7283	37,86	1,93E-21	1,88	significativo
Erro	4,8391	-	-	-	

Através da análise do gráfico da figura 67 e dos resultados da ANOVA da tabela 48 e 49, é possível constatar que a temperatura afetou de maneira significativa a velocidade de corrosão dos concretos contaminados.

Ao serem expostos à mais alta temperatura do ciclo, os concretos contaminados atingiram resultados de níveis de corrosão muito elevado. Nas temperaturas mais baixas (-5°C e 5°C) os corpos contaminados apresentaram-se na faixa de nível de corrosão desprezível de acordo de valores definidos por ANDRADE *et al.*, (1997).

Foi possível observar que em temperaturas abaixo de 22°C os concretos contaminados passaram a ocupar a faixa de nível de corrosão desprezível estando assim em conformidade com os valores obtidos nos ensaios de resistividade elétrica superficial e potencial de corrosão para as temperaturas mais baixas (10°C, 5°C e -5°C).

Devido ao método empregado (polarização linear) para obtenção dos resultados de velocidade de corrosão, os valores obtidos nas temperaturas superiores à de 22 °C, os resultados apresentaram um nível de corrosão acima do desprezível mesmo nos corpos não contaminados. Porém não é possível afirmar se a corrosão está ocorrendo devido os resultados dos outros dois métodos de análise (potencial de corrosão e resistividade elétrica superficial), onde os resultados não indicaram esta conclusão.

De acordo com Wolynech (2002), o método é indicado para análise da variação dos valores da resistência de polarização, que devido a ela se pode verificar se está havendo alguma mudança (aumento ou diminuição) no processo corrosivo. Como o objetivo do estudo foi analisar a influência da velocidade de corrosão devido a variação da temperatura, o método se mostrou adequado.

Para análise da variância entre os valores obtidos para cada traço nas mesmas temperaturas (início do ciclo e final) foram realizadas análises de variância para cada temperatura, os resultados das análises são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 - ANOVA início e fim do ciclo para cada temperatura velocidade de corrosão.

55°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	0,00534	0,95	0,34	4,49	não significativo
Traços	1,99570	117,81	4,05E-11	3,24	significativo
Interações	0,00125	0,07	0,97	3,24	não significativo
Erro	2,09264	-	-	-	
40°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	1,8E-05	0,006	0,93	4,49	não significativo
Traços	0,41667	47,49	3,4E-08	3,24	significativo
Interações	0,0086	0,98	0,42	3,24	não significativo
Erro	0,4721	-	-	-	
22°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	8,2E-06	0,10	0,75	4,49	não significativo
Traços	0,0569	234,52	2E-13	3,24	significativo
Interações	0,0003	1,15	0,35	3,24	não significativo
Erro	0,0586	-	-	-	
10°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	7,04E-06	0,05	0,82	4,49	não significativo
Traços	0,0202	51,63	1,89E-08	3,24	significativo
Interações	4,61E-05	0,11	0,95	3,24	não significativo
Erro	0,0224	-	-	-	
5°C					
Efeito	SQ	F	P	Fc	Resultado
Temperatura	2E-06	0,05	0,81	4,49	não significativo
Traços	0,0069	60,77	5,8E-09	3,24	significativo
Interações	1,9E-05	0,17	0,92	3,24	não significativo
Erro	0,0075	-	-	-	

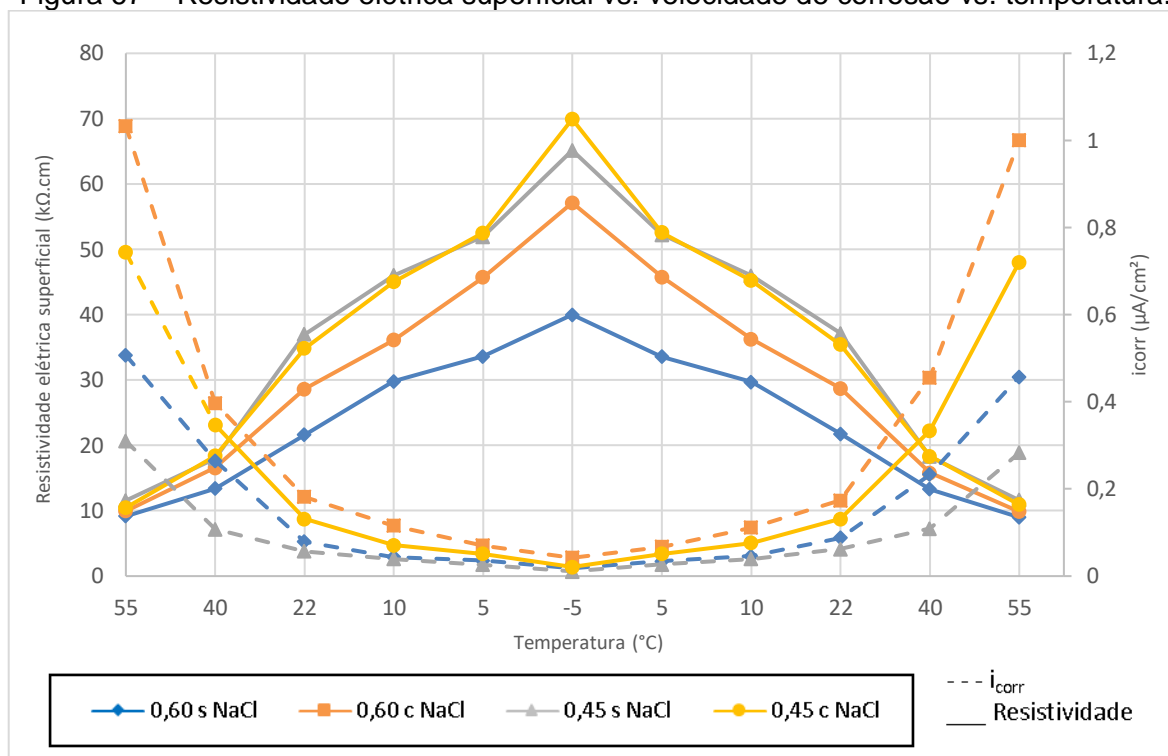
A partir da análise de variância apresentada na tabela 50 é possível constatar que assim como a resistividade elétrica, a velocidade de corrosão não sofreu alterações de resultados entre os mesmos traços para mesmas temperaturas (início e fim de ciclo).

Não foi percebido em nenhum dos corpos de prova o surgimento de desgaste, fissuras ou danos superficiais devido à exposição às temperaturas dos ciclos.

A partir dos resultados obtidos pelos métodos empregados para análise da resistividade elétrica superficial, potencial de corrosão e velocidade de corrosão, foi possível realizar uma correlação entre os valores. Na

Figura 67 é apresentada de forma gráfica a correlação entre a resistividade elétrica superficial e a velocidade de corrosão (i_{corr}) para os quatro traços em cada temperatura do ciclo.

Figura 67 – Resistividade elétrica superficial vs. velocidade de corrosão vs. temperatura.



Através do gráfico da Figura 67, foi possível notar a existência de uma tendência inversamente proporcional, entre a velocidade de corrosão e a resistividade elétrica superficial.

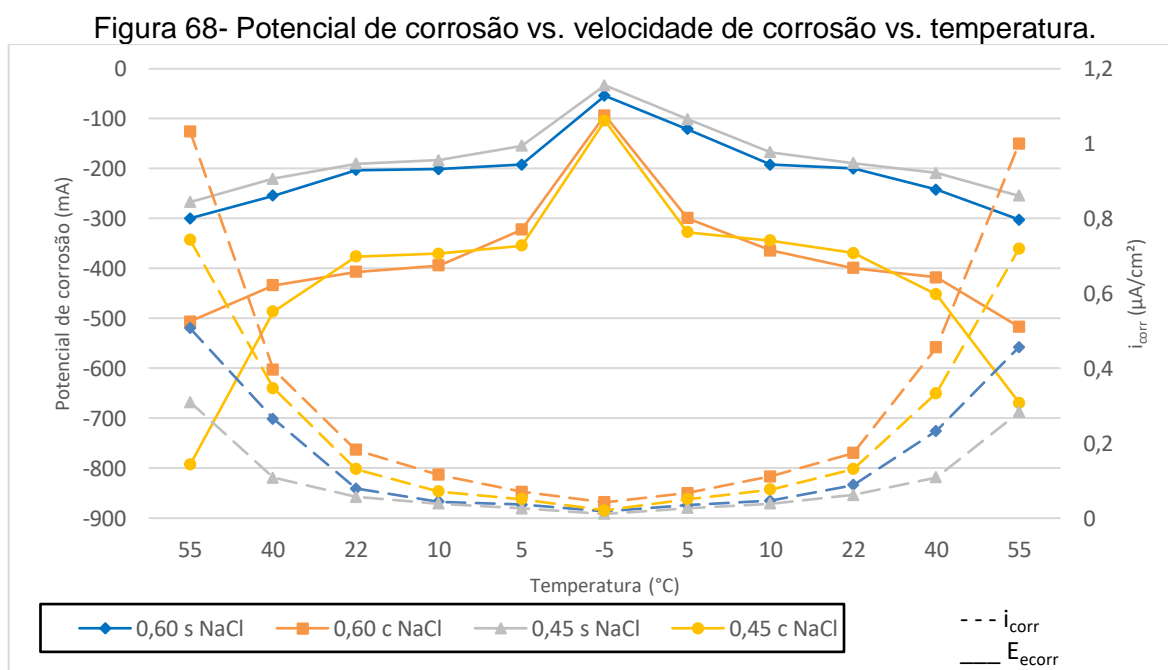
Conforme a temperatura diminui a resistividade elétrica superficial aumenta e a velocidade de corrosão diminui, tal resultado era o esperado, visto que a resistividade elétrica está diretamente ligada ao fluxo dos íons através do eletrólito presente nos poros do interior do concreto.

Com o aumento da resistividade elétrica a passagem dos íons é prejudicada resultando em uma diminuição na intensidade da corrente que flui pelo circuito.

O traço com relação a/c 0,60 contaminado apresentou em seu resultado de resistividade elétrica superficial valores superiores ao traço relação a/c 0,60 não contaminado, consequência do fenômeno de tamponamento de vazios ocasionado pela formação de cloroaluminatos. Entretanto, foi o concreto que apresentou maiores valores de velocidade de corrosão ao longo de todos os ciclos de temperatura, o que se deve à maior presença de vazios em comparação concreto

de traço com relação a/c 0,45 e a presença de íons cloretos em comparação ao traço referência de mesma relação a/c.

O gráfico da Figura 68 apresenta a correlação entre o potencial de corrosão e a velocidade de corrosão medido nos concretos com os quatro traços para cada temperatura do ciclo.



Os resultados encontrados demonstram que a variação da temperatura influenciou os valores de maneira similar em relação à cinética de corrosão.

Para os concretos contaminados por cloretos nas duas relações a/c, o potencial de corrosão encontrava-se com seus valores mais eletronegativos na temperatura mais alta (55°C) de maneira análoga aos resultados da velocidade de corrosão que apresentou seus maiores níveis de corrosão na mesma temperatura.

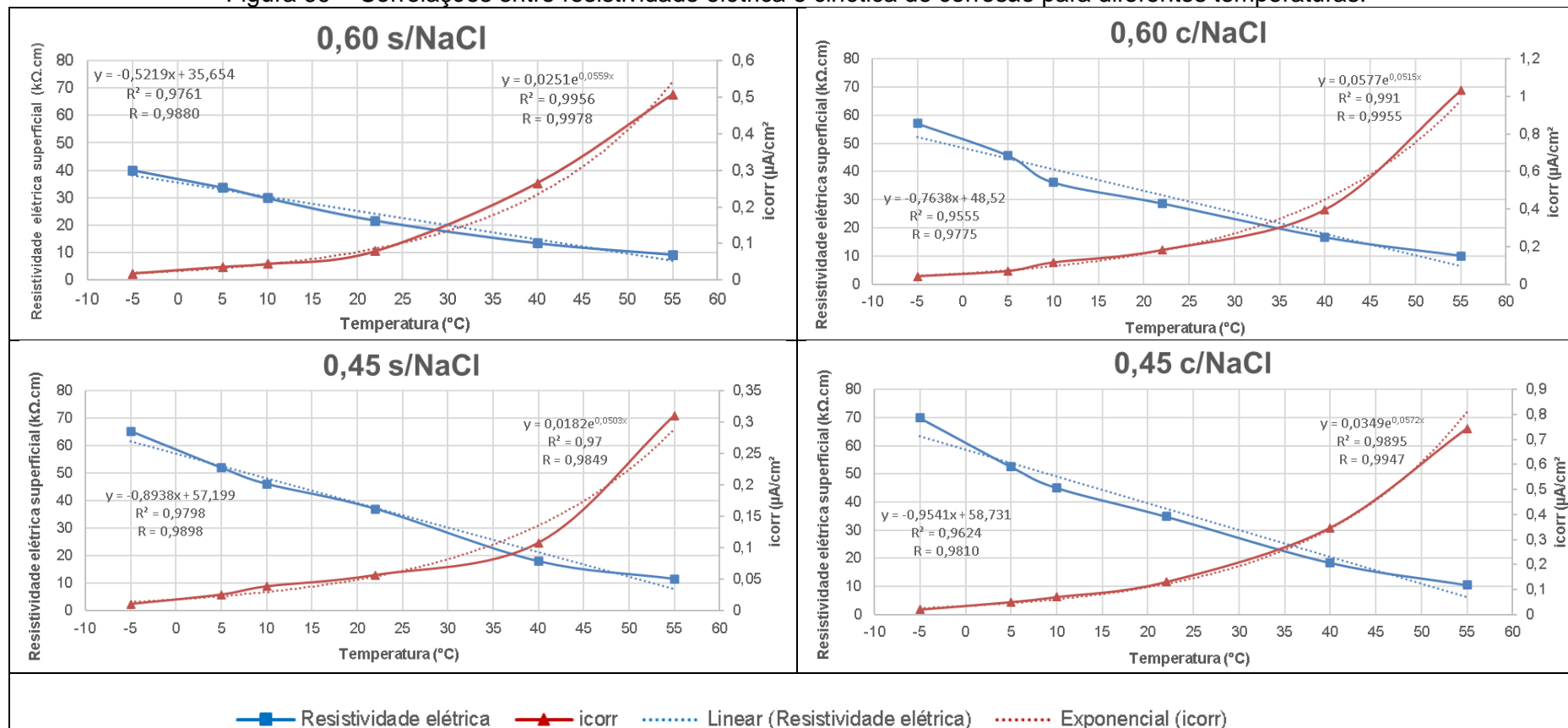
Já na temperatura mais baixa do ciclo (-5°C), os resultados podem ser relacionados, onde, o potencial de corrosão dos quatro traços atinge uma faixa que corresponde somente a 10% ou menos de chance de corrosão, com valores bem próximos dos quatro traços analisados, os valores da velocidade de corrosão

apresentam-se na faixa considerada como nível de corrosão desprezível, mesmo para os traços contaminados.

Entre a faixa de temperatura de 5°C a 22°C, observa-se para os resultados de ambos os ensaios, uma menor amplitude de variação de valores que as demais temperaturas analisadas.

Foram elaborados gráficos de tendência para análise dos resultados obtidos pelos ensaios de resistividade elétrica superficial e velocidade de corrosão para cada traço analisado no estudo em cada temperatura do ciclo. E gerada equações de regressão, assim como seus respectivos coeficientes de determinação e correlação, conforme apresentadas na Figura 69.

Figura 69 – Correlações entre resistividade elétrica e cinética de corrosão para diferentes temperaturas.



Para as equações obtidas, nota-se que para os valores de velocidade de corrosão a curva que melhor se aplica para todos os traços é a exponencial, já para a resistividade elétrica a linear.

Observa-se que os coeficientes de determinação e correlação obtidos pelas equações de regressão para os quatro traços, tanto para a resistividade elétrica quanto para a velocidade de corrosão, se apresentaram elevados, bem próximos de 1 entre (0,95 e 0,99). Isso significa, de acordo com a interpretação proposta por Shimakura (2002), que os modelos obtidos, apresentam uma correlação muito forte entre as variáveis confrontadas para a estimativa de valores não contemplados neste estudo experimental. Portanto, foi possível obter para os concretos analisados os seguintes modelos numéricos apresentados na Tabela 51.

Tabela 51 – Modelos numéricos para determinação de resistividade elétrica superficial do concreto e velocidade de corrosão de armaduras em função da temperatura.

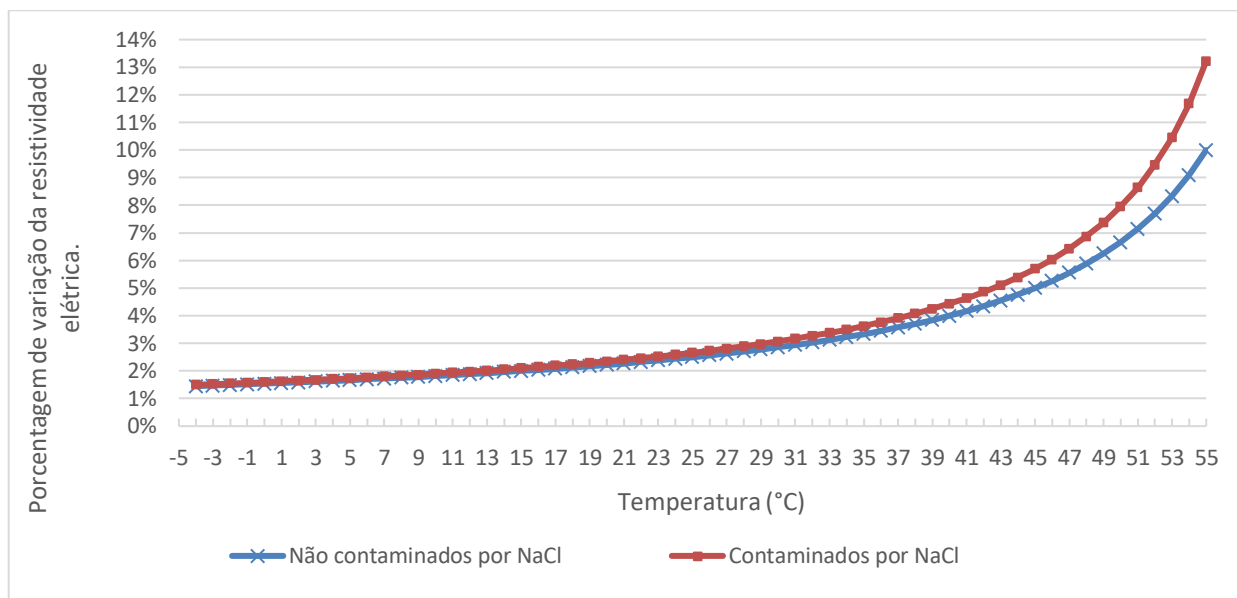
	a/c = 0,60	a/c = 0,45
Sem Cl ⁻	$\rho_s = -0,5219 \times T + 35,654$ $i_{corr} = 0,0251 e^{0,0559 T}$	$\rho_s = -0,8938 \times T + 57,199$ $i_{corr} = 0,0182 e^{0,0503 T}$
Com Cl ⁻	$\rho_s = -0,7638 \times T + 48,52$ $i_{corr} = 0,0577 e^{0,0515 T}$	$\rho_s = -0,9541 \times T + 58,731$ $i_{corr} = 0,0349 e^{0,0572 T}$

ρ_s = Resistividade elétrica superficial (k Ω .cm); i_{corr} = Velocidade de corrosão (μ A/cm²);
T = Temperatura ($^{\circ}$ C).

As equações apresentadas indicam uma estimativa da resistividade elétrica e taxa de corrosão de uma estrutura de concreto armado em função da temperatura em que ela se encontra. Os modelos consideram estruturas de concreto armado com diferentes relações de a/c (0,60 e 0,45) e níveis de contaminação por cloretos.

A partir da equação linear, obtida através da linha de tendência dos resultados, foi possível estimar os valores de resistividade elétrica superficial para cada temperatura. Assim, gerou-se um gráfico (Figura 70) com os valores da variação em porcentagem da resistividade elétrica superficial para a mudança de um grau dentro da faixa de temperaturas estudada.

Figura 70 – Variação percentual da resistividade elétrica em relação a mudança de temperatura.



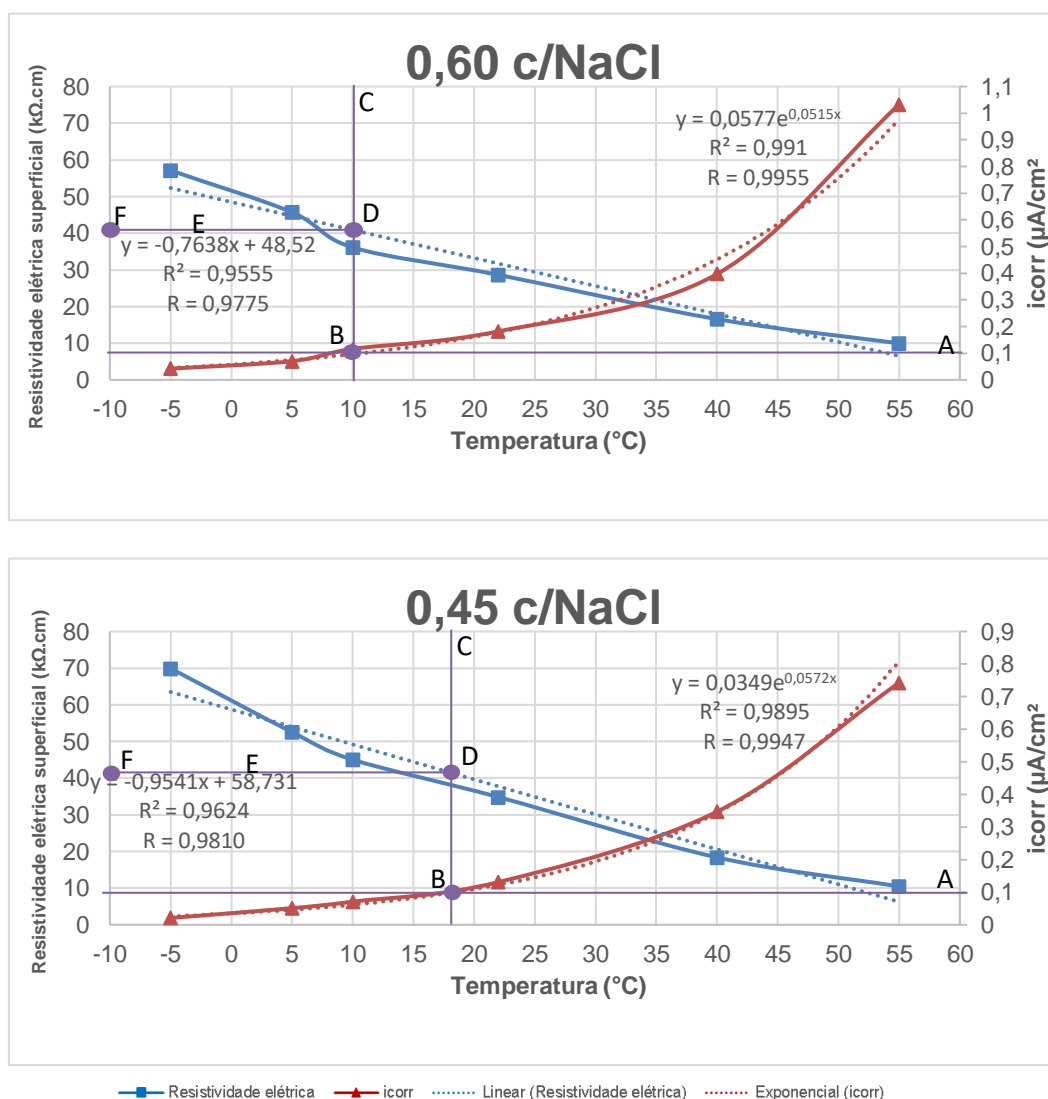
O percentual de variação dos valores de resistividade elétrica superficial para os concretos contaminados foi de 1,5 a 13,0% e para os não contaminados foi de 1,40 a 10,0%. Para as temperaturas na faixa entre -5 e 10°C, obteve-se uma diferença média em torno de 0,4% tanto para os não contaminados quanto para os contaminados. Por outro lado, nas temperaturas de 10 a 55°C, a diferença média foi de 6,7% para os não contaminados e 10,0% para os contaminados. Desta forma, verifica-se que as variações das médias dos resultados da resistividade elétrica superficial possuem uma taxa de variação superior em temperaturas mais elevadas, comparativamente às temperaturas mais baixas.

Bertolini e Polder (1997), apresentam uma variação média entre 3,0%, para concretos saturados e 5,0% para concretos secos, de aumento na resistividade elétrica para cada grau Celsius (°C) a partir de um estudo que analisou concretos contaminados por cloretos e carbonatados na faixa de temperatura que vai de 20°C a 40°C. Os valores médios encontrados pela pesquisa experimental se assemelham a estes valores, em resultados de resistividade elétrica superficial na faixa de temperatura 25 a 40°C, considerando que o presente estudo avaliou uma faixa de temperatura maior e utilizou concretos contaminados por cloretos, e não carbonatados, obteve-se variações diferentes fora da faixa mencionada.

Com o auxílio da equação exponencial gerada a partir dos gráficos da Figura 69, foi possível estimar os valores de velocidade de corrosão para todas as temperaturas da faixa analisada pelo presente trabalho. Desta forma, foi possível estabelecer um percentual de crescimento da velocidade de corrosão correspondente a 5% para cada 1°C aumentado.

Por meio das equações de regressão linear e exponencial, obtidas pela linha de tendência dos valores de resistividade elétrica superficial e velocidade de corrosão, respectivamente, é possível identificar os valores mínimos de resistividade elétrica superficial que mantém a armadura, para os dois traços contaminados, em um nível desprezível de corrosão. Para tanto, foram inseridas a linha A, o ponto B, a linha C, o ponto D, a linha E e o ponto F, nos gráficos da Figura 69, originando o gráfico da Figura 71.

Figura 71 – Correlação resistividade elétrica para valor velocidade de corrosão igual a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.



O ponto F representa o valor da resistividade elétrica superficial mínima que mantém a armadura em um estado de corrosão considerado desprezível para estes traços. Os valores encontrados de resistividade elétrica através do gráfico estão bem próximos dos 40kΩ.cm. Para identificação exata dos valores, foram utilizadas as equações de regressão linear e exponencial, oriundas das linhas de tendencia, os resultados são apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 – Resistividade elétrica superficial mínima para velocidade de corrosão igual a 0,1μA/cm² em concretos contaminados com cloretos.

Relação a/c	Equação linear e exponencial	Velocidade de Corrosão	Resistividade elétrica superficial mínima
0,60	$\rho_s = -0,7638 \times T + 48,52$ $i_{corr} = 0,0577 e^{0,0515 T}$	0,1μA/cm ²	40,12kΩ.cm
0,45	$\rho_s = -0,9541 \times T + 58,731$ $i_{corr} = 0,0349 e^{0,0572 T}$	0,1μA/cm ²	40,60kΩ.cm

ρ_s = Resistividade elétrica superficial (kΩ.cm); i_{corr} = Velocidade de corrosão (μA/cm²);
T= Temperatura (°C).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou avaliar a influência da temperatura na resistividade elétrica e na cinética de corrosão em concretos armados sujeitos a cloretos. Para isso, foi realizada a análise das propriedades físicas e mecânicas de concretos com diferentes relações água/cimento (a/c), com e sem contaminação por cloretos (Cl^-). Após o início do processo corrosivo, foi analisada a influência da variação da temperatura nas medidas de resistividade elétrica superficial, potencial de corrosão e polarização linear. A partir dos resultados experimentais, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Para a caracterização física e mecânica, os concretos, tanto contaminados com cloretos ou não, que possuem menor relação a/c apresentaram maior resistência à compressão, menor absorção de água, menor índice de vazios e maior resistividade elétrica superficial e volumétrica em comparação aos concretos com maior relação a/c . Os módulos de elasticidade obtidos pela técnica de frequência ressonante foram semelhantes para os concretos de relação a/c 0,45 e 0,60.
- Em todos os traços analisados, os resultados de resistividade elétrica variaram de maneira inversamente proporcional à variação de temperatura. Os valores de resistividade elétrica nas amostras com relação a/c 0,60 contaminadas com Cl^- apresentaram resultados superiores aos não contaminados. Isso pode ser atribuído à formação do sal de Friedel, que acarretou em uma densificação da microestrutura do concreto pelo preenchimento de microporos. Os traços analisados sofreram uma mudança de faixa analítica à medida que a temperatura se alterava, sendo constatado a tendência de apresentar um maior risco de corrosão nas temperaturas mais elevadas (40°C e 55°C) e um baixo risco nas temperaturas menos elevadas (5°C e -5°C). Os patamares dos valores entre os traços se mostraram mais significativo nas temperaturas mais baixas, sobretudo na

temperatura negativa. O percentual de variação dos valores de resistividade elétrica superficial para os concretos contaminados foi de 1,5 a 13,0% e para os não contaminados foi de 1,4 a 10,0%;

- Os valores de potencial de corrosão foram diretamente afetados pela variação da temperatura, principalmente nos concretos contaminados por cloretos. Na temperatura de 22°C, as amostras contaminadas apresentaram uma probabilidade de corrosão de 90%, enquanto que, em temperaturas negativas (-5°C), a probabilidade de corrosão foi de 10%. Já os concretos não contaminados resultaram em baixa probabilidade de corrosão para medições abaixo da temperatura de 22°C. Até a temperatura de 55°C, nenhuma das amostras não contaminadas apresentaram probabilidade acima de 90%. Nas baixas temperaturas o potencial de corrosão é levado a registrar baixa probabilidade de corrosão mesmo estando as armaduras despassivadas. A altas temperaturas o potencial de corrosão indica incerteza de corrosão mesmo estando as armaduras passivadas;

- A velocidade de corrosão sofreu alterações significativas com a variação da temperatura para todos os concretos. Foi percebido uma maior atividade corrosiva em temperaturas superiores a 10°C para os concretos contaminados e maior relação a/c. Além da presença de Cl⁻ e maior porosidade, quanto maior a temperatura analisada, maior a taxa de corrosão medida na estrutura de concreto. As cinéticas de corrosão dos quatro traços analisados (independentemente da relação a/c e nível de contaminação) foram consideradas estatisticamente equivalentes em temperaturas negativas (-5°C). Em baixas temperaturas, a velocidade de corrosão indica nível de corrosão desprezível mesmo estando as armaduras despassivadas. Em elevadas temperaturas, a velocidade de corrosão indica nível moderado de corrosão mesmo estando as armaduras passivadas. Foi estimado um percentual de crescimento da velocidade de corrosão correspondente a 5,0% para cada 1°C aumentado

- Foi possível obter modelos numéricos para a estimativa de valores para a resistividade elétrica superficial (do tipo linear) e para a velocidade de corrosão (do tipo exponencial) em função da variação da temperatura. Os modelos apresentaram um elevado coeficiente de determinação e correlação (entre 0,95 e 0,99), expressando assim uma forte correlação entre as variáveis confrontadas.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.

A seguir são apresentadas algumas sugestões para a continuidade do trabalho, buscando ampliar o conhecimento da influência da temperatura no processo corrosivo.

- Avaliação da corrosão por meio de outros métodos de análise, como por exemplo, técnicas de impedância e ruído eletroquímico;
- Análise da influência da temperatura no processo corrosivo desencadeado pela ação da carbonatação;
- Análise da influência da temperatura no processo corrosivo considerando outros tipos e composições de concretos, por exemplo: diferentes tipos de cimento e relações a/c, presença de aditivos e adições minerais, variação do procedimento de cura, incorporação de fibras e agregados alternativos, entre outros;
- Obtenção de modelos numéricos obtidos a partir da influência conjunta da variação de temperatura e umidade no processo corrosivo de diferentes tipos de concreto.

7. REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. C. **Os efeitos da variação da temperatura nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto.** Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, Universidade federal de Minas Gerais. 92 p. 2018.

AGUILAR, M. T. P.; ALMEIDA, S. M.; BEZERRA, A. C. S.; CORREA, E. C. S.; CETLIN, P. R. Ensaio de frequência ressonante forçada para a determinação do módulo de elasticidade. Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Infraestrutura e Desenvolvimento. In: **Anais...** Rio de Janeiro- RJ.14 p. 2012.

AKHTAR, S.; DANIYAL, MD. Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation.** v 5, n. 1, 20 p 2019.

ALHOZAIMY, A.; HUSSAIN, R.; AL-NEGHEIMISH, A.; AL-ZAID, R.; SINGH, D. Effect of simulated concrete pore solution chemistry, chloride ions, and temperature on passive layer formed on steel reinforcement. **ACI Materials Journal.** American Concrete Institute. v. 111, n. 4, p. 411-421, ago. 2014.

ALMEIDA, F. C. R., **Avaliação do potencial de corrosão de armaduras em concretos com substituição parcial do agregado miúdo pela areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar – ACBC.** São Carlos, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. 206 p. 2013.

ALONSO, C.; ANDRADE, C. Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. **Construction and Building Materials,** Vol. 10, n 5, pp 315-328, 1996.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **T 358 – 15.** Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Washington, 2015.

AL-KHAJA, A. W. Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes. **Construction and Buildings Materials,** v. 11, n. 1, 1997, p. 9-13.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-19.** Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI PRC-222-19.** Guide to Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. Farmington Hills, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 876.** Standard test method for half cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete. Philadelphia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1-03**. Practice for Preparing, Cleaning and evaluating corrosion test specimens. Philadelphia, 2017.

ANDRADE, C. AND GÓNZALEZ, J.A., Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements- *Werkstoffe und Korrosion*. 29, 515 .1978.

ANDRADE, C. FELIU, S. **Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras**. Madrid: CSIC/IETcc, 1988. 122 p.

ANDRADE, C.; CARRUYO, A. R.; DIAS, J.; HELENE, P. R. L.; RINCON, I. T. DURAR (Red Temática XV.B – Durabilidad de la armadura – del programa iberoamericano de ciência y tecnologia para el desarrollo). **Manual de inspección, evaluación y diagnostico de corrosión em estruturas de hormigón armado**. Rio de Janeiro: CYTED, 1997. 208p.

ANDRADE, C. Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modelling. **Materials and Structures**. V. 52, n. 2, p.1-26, 2019.

ANGST, U.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete - A review. **Cement and Concrete Research** 39, p. 1122-1138. 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655 Versão corrigida 2015**. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação. Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 Versão corrigida 3: 2019**. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778 Versão corrigida 2: 2009**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9204**. Concreto endurecidos – Determinação de resistividade elétrica-volumétrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone fertilizantes – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for durability evaluation: A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, 31 p. v. 2017 Hindawi. 2017.

AZZI, S.S; **Influência da pozolanicidade e do efeito filer na resistividade elétrica volumétrica e superficial do concreto**. Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 122 p. 2020.

BAKKER, R.F.M. About the case of resistance of blastfurnace cement concrete to the alkali silica reaction. In: International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 5th, Cape Town, South Africa, **Proceedings...**,1981.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; REDAELLI, E.; POLDER, R. **Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair**. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 434 p. 2014.

BERTOLINI, L.; POLDER, R. Concrete resistivity and reinforcement corrosion rate as a function of temperature and humidity of the environment. **TNO report, 97-BT-R0574**. 85 p. 1997.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 206:2013 + A1: 2016** Concrete – Specification, performance, production and conformity. 2016.

CARVALHO, L. G. **Resistência à corrosão dos aços CA 24 e CA 50 frente à ação dos cloretos**. Goiânia, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, 158 p. 2014.

CHAUHAN, A.; SHARMA, U. K.; Influence of temperature and relativity humidity variations on non-uniform corrosion of reinforced concrete. **Structures**. v. 19, p 296-308, 2019.

COSTA, D.F.; LIMA, R.C. G.; PERES, V. H. Métodos de prevenção da corrosão nas armaduras das estruturas de concreto armado. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 5 p. **ANAIS...**, 2021

COSTA, J. M.; AZZI, S. S. Comparação da resistividade elétrica superficial e volumétrica. **Revista Construindo**. Belo Horizonte, v. 8, 1^o Ed., p. 36-46, Jan - Jun, 2017.

DINIZ, H. A. A. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação.** Natal, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

DOUSTI, A.; RASHETNIA, R.; AHMADI, B.; SHEKARCHI, M. Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 49, p. 393-399, dez. 2013

DUNN, R. C.; ROSS, R. A., DAVIS, G. D., Corrosion Monitoring of Steel Reinforced Concrete Structures Using Embedded Instrumentation. In: NACE International, Conference e Expo Corrosion. **Proceedings...** n° 10173. 10 p. 2010.

FELIU, S. Principios de corrosión electroquímica y tipos de ataque. In: FERNÁNDEZ, J. A. G. (Ed.). **Teoría y Práctica de la Lucha contra la Corrosión.** Madrid: CSIC, p. 10 – 44, 1984.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. Corrosión de armadura de estructuras de hormigón. **Boletín Técnico 06.** ALCONPAT International. México. 2013. 32p.

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para a proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas - Contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado.** São Paulo: USP, 1994, 437 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

FIGUEIREDO, E. J. P. Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** Vol. 2. Cap. 27. São Paulo: IBRACON, p. 829-855, 2005.

FREITAS, L. A.; REGGIANI, H. B.; Análise dos impactos da agressividade marinha da enseada de Vitória em estruturas de concreto. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia-CONTECC. **Anais...** Palmas/TO. 2019.

GEARY, A. L.; STERN, M. Electrochemical Polarization I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves. **Journal of The Electrochemical Society.** 104 56. Philadelphia, PA. 1957.

GJØRV, O. E. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** São Paulo: Oficina de textos, 2015. p.238.

GOÑI, S.; MORAGUES, A.; ANDRADE, C. Influencia de la conductividad y fuerza iónica de soluciones sintéticas que simulan la fase acuosa del hormigón en el fenómeno de la corrosión de armaduras. **Materiales de Construcción**, v. 39, n. 215, p. 19-28, 1989.

GROCHOSKI, M.; HELENE, P. Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras. **Boletim Técnico**, Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. 21 p., 2008.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 p. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), 1993.

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

ISMAIL, M.; OHTSU, M. Corrosion rate of ordinary and high-performance concrete subjected to chloride attack by AC impedance spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v.20 n. 7, p 458-469. 2005.

LACERDA, E.; MAGALHÃES, A. G.; BERNARDES, E.; NUNES, E.; VASCONCELOS, W. Acompanhamento do avanço da frente de carbonatação em compósito cimentício com sua estrutura de poros analisada por micrografia computadorizada de raios X. **Revista IBRACON**, Vol.10. n. 3. 653 – 668p. 2017.

LAGE, E. B. **Comparação dos métodos de ensaio não destrutivos para qualidade do concreto: Resistividade elétrica superficial e volumétrica em corpo de prova**. Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 100. 2018.

LANGFORD, P.; BROOMFIELD, J. Monitoring the corrosion of reinforcing steel. **Construction Repair**, v.1, n.2, p. 32-36, 1987.

LENCIONI, J. W. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios**. São José dos Campos, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 262 p. 2011.

LI, K.; ZHANG, D.; LI, Q.; FAN, Z. Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond. **Cement and Concrete Research**. v. 115. p 545-558. 2018.

LUN, P, Y.; LU, Z. H; ZHANG, X. G.; ZHANG, Q.; ZHAO, R. Experimental study and suggested mathematical model for chloride-induced reinforcement corrosion rate. **Structures**. v.34. p 2014-2029. 2021.

MA, Y.; GUO, Z.; WANG, L.; ZHANG, J.; Experimental investigation of corrosion effect on bond behavior between reinforcing bar and concrete. **Construction and Building Materials**. v. 152. P 240-249. 2017.

MARTINS, C. H.; MARCANTONIO, G. P.; LENINE, A. Resistência simples à compressão e módulo de elasticidade do concreto produzido com substituição parcial de agregado miúdo por resíduos plásticos. **Mix Sustentável**. V.4 n.2 p.123-130. Florianópolis. 2018.

MEDEIROS, M.H.; ANDRADE, J.J.O.; HELENE, P.R.L. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. **Concreto, Ciência e Tecnologia**. IBRACON. 2011.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura Propriedades e Materiais**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 674 p. 2014.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto – Fundamentos, diagnósticos e prevenção**. Ed. IFPB. João Pessoa. 2017.130p.

MELO, G. F.; LAURENTINO, J. V. A.; SANTOS, L. O. Estudo comparativo das eficiências de agentes inibidores comerciais de corrosão em estruturas marítima de concreto armado. **Engineering Sciences**, v.9. n.2. p.66-80, 2021.

MICHEL, A.; SØRENSEN, H.E.; GEIKER, M.R.; 5 years of *in situ* reinforcement corrosion monitoring in the splash and submerged zone of a cracked concrete element. **Construction and Building Materials**. v. 285. 12 p. 2021.

MONTEIRO, A. J.; DITZEL, L. F.; MEDEIROS, R. Métodos de ensaio de corrosão acelerada das armaduras. **Revista Técnico Científica do CREA – PR**. Set/ 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. São Paulo: PINI, 2015. 912 p.

ØSTVIK, J. M. **Thermal Aspects of corrosion of steel in concrete**, PhD Thesis. Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology – NTNU, Trondheim. 2005.

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

PROCEQ S.A. **Manual Resipod**. 2017. Disponível em: <https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf>. Acesso em: 17 ago 2021.

POLDER, R. B.; ANDRADE, C.; ELSENER, B.; VENNESLAND, Ø.; GULIKERS, J.; WEIDERT, R.; RAUPACH, M. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC – 154 technical recommendation. **Materials and Structures** v. 30, p. 603-611. 2000.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Brussels: CEBELCOR, 1974. 644 p.

QU, F.; LI, W.; DONG, W.; TAM, V. W. Y.; YU, T. Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review. **Journal of Building Engineering**. Australia. 2020.

RACZKIEWICZ, W.; WÓJCICKI, A. Temperature impact on the assessment of reinforcement corrosion risk in concrete by galvanostatic pulse method. **MPDI, Applied Sciences**. Suíça. 2020.

RAPHAEL, M.; SHALON, R. A study of the influence of climate on corrosion and reinforced concrete. In: RILEM Symposium on Concrete and Reinforced Concrete in Hot Climates, **Proceedings**. 1971. p. 77-96.

RESENDE, A.; TAVARES, S.; MAINIER, F.; PINHEIRO, R.; PONZIO, E. Influência da temperatura na taxa de corrosão do aço carbono ASTM A36 em meio contendo CO₂. In: 34ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, **ANAIS...** 2012.

ROCHA, F. C. **Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: influência da relação água/cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobrimento e do teor de umidade do concreto**. Curitiba. 2012. 102 p.

SCHRÖDER, F.; SMOLCZYK, H. G. Carbonation and protection against steel corrosion. In.: International Symposium on the Chemistry of Cement, 5th., 1968, Tokyo. **Proceedings ...** Tokyo:1969. 4v., v.4, p.188-198. (Part IV).

SHIMAKURA, S. E. **Interpretação do coeficiente de correlação**. Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html> acesso em 07 mar. 2023.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese de doutorado, Interunidades Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

STERN, M. GEARY, A. L. **Electrochemical polarization: A Theoretical analysis of the shape of polarization curves**. The Electrochemical Society, 1957.

TORRES, A. S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise**. Porto Alegre. 2011. 170p.

TOUIL, B; GHOMARI, F; BEZZAR, A; KHELIDJ, A; BONNET, S. Effect of temperature on chloride diffusion in saturated concrete. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 5, p. 713-721, out. 2017.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982. 468 p.

VENNESLAND, O., RAUPACH, M., ANDRADE, C. Recommendation of RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete – measurements with embedded probes. **Materials and Structures**. v.40 s/n. p.745-758, 2007.

VALDÉS, A. C.; MEDEIROS, M. H. F.; MACIOSKI, G. Sensor de monitoramento de estruturas de concreto armado: Testes em corpos de prova de concreto armado. **Revista ALCONPAT**,11 (3). p.64-87, 2021.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. EDUSP, São Paulo, 2002.

WOSNIACK, L. M.; REAL, L. V.; SILVA, M. D.; MACIOSKI, G.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F. de. Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de

migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 321-340, jul./set.ANTAC. 2021.

YOUSUF, F.; WEI, X.; TAO, J. Evaluation of the influence of a superplasticizer on the hydration of varying composition cements by the electrical resistivity measurement method. **Construction and Building Materials**. P.25-34. 2017

YUE, Y.; WANG, J. J.; BASHEER, P.A.M.; BAI, Y. Raman spectroscopic investigation of Friedel's salt. **Cement and Concrete Composites**. p.306-314. 2018.

ZACCARDI, Y. V.; DI MAIO, A. A. Electrical resistivity measurement of unsaturated concrete samples. **Magazine of Concrete Research**, volume 66, issue 10, ICE. 2014.