



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

FRANCISCA JOYCE DOS SANTOS BANDEIRA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO SINÉRGICO DA CARBONATAÇÃO E DO ATAQUE DE
CLORETOS NO FENÔMENO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS DO
CONCRETO**

FORTALEZA

2024

FRANCISCA JOYCE DOS SANTOS BANDEIRA

AVALIAÇÃO DO EFEITO SINÉRGICO DA CARBONATAÇÃO E DO ATAQUE DE
CLORETOS NO FENÔMENO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B165a** **Bandeira, Francisca Joyce dos Santos.**
Avaliação do efeito sinérgico da carbonatação e do ataque de cloretos no fenômeno da corrosão das armaduras do concreto / Francisca Joyce dos Santos Bandeira. – 2024.
152 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. carbonatação. 2. ataque por cloretos. 3. ataque conjunto. 4. corrosão. I. Título.

CDD 624.1

FRANCISCA JOYCE DOS SANTOS BANDEIRA

AVALIAÇÃO DO EFEITO SINÉRGICO DA CARBONATAÇÃO E DO ATAQUE DE
CLORETOS NO FENÔMENO DA CORROSÃO DAS ARMADURAS DO CONCRETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

Aprovada em: 14 / 03 / 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Walney Silva Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Veras Ribeiro
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

À Deus.

À minha família, Jesse e Lilian.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sua infinita bondade e misericórdia.

Ao meu marido Jesse, que se fez presente durante todo o período de pesquisa, pelo seu amor, compreensão e companheirismo em todos os momentos.

À minha filha Lilian, que sempre esteve em meu coração e que estará em meus braços em breve, por renovar as minhas forças.

À minha mãe Francisca, pelo exemplo de força e dedicação.

Ao Professor Dr. Eduardo Cabral, pela excelente orientação e apoio durante o período de mestrado. Pelo exemplo de profissional na engenharia e na educação.

Ao Professor Dr. Walney Silva Araújo, por todas as contribuições feitas e pela disponibilização do LPC para a realização da pesquisa, sua colaboração foi essencial.

Aos pesquisadores do LPC, em especial Roberta e Caio, por todas as contribuições realizadas.

Aos técnicos do LMCC, pelo suporte e disponibilidade na realização dos experimentos.

RESUMO

Uma das principais causas de degradação das estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras, ocasionada pela despassivação por carbonatação e por ataque de cloretos. Segundo a *National Association of Corrosion Engineers*, o custo global da corrosão em 2013 foi equivalente a 3,4% do PIB mundial. Sabe-se que o fenômeno da corrosão ocorre devido a vários fatores que agem simultaneamente e não se deve negligenciar as interações que ocorrem entre estes. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar o efeito sinérgico da carbonatação e do ataque de cloretos no fenômeno de corrosão das armaduras, quando se varia o tipo de cimento no concreto. Para isso, fabricaram-se corpos de prova (CPs) de concreto armado, com três tipos diferentes de Cimento Portland, sendo estes CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI. Tais CPs foram submetidos a ciclos de degradação acelerada, por ataque de cloretos, carbonatação e pela ação conjunta dos dois agentes despassivantes. A deterioração ocorreu através de ciclos de imersão e secagem, onde os CPs sujeitos ao ataque de cloretos foram expostos a solução agressiva de cloreto de sódio e secagem em ambiente de laboratório, e os CPs sujeitos a carbonatação foram imersos em água e destinados a uma câmara continuamente alimentada com CO₂. A cada semi-ciclo foi realizada a medição das variáveis eletroquímicas, potencial de corrosão (E_{corr}), intensidade de corrosão (I_{corr}) e resistência ôhmica (R_{ohm}) nos CPs de concreto armado. A técnica eletroquímica de Resistência de Polarização Linear (RPL) foi utilizada para obtenção da taxa de corrosão (i_{corr}). A profundidade da carbonatação e o teor de cloretos foram determinados periodicamente em CPs de concreto simples expostos às mesmas condições ambientais. Após o período de deterioração as barras foram limpas e a perda de massa gravimétrica foi determinada. Verificou-se que o efeito sinérgico entre carbonatação e cloretos promoveu um menor tempo de despassivação da armadura frente as demais condições de degradação, bem como maiores taxas de corrosão ao longo do tempo, comparativamente ao ataque único. Após o 12º ciclo saturado, para os CPs com CPIII-32-RS, as armaduras expostas ao ataque conjunto apresentaram uma velocidade de corrosão cerca de 43,71 vezes maior que a taxa de corrosão quando submetido ao ataque de cloretos, e 5,49 vezes maior que a taxa para as barras submetidas a carbonatação. Além disso, os CPs sujeitos a ação conjunta de carbonatação e cloretos apresentaram maior perda de massa gravimétrica, confirmando os resultados apresentados pela medição das variáveis eletroquímicas, de que a sinergia entre os agentes de degradação foi mais nociva do que o ataque individual.

Palavras-chave: carbonatação; ataque por cloretos; ataque conjunto; corrosão.

ABSTRACT

One of the main causes of degradation of reinforced concrete structures is the corrosion of reinforcement, caused by depassivation by carbonation and chloride attack. According to the National Association of Corrosion Engineers, the global cost of corrosion in 2013 was equivalent to 3,4 % of global PIB. It is known that the phenomenon of corrosion occurs due to several factors that act simultaneously and the interactions that occur between these factors should not be neglected. Therefore, the aim of this work is to analyze the synergistic effect of carbonation and chloride attack on the phenomenon of reinforcement corrosion, when the type of cement in the concrete varies. Thus, reinforced concrete specimens (CPs) were manufactured, with three different types of Portland Cement, these being CPIII-32-RS, CPIV-32-RS and CPV-ARI. Such CPs were subjected to cycles of accelerated degradation, by chloride attack, carbonation and the joint action of the two depassivating agents. Deterioration occurred through immersion and drying cycles, where CPs subjected to chloride attack were exposed to an aggressive sodium chloride solution and dried in a laboratory environment, and CPs subjected to carbonation were immersed in water and sent to a chamber continuously fed with CO₂. At each half-cycle, electrochemical variables, corrosion potential (E_{corr}), corrosion intensity (I_{corr}) and ohmic resistance (R_{ohm}) were measured in the reinforced concrete CPs. The electrochemical Linear Polarization Resistance (RPL) technique was used to obtain the corrosion rate (i_{corr}). The depth of carbonation and the chloride content were periodically determined in plain concrete CPs exposed to the same environmental conditions. After the deterioration period, the bars were cleaned and the gravimetric mass loss was determined. It was found that the synergistic effect between carbonation and chlorides promoted a shorter depassivation time of the reinforcement compared to other degradation conditions, as well as higher corrosion rates over time, compared to the single attack. After the 12th saturated cycle, for the CPIII-32-RS CPs, the reinforcement exposed to joint attack showed a corrosion rate approximately 43,71 times greater than the corrosion rate when subjected to chloride attack, and 5,49 times higher than the rate for bars subjected to carbonation. Furthermore, the CPs subjected to the joint action of carbonation and chlorides showed greater loss of gravimetric mass, confirming the results presented by the measurement of electrochemical variables, that the synergy between the degradation agents was more harmful than the individual attack.

Keywords: carbonation; chloride attack; joint attack; corrosion.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão..... | 23 |
| Figura 2 – Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal..... | 26 |
| Figura 3 – Arranjo experimental para a determinação do potencial de corrosão..... | 40 |
| Figura 4 – Esquema da medição da resistividade pelo método de Wenner..... | 43 |
| Figura 5 – Diagrama de Evans..... | 47 |
| Figura 6 – Curvas de polarização anódica e catódica..... | 48 |
| Figura 7 – Curva granulométrica do agregado miúdo..... | 56 |
| Figura 8 – Curva granulométrica do agregado graúdo..... | 56 |
| Figura 9 – Fluxograma do programa experimental da pesquisa..... | 60 |
| Figura 10 – Determinação da resistência à compressão dos CPs..... | 61 |
| Figura 11 – Ensaio para determinação da resistência à penetração de cloretos..... | 62 |
| Figura 12 – Procedimento para determinação da absorção de água por capilaridade..... | 62 |
| Figura 13 – Procedimento para determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica..... | 62 |
| Figura 14 – CPs utilizados na pesquisa..... | 63 |
| Figura 15 – Disposição dos CPs na câmara de carbonatação..... | 65 |
| Figura 16 – Tinta anticorrosiva utilizada para delimitação da área sujeita à corrosão..... | 67 |
| Figura 17 – Corpo de prova para o ensaio de corrosão acelerada..... | 68 |
| Figura 18 – Posicionamento das barras no CP..... | 68 |
| Figura 19 – Formas para moldagem dos CPs..... | 69 |
| Figura 20 – Ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos..... | 70 |
| Figura 21 – Ciclo de deterioração por ataque de cloretos..... | 71 |
| Figura 22 – Termo-higrômetro utilizado para aferição da T e UR..... | 72 |
| Figura 23 – Ciclo de deterioração por carbonatação..... | 73 |
| Figura 24 – Ciclo de deterioração por ataque conjunto..... | 74 |
| Figura 25 – Potenciostato AUTOLAB PGSTAT 302N..... | 74 |
| Figura 26 – Célula eletroquímica..... | 75 |
| Figura 27 – Pré-umedecimento da amostra..... | 76 |
| Figura 28 – Extração de sais solúveis..... | 78 |
| Figura 29 – Configuração para determinação dos cloretos..... | 79 |
| Figura 30 – Procedimento para determinação da profundidade de carbonatação..... | 80 |
| Figura 31 – Corpo de prova analisado para determinação da profundidade de carbonatação..... | 81 |
| Figura 32 – Corpo de prova analisado para determinação da profundidade de penetração de cloretos..... | 82 |
| Figura 33 – Resistência à compressão do concreto..... | 84 |
| Figura 34 – Absorção e índice de vazios médios dos concretos..... | 86 |
| Figura 35 – Resistência à penetração de cloretos de acordo com a ASTM C1202-19..... | 88 |
| Figura 36 – Evolução do E_{corr} para amostras produzidas com CPIII-32-RS..... | 90 |
| Figura 37 – Evolução do E_{corr} para amostras produzidas com CPIV-32-RS..... | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 38 – Evolução do E_{corr} para amostras produzidas com CPV-ARI..... | 91 |
| Figura 39 – Evolução do i_{corr} para amostras produzidas com CPIII-32-RS..... | 93 |
| Figura 40 – Evolução do i_{corr} para amostras produzidas com CPIV-32-RS..... | 94 |
| Figura 41 – Evolução do i_{corr} para amostras produzidas com CV-ARI..... | 94 |
| Figura 42 – Evolução do R_{ohm} para amostras produzidas com CPIII-32-RS..... | 97 |
| Figura 43 – Evolução do R_{ohm} para amostras produzidas com CPIV-32-RS..... | 97 |
| Figura 44 – Evolução do R_{ohm} para amostras produzidas com CPV-ARI..... | 98 |
| Figura 45 – Variação de massa (%) em relação a massa inicial das amostras produzidas com CPIII-32-RS..... | 100 |
| Figura 46 – Teor de umidade (%) das amostras produzidas com CPIII-32-RS após secagem..... | 101 |
| Figura 47 – Variação de massa (%) em relação a massa inicial das amostras produzidas com CPIV-32-RS..... | 101 |
| Figura 48 – Teor de umidade (%) das amostras produzidas com CPIV-32-RS após secagem..... | 101 |
| Figura 49 – Variação de massa (%) em relação a massa inicial das amostras produzidas com CPV-ARI..... | 102 |
| Figura 50 – Teor de umidade (%) das amostras produzidas com CPV-ARI após secagem..... | 102 |
| Figura 51 – Profundidade de penetração de cloretos para as amostras 3CL (a) e 5AC (b)..... | 107 |
| Figura 52 – Frente de carbonatação da amostra 4CO2 após o 5º, 9º e 12º ciclos de deterioração..... | 111 |
| Figura 53 – Comparação entre as médias das perdas de massa gravimétrica e eletroquímica..... | 113 |
| Figura 54 – Armaduras após o 12º ciclo de deterioração..... | 114 |
| Figura 55 – Configuração da deterioração das armaduras após o 12º ciclo de deterioração..... | 115 |
| Figura 56 – Área previamente pintada para limitação de superfície exposta à corrosão..... | 116 |
| Figura 57 – Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos ao ataque de cloretos..... | 117 |
| Figura 58 – Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos à carbonatação acelerada..... | 117 |
| Figura 59 – Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos ao ataque conjunto de carbonatação e cloretos..... | 118 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Características químicas dos cimentos | 54 |
| Tabela 2 - Características físicas e mecânicas dos cimentos..... | 55 |
| Tabela 3 - Quantidade e tipos de CPs de acordo com as condições de exposição e ensaios.... | 65 |
| Tabela 4 - Absorção, índice de vazios e massa específica para concretos produzidos com cada tipo de cimento | 85 |
| Tabela 5 – Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo..... | 87 |
| Tabela 6 – Penetrabilidade de íon cloreto com base na carga passante | 88 |
| Tabela 7 – Possíveis datas de despassivação a partir do E_{corr} | 91 |
| Tabela 8 - Possíveis datas de despassivação a partir do i_{corr} e valor de i_{corr} no 12º ciclo saturado | 94 |
| Tabela 9 – Valores iniciais e finais de R_{ohm} | 98 |
| Tabela 10 - Teor de cloretos livres nos concretos | 104 |
| Tabela 11 – Profundidade de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata após o 12º ciclo de deterioração..... | 107 |
| Tabela 12 – Profundidade de carbonatação e área carbonatada do concreto após o 5º, 9º e 12º ciclos de deterioração | 110 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 - Principais pesquisas sobre ataque sinérgico entre carbonatação e cloretos publicadas nos últimos anos | 36 |
| Quadro 2 - Probabilidade de ocorrência de corrosão da armadura em função do potencial, tendo como referência os diversos tipos de eletrodo | 41 |
| Quadro 3 - Critérios de avaliação da velocidade de corrosão | 50 |
| Quadro 4 - Relação entre expectativa de corrosão e i_{corr} | 50 |
| Quadro 5 - Principais pesquisas sobre ataque conjunto de carbonatação e cloretos utilizando medidas eletroquímicas publicadas nos últimos anos | 53 |
| Quadro 6 – Resumo dos resultados | 122 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CaCO ₃ | Carbonato de cálcio |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| Ca(OH) ₂ | Hidróxido de cálcio |
| CPs | Corpos de Prova |
| CPIII-RS | Cimento Portland de Alto-Forno Resistente a Sulfatos |
| CPIV-RS | Cimento Portland Pozolânico Resistente a Sulfatos |
| CPV-ARI | Cimento Portland de Alta Resistência Inicial |
| DMC | Diâmetro Máximo Característico |
| E _{corr} | Potencial de Corrosão |
| ECP | Eletrodo de Prata-cloreto de prata |
| ECS | Eletrodos de Calomelano Saturado |
| EPH | Eletrodo Padrão de Hidrogênio |
| ER | Eletrodo de Referência |
| ESC | Eletrodo de Cobre-sulfato de cobre |
| ET | Eletrodo de Trabalho |
| GEHO | Grupo Espanhol do Concreto |
| IBRACON | Instituto Brasileiro do Concreto |
| I _{corr} | Intensidade de corrosão |
| i _{corr} | Taxa ou velocidade de corrosão |
| MF | Módulo de Finura |
| NaCl | Cloreto de Sódio |
| R _{ohm} | Resistência ôhmica |
| R _p | Resistência de Polarização |
| VM | Variação de Massa |
| VU | Vida Útil |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Justificativa | 15 |
| 1.2 | Objetivos | 20 |
| 1.2.1 | <i>Objetivo geral</i> | 20 |
| 1.2.2 | <i>Objetivos específicos</i> | 20 |
| 1.3 | Estrutura da dissertação | 20 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 22 |
| 2.1 | Durabilidade e Vida Útil das estruturas de concreto | 22 |
| 2.2 | Mecanismos de transporte no concreto | 24 |
| 2.3 | Corrosão das armaduras do concreto | 25 |
| 2.3.1 | <i>Despassivação por Carbonatação</i> | 28 |
| 2.3.2 | <i>Despassivação por ação de cloretos</i> | 30 |
| 2.4 | Efeito sinérgico da carbonatação e do ataque de cloretos na corrosão | 32 |
| 2.5 | Métodos de avaliação de corrosão de armaduras inseridas no concreto | 39 |
| 2.5.1 | <i>Potencial de Corrosão</i> | 40 |
| 2.5.2 | <i>Resistividade Elétrica</i> | 42 |
| 2.5.3 | <i>Impedância Eletroquímica</i> | 44 |
| 2.5.4 | <i>Resistência de Polarização</i> | 45 |
| 2.6 | Pesquisas anteriores usando técnicas eletroquímicas e ataque de CO ₂ e Cl ⁻ às armaduras | 50 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODO DE PESQUISA | 54 |
| 3.1 | Materiais | 54 |
| 3.1.1 | <i>Cimento Portland</i> | 54 |
| 3.1.2 | <i>Agregados</i> | 55 |
| 3.1.3 | <i>Aditivo</i> | 57 |
| 3.1.4 | <i>Água</i> | 57 |
| 3.1.5 | <i>Armadura</i> | 57 |
| 3.2 | Método de Pesquisa | 57 |
| 3.2.1 | <i>Programa experimental</i> | 57 |
| 3.2.2 | <i>Dosagem do concreto</i> | 61 |
| 3.2.3 | <i>Tipos e quantidades dos corpos de prova utilizados</i> | 63 |
| 3.2.4 | <i>Moldagem dos CPs</i> | 66 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 3.2.5 | <i>Ensaios de deterioração acelerada</i> | 69 |
| 3.2.5.1 | <i>Ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos</i> | 70 |
| 3.2.5.2 | <i>Ensaio acelerado de corrosão induzida por carbonatação</i> | 71 |
| 3.2.5.3 | <i>Ensaio acelerado de corrosão pelo ataque sinérgico de carbonatação e cloretos</i> ... | 73 |
| 3.2.5.4 | <i>Medição das variáveis eletroquímicas</i> | 74 |
| 3.2.6 | <i>Ensaios complementares para compreensão do avanço dos agentes de deterioração</i> | 77 |
| 3.2.6.1 | <i>Determinação do teor de cloretos livres nas argamassas</i> | 77 |
| 3.2.6.2 | <i>Determinação da profundidade de carbonatação</i> | 79 |
| 3.2.6.3 | <i>Determinação da profundidade de penetração de cloretos</i> | 81 |
| 4 | APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 83 |
| 4.1 | Apresentação e análise dos resultados | 83 |
| 4.1.1 | <i>Ensaios de caracterização do concreto</i> | 83 |
| 4.1.1.1 | <i>Resistência à compressão</i> | 84 |
| 4.1.1.2 | <i>Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica</i> | 85 |
| 4.1.1.3 | <i>Absorção por capilaridade</i> | 87 |
| 4.1.1.4 | <i>Resistência à penetração de cloretos</i> | 87 |
| 4.1.2 | <i>Potencial de corrosão</i> | 89 |
| 4.1.3 | <i>Taxa de corrosão</i> | 93 |
| 4.1.4 | <i>Resistência ôhmica</i> | 96 |
| 4.1.5 | <i>Variação de massa e de umidade superficial</i> | 100 |
| 4.1.6 | <i>Ensaios complementares</i> | 104 |
| 4.1.6.1 | <i>Determinação do teor de cloretos no concreto no 5º e 12º ciclos</i> | 104 |
| 4.1.6.2 | <i>Avaliação da profundidade de penetração de cloretos</i> | 106 |
| 4.1.6.3 | <i>Avaliação da profundidade de carbonatação</i> | 109 |
| 4.1.7 | <i>Perda de massa gravimétrica e eletroquímica das armaduras</i> | 112 |
| 4.2 | Discussão dos resultados | 116 |
| 4.3 | Resumo dos resultados | 121 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 124 |
| 5.1 | Conclusão | 124 |
| 5.2 | Sugestões para trabalhos futuros | 126 |
| | REFERÊNCIAS | 127 |
| | APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA LIMPEZA DAS BARRAS DE AÇO CONFORME ASTM G-1/03 | 134 |

| | |
|--|-----|
| APÊNDICE B – TEMPERATURAS E UMIDADES MEDIDAS DURANTE O PERÍODO DE PRECONDICIONAMENTO | 135 |
| APÊNDICE C – EVOLUÇÃO DO E_{corr} (mV) MÉDIO MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO | 136 |
| APÊNDICE D – GRÁFICOS DE EVOLUÇÃO DO E_{corr} MÉDIO MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO | 137 |
| APÊNDICE E – EVOLUÇÃO DO i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) MÉDIO MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO | 138 |
| APÊNDICE F – GRÁFICOS DE EVOLUÇÃO DO i_{corr} MÉDIO MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO | 139 |
| APÊNDICE G – EVOLUÇÃO DA R_{ohm} (Ω) MÉDIA MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO | 140 |
| APÊNDICE H – GRÁFICOS DE EVOLUÇÃO DA R_{ohm} MÉDIA MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO | 141 |
| APÊNDICE I –EVOLUÇÃO DA VM E DA UR DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO | 142 |
| APÊNDICE J – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA VM E DA UR DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO | 143 |
| APÊNDICE K – PERDA DE MASSA GRAVIMÉTRICA DAS ARMADURAS | 145 |
| APÊNDICE L – PROFUNDIDADES DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS..... | 147 |
| APÊNDICE M – PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO..... | 149 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Efetivamente, as estruturas de concreto estão sujeitas a numerosas, e às vezes simultâneas, formas de deterioração (Kuosa *et al.*, 2014). A corrosão das armaduras é uma das principais causas da degradação do concreto, e ocorre devido à carbonatação ou entrada de cloretos. Numerosos estudos descrevem esses dois fenômenos separadamente, mas alguns afirmam uma possível vinculação entre eles (Saillio; Baroghel-Bouny; Barberon, 2014). Por exemplo, estruturas de concreto em ambiente marinho estão sujeitas a carbonatação e ao ingresso de cloretos de forma simultânea ou sucessiva (Wang *et al.*, 2017).

Tem-se ainda que algumas cidades, como Fortaleza, podem ser caracterizadas como de ambiente urbano, uma vez que há uma região altamente urbanizada, além de uma zona industrial, o que pode gerar uma alta emissão de agentes agressivos ao concreto, emitidos pelas usinas e veículos automotores como, por exemplo, o dióxido de carbono (CO₂), agente desencadeador da carbonatação em estruturas de concreto.

Adicionalmente, a cidade possui uma zona marinha devido à sua localização litorânea. Em estudos anteriores constatou-se a alta agressividade do meio ambiente na cidade de Fortaleza, quanto à névoa salina. No que diz respeito à concentração de cloretos, verificou-se que nos primeiros metros de distância do mar, na praia do Futuro, a agressividade é maior do que em outras cidades nacionais e internacionais (Campos, 2016). Ainda de acordo com Campos (2016), a posição geográfica da cidade de Fortaleza no globo terrestre favorece para que ela se apresente como uma das mais agressivas do mundo, em decorrência das correntes superficiais oceânicas e da salinidade superficial do oceano, o que confirma a agressividade ambiental da cidade, requerendo diretrizes construtivas voltadas para a durabilidade das construções.

Dentre os processos de deterioração das estruturas de concreto armado, que são responsáveis pela redução de sua Vida Útil (VU), a corrosão das armaduras é entendida como um dos mais severos e frequentes (De Weerd *et al.*, 2016; Muthulingam; Rao, 2015; Pintan *et al.*, 2015).

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto afeta a construção civil a nível global, devido ao volume de casos registrados, a ocorrência prematura e ao montante de recursos envolvidos. Em estudo realizado pelo Grupo Espanhol do Concreto (GEHO) em 1992, a deterioração de estruturas decorrente da corrosão de armaduras ocupou posição de destaque

com relação ao número de incidências e à prematuridade com que ocorrem (Meira, 2017). Dados apresentados por Ribeiro *et al.* (2014), indicam que nesse levantamento, realizado em 52 províncias espanholas, a corrosão de armaduras aparece como a terceira manifestação patológica de maior incidência nas estruturas de concreto. A corrosão foi a causa de 15% do total de manifestações patológicas encontradas em 844 casos, índice menor apenas que o de incidência de fissuras em 62%, e de deformações excessivas em 22%.

No âmbito nacional, embora as zonas costeiras sejam as mais preocupantes, a problemática da deterioração de estruturas devido à corrosão de armaduras, se estende por todo o território (Meira, 2017). Pesquisas realizadas nos últimos 40 anos indicam que o número de ocorrências permanece elevado até os dias atuais, demonstrando a necessidade de mudança no setor da construção civil.

Dal Molin (1988), analisou 275 casos no Rio Grande do Sul e observou que a corrosão de armaduras é a responsável por aproximadamente 12% das fissuras presentes nas edificações do Estado do Rio Grande do Sul, desconsiderando-se obras de grandes portes como pontes e barragens. No entanto, quando analisada segundo a gravidade e implicações da manifestação patológica na segurança estrutural, a corrosão das armaduras chega ao patamar de 40%.

Aranha (1994), realizou sua pesquisa na região Norte, mais especificamente na região Amazônica analisando 348 casos entre no 1976 a 1993, e na grande maioria dos grupos de edificações, observou-se que a corrosão das armaduras foi o dano de maior predominância. Em obras convencionais, como residenciais, comerciais e institucionais, o índice de corrosão correspondeu a 42,68% do total das manifestações patológicas analisadas. Nas obras industriais, o percentual de corrosão das armaduras correspondeu a 36,64%.

No estado do Pernambuco, em pesquisa realizada por Andrade (1997), entre as manifestações patológicas do concreto no estado endurecido, 64% das manifestações identificadas foram de corrosão de armaduras, sendo o maior percentual encontrado. Silva e Cabral (2014), analisaram 30 obras no estado do Ceará, distribuídas entre obras comerciais, residenciais e públicas, e observaram que a corrosão das armaduras representou 96,7% dos casos das manifestações patológicas encontradas.

Em termos econômicos, estima-se que em países industrialmente desenvolvidos, apenas 60% dos recursos da indústria da construção são aplicados em novas instalações, sendo o restante destinado a reparo e manutenção de estruturas pré-existentes. Considera-se que aproximadamente 5% das receitas de um país industrializado sejam dedicadas à prevenção da

corrosão, à manutenção e à substituição de elementos sujeitos a esse fenômeno (Callister; Rethwisch, 2012).

Segundo a *National Association of Corrosion Engineers* (NACE), o custo global da corrosão em 2013 foi estimado em US\$ 2,5 trilhões, equivalente a 3,4% do PIB mundial. Em estudo realizado pela *Association for Materials Protection and Performance* (AMPP) no Canadá em 2019, estimou-se um gasto anual de US\$ 51,9 bilhões com falhas e deteriorações relacionadas à corrosão. Utilizando as práticas disponíveis de controle de corrosão, estima-se que poderiam ser realizadas economias entre 15% e 35% do custo da corrosão, ou seja, entre 375 e 875 bilhões de dólares anuais. Esses custos normalmente não incluem consequências ambientais ou de segurança individual. Através de incidentes, interrupções, acidentes e entre outros, diversas indústrias perceberam que a falta de gestão da corrosão pode ser muito dispendiosa e que, através de uma gestão adequada, podem ser alcançadas poupanças de custos significativas ao longo da vida útil dos produtos (NACE, 2016).

Quando se trata de estruturas de concreto armado, o problema da corrosão, além de financeiro, passa a ser também de segurança, uma vez que os danos em decorrência da corrosão se manifestam na forma de manchas superficiais, seguidas por fissuras, destacamentos do concreto de cobertura, eventual perda de aderência das armaduras principais e redução da seção resistente, levando ao comprometimento da segurança estrutural (Ribeiro *et al.*, 2014).

Nas armaduras em estruturas de concreto armado, a corrosão é inibida pela proteção fornecida ao aço pelo concreto. Isso ocorre devido ao revestimento que atua de duas formas: promovendo uma barreira física a entrada de agentes agressivos e, por uma proteção química por meio da camada de óxidos aderida à barra, passivando o aço. No entanto, quando essa barreira é quebrada, um processo corrosivo se instala (Neville, 2016). De acordo com a Norma Brasileira NBR 6118, são dois os mecanismos preponderantes de deterioração da armadura, sendo estes, a despassivação por carbonatação e a despassivação por ação de cloretos (ABNT, 2023).

A carbonatação ocorre pela ação do gás carbônico (CO_2), que reage com compostos da matriz de concreto formando carbonato de cálcio, reduzindo o pH da camada protetora e conseqüentemente criando um ambiente mais propício para a ocorrência do processo corrosivo (Ribeiro *et al.*, 2014).

Na despassivação por cloretos, os íons ativam a superfície do aço para a formação de um ânodo, com a camada de passivação sendo o cátodo e, durante a reação, o cloreto é regenerado, de forma que não há cloretos nos produtos da corrosão. Isso significa que os cloretos ficam novamente livres para novas reações, o que torna esse mecanismo de corrosão

mais preocupante do que a ocasionada por carbonatação. A corrosão induzida por cloretos é altamente localizada em um pequeno ânodo, o que leva à corrosão por pites (Neville, 2016).

A ação da carbonatação e do ataque de cloretos tem sido amplamente investigada de forma isolada (Liu *et al.*, 2016). Frequentemente com o objetivo de analisar a interferência de adições minerais na penetração de algum desses agentes agressivos. Isso pode ser observado nos trabalhos de Ribeiro *et al.* (2021), onde estes realizaram a análise dos coeficientes de difusão de cloretos utilizando diversos tipos de cimentos diferentes, bem como diferentes parâmetros de dosagem para os concretos produzidos. No trabalho de Pontes, Real e Bogas (2023), referente ao estudo da penetração de cloretos em concretos, através do ensaio de migração de cloretos, onde foram empregados diversos tipos de cimentos, juntamente com a adição de cinza volante, sílica ativa e filer calcário. Na pesquisa de Liu *et al.* (2023), que analisaram o comportamento da carbonatação em concretos submetidos a diferentes concentrações de CO₂, alterando os percentuais de escória de alto-forno como adição e Ribeiro *et al.* (2023), que desenvolveram uma proposta de classificação para a qualidade de concretos com base em ensaios de carbonatação acelerados.

Essa simplificação na consideração dos mecanismos de deterioração também pode ser observada nos métodos de previsão da VU de estruturas de concreto armado, onde, a estimativa de tempo é feita, muitas vezes com base nos conhecimentos relativos aos mecanismos de transporte de gases, de fluídos e de íons através dos poros do concreto. De acordo com Medeiros, Andrade e Helene (2011), um dos modelos mais empregados para representar a penetração de agentes agressivos através dos poros do concreto é denominado modelo da raiz quadrada do tempo, que é multiplicado por um coeficiente de difusividade K. Este método pode ser aplicado para ambas as causas de despassivação, onde, tanto o coeficiente da carbonatação quanto o coeficiente de difusividade dos cloretos dependem de diversos fatores. De forma geral, é calculado o período necessário para a despassivação da armadura devido à penetração de cloretos ou da profundidade de carbonatação. Percebe-se que estes fenômenos são considerados isoladamente, não levando em consideração a sinergia existente entre esses processos de deterioração.

O estudo sobre a combinação desses mecanismos de deterioração é algo relativamente recente, de forma que não há um consenso sobre a sinergia do ataque de cloretos e da carbonatação sobre a durabilidade do concreto. A maioria dos estudos referentes à ação combinada destes agentes consiste no efeito da carbonatação na penetração de cloretos em matrizes cimentícias (Mei *et al.*, 2022). De fora geral, a análise recai sobre a influência de um fenômeno sobre o outro, desconsiderando-se que ambos afetam diretamente o fenômeno de

corrosão das armaduras, principalmente no que diz respeito à taxa de corrosão, que expressa a que velocidade o processo ocorre. Ou seja, existe uma carência na literatura atual de trabalhos que avaliem o efeito conjunto da carbonatação e do ataque de cloretos sobre a corrosão das armaduras do concreto.

Cui *et al.* (2015), comprovaram em sua pesquisa que a formação de uma estrutura densa de concreto carbonatado retarda o processo de carbonatação. Com o fornecimento suficiente de gás CO₂, os poros das camadas mais externas de concreto são preenchidos e obstruídos com partículas, assim, o concreto se torna menos permeável à difusão de CO₂, devido à uma menor porosidade e baixa conectividade entre os poros.

Em contrapartida, estudos sugerem que a carbonatação do concreto pode aumentar significativamente a concentração de cloretos livres na solução dos poros, o que pode influenciar expressivamente no processo corrosivo, uma vez que os cloretos livres são os principais responsáveis pelo ataque a armadura (Al-Ameeri; Rafiq; Tsioulou, 2021). Chang (2017) observou que independentemente da ordem de ocorrência entre os mecanismos de carbonatação e ação de cloretos, após a carbonatação total, o teor de cloreto combinado das amostras se aproxima de zero, o que indica que a carbonatação faz com que a pasta perca completamente a capacidade de ligação aos cloretos. É amplamente reconhecido que a carbonatação no concreto afeta a difusividade de cloretos e acelera a corrosão das armaduras induzida por cloretos (Al-Ameeri; Rafiq; Tsioulou, 2021).

Ademais, a variação na ligação dos cloretos induzida pela carbonatação é particularmente significativa quando a mistura contém materiais cimentícios suplementares. Ligantes que contêm escória granulada de alto forno moída, por exemplo, são usados em ambiente marinho, uma vez que a difusão de cloreto é significativamente reduzida. Porém, esses ligantes formam menos portlandita do que os ligantes comuns, e conseqüentemente, para um mesmo ambiente e tempo de exposição, a profundidade de carbonatação nesses materiais é maior do que em ligantes comuns, como também é esperado para ligantes com cinzas volantes e metacaulim (Saillio; Baroghel-Bouny; Barberon, 2014). Assim, faz-se necessário investigar o efeito do cimento utilizado sobre as reações individuais, bem como sobre o efeito sinérgico entre carbonatação e o ataque de cloretos.

O entendimento do fenômeno da corrosão das armaduras em sua totalidade é essencial para o bom desempenho das estruturas de concreto, do ponto de vista preventivo, permitindo a adoção de medidas que reduzam o risco de instauração de um processo corrosivo, e corretivo, possibilitando a tomada de decisão por uma terapia adequada. Portanto, se faz necessário investigar as implicações da ação combinada da carbonatação e da penetração de

cloretos na durabilidade do concreto armado, de forma a verificar a influência da sinergia dos mecanismos de deterioração no fenômeno da corrosão, mais especificamente, o seu efeito sobre a taxa de corrosão das armaduras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o efeito individual e sinérgico da carbonatação e do ataque de cloretos no fenômeno da corrosão das armaduras do concreto para três tipos de cimento distintos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar propriedades dos concretos com mesmo f_{ck} produzidos com três tipos de cimento distintos;
- Determinar o efeito do tipo de cimento na corrosão das armaduras dos concretos produzidos com cimentos dos tipos CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI;
- Determinar a influência do tipo de ataque (carbonatação, ataque de cloretos e ataque conjunto) sobre a corrosão das armaduras do concreto;

1.3 Estrutura da dissertação

O presente estudo está dividido em cinco capítulos conforme descrito a seguir.

O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho, a justificativa da pesquisa com a identificação do problema, seguido pelos objetivos da pesquisa e a apresentação da estrutura do trabalho.

No segundo capítulo o referencial teórico é exposto, abordando conceitos de durabilidade e vida útil, a corrosão de armaduras do concreto, despassivação por carbonatação e por ataque de cloretos, efeitos do ataque sinérgico de carbonatação e cloreto no concreto armado e métodos de avaliação de corrosão de armaduras.

No terceiro capítulo é descrito o programa experimental utilizado, através da descrição e caracterização dos materiais e detalhamento dos métodos utilizados na pesquisa.

O quarto capítulo consiste na apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos no estudo, fundamentados teoricamente em publicações relacionadas ao tema.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, assim como as sugestões para trabalhos futuros com questões não discutidas na presente pesquisa.

Em seguida são expostas as referências bibliográficas citadas ao longo do texto, além dos anexos e apêndices, onde são apresentados os dados complementares relativos aos ensaios realizados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Durabilidade e Vida Útil das estruturas de concreto

Desde o início das construções em concreto até a década de 1980, a durabilidade era tratada de forma subjetiva, assegurada exclusivamente através de exigências prescritivas, comandada apenas pelo bom senso e pela experiência do profissional (Medeiros; Andrade; Helene, 2011). De acordo com Neville (2016), até recentemente, os avanços em cimento e na tecnologia do concreto concentraram-se na obtenção de resistências cada vez mais elevadas, uma vez que um concreto resistente era considerado um concreto durável. Isso é exemplificado por Yildirim, Ilica e Sengul (2011), que afirmam que as especificações dos concretos na Turquia são, na sua maioria, baseadas na resistência à compressão e na relação água/cimento, com base no ambiente. As condições de exposição podem ser negligenciadas desde que o critério de resistência seja satisfeito, pois considera-se que enquanto a resistência necessária é obtida, os problemas de durabilidade também são atendidos. Como resultado dessas abordagens, a corrosão devido ao efeito dos cloretos é uma das principais causas da curta vida útil de tais estruturas.

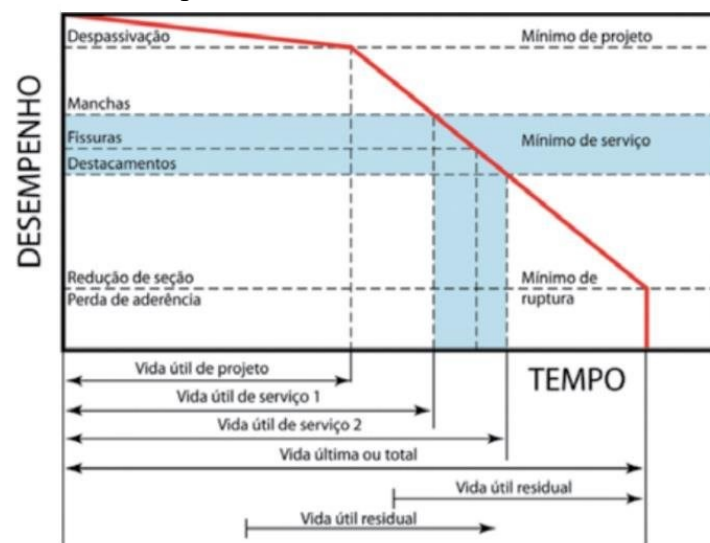
Normalmente, normas técnicas, como a NBR 6118 e a EN 206, associam a vida útil de estruturas de concreto a parâmetros simples, como a relação água/cimento (a/c). Assim, é fundamental que os meios técnicos e normativos levam em conta esses aspectos, considerando sua importância através da abordagem de parâmetros como relação água/aglutinante, finura, composição química do cimento, dentre outros (Ribeiro *et al.*, 2021).

A NBR 6118 define durabilidade como a “capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.” (ABNT, 2023, p. 13). Já a NBR 15575-1 (ABNT, 2024, p. 9) define durabilidade como “a capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção.” A norma ainda indica que o termo durabilidade, geralmente é utilizado como qualitativo para expressar a manutenção do desempenho da edificação durante a Vida Útil.

Inicialmente o termo Vida Útil foi associado a critérios subjetivos de avaliação como aspectos estéticos e psicológicos, como por exemplo, o limite de flechas e fissuras que não causem mal-estar nos usuários, e outras. Com o tempo, a engenharia percebeu a necessidade de estabelecer critérios claros, objetivos e quantificáveis (Ribeiro *et al.*, 2014).

A NBR 15575-1 define Vida Útil como o período em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos, com atendimento dos níveis de desempenho previstos na respectiva norma, considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção previstos no manual de uso, operação e manutenção (ABNT, 2024). No Brasil há uma proposta de definição de vida útil delimitada aos fenômenos de corrosão das armaduras, que pode ser esquematizado conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Vida útil das estruturas de concreto tomando por referência o fenômeno de corrosão



Fonte: Medeiros, Andrade e Helene, (2011)

A deterioração do concreto pode ocorrer devido a causas externas e internas, através de diversos tipos de efeitos. Segundo Mehta e Monteiro (2008), esses efeitos podem ser físicos e químicos, sendo que o primeiro inclui desgaste superficial, fissuração devida à cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas. Os efeitos químicos incluem a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas e reações expansivas envolvendo reações álcali-agregado, ataque por sulfatos e corrosão das armaduras. Neville (2016) adiciona os danos mecânicos causados por impacto, abrasão, erosão ou cavitação, e afirma que o ataque químico externo ocorre, principalmente, por meio de íons agressivos, como os cloretos, os sulfatos, ou pelo dióxido de carbono, assim como por diversos líquidos e gases de origem natural ou industrial. Ainda de acordo com o autor os processos físicos e químicos podem atuar de forma sinérgica.

Atualmente, o estudo da durabilidade em estruturas de concreto armado e protendido tem evoluído graças ao maior conhecimento dos mecanismos de transporte de

líquidos e de gases agressivos nos meios porosos, que possibilitaram associar o tempo aos modelos matemáticos que expressam esses mecanismos quantitativamente (Medeiros; Andrade; Helene, 2011). Isso se deve à dependência existente entre durabilidade e permeabilidade do concreto, ou seja, da facilidade com que os fluidos podem penetrar e se movimentar no interior do concreto.

De fato, exceto no que se refere às causas mecânicas, todas as influências negativas sobre a durabilidade envolvem o transporte de fluidos através do concreto (Neville, 2016). De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a água, geralmente, está presente em todo o tipo de deterioração, e a facilidade com que esta penetra nos sólidos porosos determina a taxa de deterioração. Os mecanismos de transporte no interior do concreto serão tratados no tópico a seguir.

2.2 Mecanismos de transporte no concreto

De acordo com Neville (2016), a durabilidade do concreto pode ser afetada principalmente pela penetração de três fluidos muito importantes, sendo estes, a água, pura ou com íons agressivos, o gás carbônico e o oxigênio. Eles podem se movimentar através do concreto de diferentes formas, mas todo o transporte depende, essencialmente, da estrutura da pasta de cimento hidratada. Os mecanismos de transporte de líquidos e gases no interior do concreto mais influentes no fenômeno de corrosão são a permeabilidade, a absorção capilar, a migração iônica e a difusão.

A permeabilidade pode ser definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de pressão, e caracteriza-se pela facilidade com que o fluido atravessa um sólido poroso sob uma diferença de pressão. A absorção capilar é definida como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade. Por sua vez, a migração iônica é o processo de transporte que ocorre quando existe um potencial elétrico que possibilita o deslocamento dos íons presentes para que se neutralize o efeito da diferença de potencial (Ribeiro *et al.*, 2014).

A difusão ocorre quando o transporte de um gás ou de um vapor através do concreto é o resultado de um gradiente de concentração, e não de um diferencial de pressão. Além da difusão de gases, os íons agressivos, se movem por difusão na água dos poros, sendo mais efetiva quando os poros da pasta de cimento endurecida estão saturados, mas ela também pode ocorrer em concreto parcialmente saturado. Salienta-se que na água dos poros ocorrem as reações com a pasta de cimento hidratada, de modo que esse mecanismo de transporte é importante em relação para o ataque das armaduras por cloretos (Neville, 2016).

2.3 Corrosão das armaduras do concreto

A corrosão das armaduras em concreto armado e protendido é uma das manifestações patológicas mais graves que afetam as estruturas, resultando em consideráveis consequências técnicas, financeiras e sociais. Tendo em vista que o concreto armado e protendido é o sistema construtivo mais comumente utilizado em infraestrutura e edificações, e seu uso em larga escala é impulsionado por aspectos econômicos, ambientais e de durabilidade (Ribeiro *et al.*, 2021).

Para Ribeiro *et al.* (2014), a corrosão pode ser definida como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, como resultado de uma reação química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de deterioração.

No processo de oxidação do aço, o substrato de ferro na sua superfície reage com o oxigênio e a umidade para formar o óxido ferroso, levando à formação da camada de ferrugem. Durante o processo de corrosão, a armadura de aço age como um eletrodo misto, contendo múltiplas células de corrosão com ânodos e cátodos que são conectados através da barra de aço. A solução de concreto atua como um eletrólito complexo, viabilizando o transporte de íons para formar um circuito completo (Zhang *et al.*, 2021, 2023).

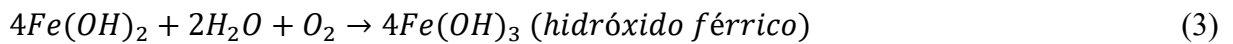
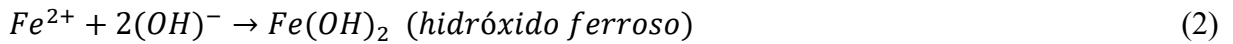
A corrosão do aço em meio aquoso é de natureza eletroquímica. De acordo com Callister e Rethwisch (2012), esse processo consiste em uma reação na qual há uma transferência de elétrons de uma espécie química para a outra, onde, os átomos dos metais perdem elétrons em uma reação de oxidação no ânodo, e são transferidos para outra espécie química e tornam-se parte dela em uma reação de redução, no cátodo.

Para Mehta e Monteiro (2008), os potenciais eletroquímicos que formam as células de corrosão podem ser formados de duas maneiras, sendo a primeira através de células formadas quando dois metais diferentes são embutidos no concreto ou quando há diferenças significativas na superfície do aço. A segunda forma de geração seria através de células de concentração formadas na vizinhança da armadura devido a diferença de concentrações de íons dissolvidos, como álcalis e cloretos.

Neville (2016) descreve o fenômeno da corrosão da forma apresentada a seguir. Na existência de uma diferença de potencial elétrico ao longo do aço no concreto são formadas regiões anódica e catódica, conectadas pelo eletrólito, na forma da água de poros da pasta de cimento endurecida. Os íons de ferro, Fe^{2+} , no ânodo passam para a solução, enquanto os elétrons livres, e^- , com carga elétrica negativa, passam pelo aço para o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito, combinando-se com a água e o oxigênio para

formar íons de hidroxila (OH^-). Estes íons se deslocam pelo eletrólito e combinam-se com os íons ferrosos formando o hidróxido ferroso que, por outra oxidação, transforma-se em hidróxido férrico (ferrugem). A seguir estão descritas as reações envolvidas nas Equações 1, 2, 3 e 4.

Reações anódicas:

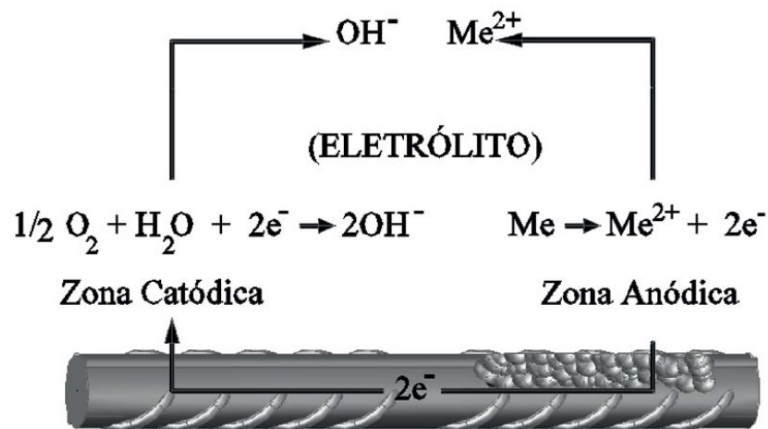


Reações catódicas:



O mecanismo de ocorrência do fenômeno da corrosão é representado na Figura 2.

Figura 2 - Representação de uma pilha de corrosão com um mesmo metal



Fonte: Meira (2017)

Para Meira (2017), o eletrólito tem especial importância sobre o processo de corrosão em uma pilha eletroquímica, pois a maior presença deste facilita a passagem de uma maior corrente iônica, acelerando o processo de corrosão, em contrapartida, pouco eletrólito aumenta a resistividade do sistema. Pode-se concluir que o concreto em ambientes de baixa umidade relativa terá o processo de corrosão da armadura, dificultado por carência de eletrólito, enquanto em ambientes de elevada umidade o processo pode ser acelerado.

Considerando-se uma estrutura de concreto armado ou protendido, o aço pode ser considerado a parte mais sensível à ação do meio ambiente, dessa forma, as armaduras devem

ficar protegidas por meio de uma espessura de concreto de cobrimento (Medeiros; Andrade; Helene, 2011). Esse concreto de cobrimento promove uma barreira física a entrada de agentes agressivos. Além dessa proteção física, o concreto promove uma barreira química pela formação de uma película passivadora na superfície da armadura, que se apresenta estável devido a alcalinidade do meio (Cui *et al.*, 2015).

Essa proteção química decorre do pH alcalino do concreto, uma vez que a água intersticial possui um pH que é geralmente maior do que 12,5, onde isto se deriva das reações de hidratação dos compostos do cimento, como os silicatos de cálcio (C_2S e C_3S), que liberam uma porcentagem de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Este caráter básico do concreto favorece a formação da chamada camada ou película passivadora, que é formada sobre a superfície da barra de aço, conferindo a esta proteção contra a corrosão (Wang *et al.*, 2023). Tal camada de passivação é formada por um filme mais interno de óxido ferroso e outro mais externo de óxido férrico (Mehta; Monteiro, 2008).

Quando outras condições ambientais externas requeridas estão presentes e a proteção, conferida fisicamente pela camada de cobrimento de concreto e quimicamente pela formação da película passivadora, deixa de existir, instaura-se um processo corrosivo nas armaduras, o qual visualmente se torna perceptível, quando os produtos de corrosão alcançam a superfície da estrutura ou quando a expansão da armadura é alta o suficiente para gerar fissuras e desprendimento do cobrimento de concreto (Oliveira; Bragança; Medeiros Junior, 2022).

A corrosão das armaduras é um processo interno e gradual que geralmente se torna visualmente perceptível quando os produtos de corrosão são lixiviados para a superfície das estruturas ou quando a expansão devido aos produtos da corrosão é tão alta que começam a aparecer fissuras e em seguida o desprendimento da cobertura de concreto ocorre. Nessas situações, a degradação pode ter afetado a capacidade estrutural da armadura, devido à redução na seção transversal do aço (Oliveira; Bragança; Medeiros Junior, 2022).

A transformação do ferro nos produtos da corrosão é acompanhada por um aumento de volume que pode atingir de duas a quatro vezes em relação ao metal original, dependendo do estado da oxidação, sendo a principal causa da fissuração do concreto. Dessa forma, os danos em decorrência da corrosão se manifestam na forma de fissuração e lascamento do cobrimento, perda da aderência entre o concreto e a armadura e redução da seção transversal da barra, podendo levar ao colapso estrutural (Nguyen; Castel, 2023; Zhao; Wang; Dong, 2021). Em alguns casos, as armaduras estão inseridas em um concreto muito poroso, podendo não ocorrer fissuras e lascamentos. Como consequência, os produtos de corrosão podem lixiviar através do mesmo, aparecendo na superfície como manchas, geralmente de cor marrom-avermelhada

(Cabral, 2000). De acordo com a NBR 6118 as ações preponderantes de deterioração relativos à armadura são a despassivação por carbonatação e a despassivação por ação de cloretos, que serão tratados nos tópicos a seguir.

2.3.1 Despassivação por Carbonatação

A despassivação por carbonatação ocorre por ação dos gases presentes na atmosfera sobre o concreto, onde destaca-se o gás carbônico. Em concretos com cimento Portland, a carbonatação ocorre devido à reação do dióxido de carbono dissolvido em um filme de água no interior dos poros, com os hidróxidos presentes no concreto, resultando na destruição da película alcalina passivadora (Mei *et al.*, 2022). Ribeiro *et al.* (2023) afirmam que como o concreto é um material poroso, o CO₂ presente na atmosfera facilmente penetra através dos poros até o interior do concreto, reagindo com os compostos hidratados do cimento, como aluminatos, silicatos, e principalmente hidróxido de cálcio, resultando na formação de carbonatos e água. Essa reação ocorre segundo a Equação 5.



De acordo com Cui *et al.* (2015), a carbonatação teria efeitos vantajosos para o concreto não armado, uma vez que resulta em uma diminuição da porosidade devido à formação de CaCO₃, tornando a pasta carbonatada mais resistente. Isso é confirmado por Neville (2016) que afirma que a carbonatação em si não causa a deterioração do concreto, porém possui severas consequências com relação à durabilidade do concreto armado, pois a reação reduz o pH da água dos poros da pasta de cimento endurecida, de um valor entre 12,6 e 13,5 para um valor próximo de 9. Isso afeta diretamente a passivação da armadura, uma vez que a manutenção desse estado é condicionada a um pH elevado da água dos poros. Desse modo, quando o pH baixo atinge a região próxima à armadura, o filme de óxido protetor é removido, possibilitando a ocorrência da corrosão desde que haja o oxigênio e a umidade necessários para as reações. O efeito da carbonatação é inevitável nas estruturas, devido à penetração do dióxido de carbono vindo da atmosfera, sendo um dos responsáveis pela quebra da película passivadora (Mi *et al.*, 2023).

Os estudos envolvendo carbonatação do concreto enfrentam algumas limitações. Cui *et al.* (2015) mencionam que os únicos dados confiáveis relacionados à carbonatação do concreto são obtidos em ambientes onde as amostras de concreto são expostas a condições

naturais reais por um longo período. Como este método demanda um período extenso, vários métodos de ensaio de carbonatação acelerada foram desenvolvidos, com os quais amostras carbonatadas podem ser obtidas em um curto espaço de tempo e podem servir de base para a previsão do comportamento de carbonatação do concreto em ambientes atmosféricos reais. Em sua pesquisa, Cui *et al.* (2015), chegaram à conclusão de que como existem diferentes mecanismos de difusão entre altas e baixas concentrações de CO₂, empregar um ensaio de carbonatação acelerada com alta concentração de CO₂, com valores acima de 20%, pode não representar a carbonatação natural do concreto e, portanto, deve-se ter cuidado ao utilizar ensaios de carbonatação acelerada. Valores muito altos de concentração de CO₂ podem produzir ácido carbônico em excesso, que geralmente não se forma sob condições naturais e, como consequência, tem o potencial de descaracterizar o real processo de carbonatação observado em campo (Cascudo; Carasek, 2011).

A difusão de CO₂ no concreto depende de fatores como concentração de CO₂, porosidade e teor de umidade do concreto (Cui *et al.*, 2015). De acordo com a NBR 6118, as medidas preventivas consistem em dificultar o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto. O cobrimento das armaduras e o controle da fissuração minimizam este efeito, sendo recomendável um concreto de baixa porosidade (ABNT, 2023).

A menor relação água/cimento, que conota menor porosidade, é um elemento importante que pode reduzir a penetração de CO₂, uma vez que um concreto com uma relação água/cimento mais baixa tem menos poros do que um concreto com relação água/cimento mais alta, influenciando na penetração do CO₂ (Ramezaniyanpour; Ghahari; Esmaeili, 2014).

Ribeiro *et al.* (2014) adicionam a esses fatores retardantes do processo de carbonatação, elevadas reservas de hidróxido de cálcio, boa compactação, adequado processo de cura e adição de cinzas volantes. Este último item, no entanto, apresenta algumas contradições quanto ao seu efeito na reação de carbonatação.

O avanço da frente de carbonatação é inversamente proporcional à reserva alcalina disponível na pasta de cimento hidratada. As adições pozolânicas possuem dois efeitos básicos na microestrutura interna do concreto. O efeito filler é uma ação física positiva de refinamento dos poros e redução da sua interconectividade. O efeito pozolânico é uma ação química, que ao fixar o Ca(OH)₂, reduz a reserva alcalina aumentando a velocidade de propagação da frente de carbonatação (IBRACON, 2021b).

Esse efeito é citado por Meira (2017), que afirma que por um lado as adições pozolânicas contribuem para a redução da reserva alcalina do concreto, colaborando com maiores velocidades de carbonatação. Em contrapartida a redução de porosidade, causada pelo

efeito fíler, dificulta a entrada de agentes agressivos e, conseqüentemente, reduz a velocidade de carbonatação. Para o IBRACON (2021b), é necessário conhecer qual dos efeitos é predominante.

A mesma linha de raciocínio é considerada quando se analisa a influência do tipo de cimento. Os cimentos nacionais que possuem maiores teores de adição de pozolana e de escória de alto forno são o CPIII (Cimento Portland de alto forno) e CPIV (Cimento Portland pozolânico), com adição entre 35% e 75% de escória de alto forno e de 15% a 50% de material pozolânico, respectivamente, normalizados pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Considera-se que cimentos com adições pozolânicas ou com escória de alto forno, apresentam menor resistência a carbonatação devido a redução da reserva alcalina provocada pelas reações (IBRACON, 2021b). Ligantes com adições minerais de escória de alto-forno, como CPIII-32-RS, formam menos Hidróxido de Cálcio quando comparados com ligantes comuns. Conseqüentemente, para uma mesma exposição e tempo, o ingresso da carbonatação nestes materiais é maior do que em ligantes comuns (Saillio; Baroghel-Bouny; Barberon, 2014).

2.3.2 Despassivação por ação de cloretos

A despassivação do aço do concreto armado e/ou protendido por ação de cloretos consiste na ruptura local da camada de passivação, causada por elevado teor do íon-cloro (ABNT, 2023). Na ausência de cloretos, a passivação é considerada estável desde que o pH da solução permaneça acima de 11,5. Na presença de íons cloro, a depender da relação Cl^-/OH^- , a película passivadora é destruída mesmo com valores de pH superiores a 11,5 (Mehta; Monteiro, 2008; Ribeiro *et al.*, 2021)

Os cloretos são a principal substância agressiva em ambientes marinhos. Em condições submersas, os cloretos penetram através dos poros do concreto por um mecanismo de difusão que pode ser complementado por absorção capilar, caso sejam produzidos ciclos de umedecimento e secagem (Andrade, 2023). O ingresso e a progressão dos cloretos no concreto podem ser explicados por ação de absorção e posterior difusão (Ribeiro *et al.*, 2014).

A corrosão induzida por cloretos é altamente localizada em um pequeno ânodo, o que leva à corrosão pontual, também chamada de corrosão por pites. Os íons cloretos ativam a superfície do aço para a formação de um ânodo, com a camada passivada sendo o cátodo, e durante a reação, o cloreto é regenerado, de forma que não há cloretos nos produtos da corrosão. Isso significa que os cloretos ficam novamente livres para novas reações, o que torna esse agente de corrosão mais preocupante do que a carbonatação (Neville, 2016). Devido a essa

regeneração dos íons, pequenas quantidades de cloretos podem ser responsáveis por grandes processos corrosivos, conforme as reações abaixo, nas Equações 6 e 7 (Ribeiro *et al.*, 2014):



Para que a corrosão por cloretos se inicie, deve haver uma concentração mínima de cloretos na superfície do aço, entretanto, não existe um limite universalmente válido. As normas, em geral, prescrevem limites rigorosos em relação ao teor de cloreto no concreto, por exemplo, a BS 8110-1: 1997 limita o teor total de cloretos no concreto armado a 0,40% da massa de cimento, sendo o mesmo limite estabelecido pela norma europeia BS EN 206-1:2000 (atual BS EN1992-1:2004). A abordagem do ACI 318-02 é considerar somente os íons cloreto solúveis em água, com teor de cloretos em concreto armado é limitado a 0,15% da massa de cimento. A relação mais aceita é a de Cl^{-}/OH^{-} maior que ou igual a 0,6 (Neville, 2016). De acordo com Ribeiro *et al.*, (2014) quando a concentração de íons cloreto excede em 0,6 a concentração de íons hidróxido, o filme de passivação “dissolve-se”. O valor crítico de 0,6 corresponde a uma percentagem de 0,2% em massa de cloretos relativamente à massa de cimento, ou de 0,05% relativa à massa de concreto.

O valor crítico entre as massas de cloretos e concreto pode ser alterado devido a diversos fatores como a inexistência de oxigênio dentro dos poros, a elevada resistividade ou a própria qualidade do concreto. Além disso, em concretos secos mesmo em presença de concentrações muito elevadas de cloretos dentro do concreto, o processo corrosivo tenderá a não ocorrer devido a insuficiência de água nos poros para transportar os íons cloreto até a armadura (Ribeiro *et al.*, 2014).

Outro fator a ser considerado é de que estes íons podem ser encontrados no interior do concreto em três diferentes formas. Uma primeira parte quimicamente fixada, estando incorporada aos produtos de hidratação do cimento, sendo que a principal forma de fixação ocorre pela reação com o C_3A , formando cloroaluminato de cálcio, denominado sal de Friedel. Os cloretos ainda podem estar fixados fisicamente, tendo sido adsorvida na superfície dos poros de gel. Somente uma terceira parte, a dos cloretos livres, está disponível para a reação agressiva com o aço (Neville, 2016).

Comparado ao CO_2 , o Cl^{-} exibe um pequeno raio iônico e alta atividade química, portanto a difusão através dos locais defeituosos no filme passivo é mais fácil, atingindo

diretamente a superfície do aço, induzindo e acelerando os danos por corrosão no local. A corrosão causada por íons cloreto reduz a área de trabalho da armadura e a capacidade de carga da estrutura de concreto armado, além disso, o estresse relacionado ao volume e à expansão dos produtos de corrosão formados leva à fissuração e subsequente lascamento da cobertura de concreto, o que pode acelerar ainda mais os danos. Portanto, os danos por corrosão da armadura induzidos por cloreto são muito mais prejudiciais para a durabilidade do concreto armado, em comparação com os danos por corrosão induzidos por CO_2 (Xu *et al.*, 2023).

As medidas preventivas a esse mecanismo de deterioração consistem em dificultar o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto. O cobrimento das armaduras e o controle da fissuração minimizam este efeito, sendo recomendável o uso de um concreto de baixa porosidade, também sendo recomendável o uso de cimento composto com adição de escória ou material pozzolânico (ABNT, 2023).

A composição química do cimento, as adições minerais e a distribuição dos tamanhos dos poros afetam significativamente a capacidade de fixação de cloreto e sua mobilidade iônica. Isso pode ser observado em algumas adições minerais, que geram um aumento no teor de aluminato da mistura, favorecendo a formação do sal de Friedel (Ribeiro *et al.*, 2021). Por exemplo a adição de escória de alto-forno, além de proporcionar menor taxa de difusão iônica, permeabilidade e resistividade, proporciona maior capacidade de combinação com os íons cloreto (Cascudo, 1997).

De fato, cimentos com maior capacidade de fixação de cloretos resultam em menor velocidade de transporte. Concretos produzidos com CPIV e CPV apresentam melhor desempenho, o primeiro, devido a maior presença de aluminatos, e o segundo, pela maior finura, em função da redução da porosidade da matriz (IBRACON, 2021c).

Deve ser ressaltado que o uso de cimento resistente a sulfatos pode ser desaconselhado uma vez que a resistência a sulfatos requer um baixo teor de C_3A , e como este produto é responsável pela fixação dos íons cloro, formando cloroaluminato de cálcio, em baixos teores de C_3A , os íons estariam disponíveis para iniciar a corrosão do aço (Neville, 2016).

2.4 Efeito sinérgico da carbonatação e do ataque de cloretos na corrosão

Vários mecanismos iniciam a corrosão das armaduras em estruturas de concreto, sendo a carbonatação e íons cloretos os principais. Uma estrutura será suscetível à carbonatação quando submetida a uma atmosfera com alta concentração de produção de dióxido de carbono

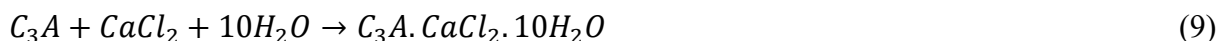
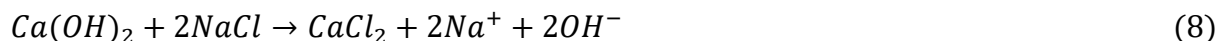
(CO₂), como garagens, túneis, zonas urbanas e industriais. Já a contaminação por cloretos ocorre em estruturas de concreto armado localizadas em ambientes com alta concentração desses sais, como zonas costeiras e marítimas, salinas ou de efluentes industriais, reservatórios, pisos e lajes que aglutinam detritos provenientes da lavagem de fachadas, bem como em pisos em regiões com neve devido ao uso de sais fundentes. Contudo, estruturas de concreto armado em áreas costeiras localizadas em cidades urbanas industrializadas são muito comuns. Assim, essas estruturas são expostas a ambos os processos de degradação (Oliveira; Bragança; Medeiros Junior, 2022). Na maioria dos ambientes urbanos há uma alta probabilidade de ocorrência cíclica de ingresso de cloretos e CO₂ nas estruturas de concreto armado e pretendido (Wang *et al.*, 2017).

Sabe-se que os produtos da carbonatação preenchem os poros do concreto, o que resulta em uma diminuição da porosidade devido à formação de CaCO₃, tornando a pasta carbonatada mais resistente à entrada de agentes agressivos. Em pesquisa realizada por Cui *et al.* (2015) verificou-se a alteração da porosidade e da estrutura dos poros capilares causada pela carbonatação do concreto em concentrações mais altas de CO₂. Os autores constataram que a porosidade do concreto carbonatado foi reduzida e a estrutura dos poros foi modificada, apresentando poros menores, em comparação ao concreto não carbonatado, e que isso se deve principalmente à formação de partículas de CaCO₃ depositadas ao redor dos grandes poros. Por outro lado, a carbonatação pode influenciar negativamente o teor desses agentes no interior do concreto, quando em ocorrência mútua ao ataque de íons cloreto (Al-Ameeri; Rafiq; Tsioulou, 2021).

Em ambientes marinhos ou na presença de sais de degelo, os cloretos podem progredir através da solução de poros do concreto até os vergalhões de aço. Este progresso é atrasado pelas interações químicas entre cloretos e a matriz cimentícia que levam à formação do sal de Friedel. Além disso, uma determinada quantidade de cloretos, que depende do pH da solução dos poros, liga-se ao C-S-H de forma física. Esses mecanismos de ligação são alterados pela carbonatação (Saillio; Baroghel-Bouny; Barberon, 2014).

A formação do cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel, conforme as Equações 8 e 9, é um fator benéfico para retardar o ataque de cloretos, uma vez que os íons não estarão livres para reagir. No entanto, a carbonatação pode consumir os produtos de hidratação do cimento, uma vez que o sal de Friedel reage com o dióxido de carbono, e íons cloro, que se encontravam fixos, são liberados para a solução dos poros (Zhu *et al.*, 2016a). Dessa forma, a carbonatação acelera a corrosão das armaduras induzida por cloretos, devido à liberação dos

cloretos fixados, aumentando, assim, o teor dos mesmos no concreto (Al-Ameeri; Rafiq; Tsioulou, 2021).



De acordo com o trabalho de Liu *et al.* (2017), a carbonatação afeta notavelmente o perfil de cloretos, não só pela redução da sua capacidade de ligação, mas também pela aceleração da taxa de difusão destes íons no concreto. Foi verificado que a presença, mesmo em pequena quantidade, de íons cloro no concreto carbonatado, aumenta a velocidade de corrosão induzida pela baixa alcalinidade desse concreto (Neville, 2016). Em seu estudo, Zhu *et al.* (2016b), determinaram que a probabilidade de iniciação da corrosão das armaduras devido a ação combinada da despassivação por ação de cloretos e carbonatação é quase duas vezes maior do que o caso em que as duas ações são consideradas separadamente.

As pesquisas atuais confirmam que o ataque conjunto interfere nas reações de carbonatação e no ataque por cloretos. Os experimentos realizados por Geng *et al.* (2016), em pastas de cimento contaminadas com cloretos em um processo acelerado em câmara de CO₂, mostraram que a carbonatação da pasta de cimento resulta em uma liberação de cloretos ligados, que está relacionada não apenas à decomposição do sal de Friedel, mas também à decomposição do gel de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H). Para Al-ameeri, Rafiq e Tsioulou (2021), observando-se todos os traços de concreto que foram ensaiados, a penetração de cloretos foi significativamente maior para amostras de concreto também submetidas ao ingresso de dióxido de carbono.

Em um estudo referente à capacidade de ligação de cloretos em pastas influenciada pela carbonatação sob três condições, sendo estas, pastas primeiramente carbonatadas e depois em contato com o cloreto, pastas primeiramente em contato com cloreto e depois carbonatadas e pastas introduzidas internamente com cloreto durante a fundição, e depois carbonatadas, Chang (2017), observou que o grau de redução da capacidade de ligação ao cloreto é basicamente o mesmo após a carbonatação total. Nessa situação, o teor de cloreto ligado das amostras se aproxima de zero, o que indica que a carbonatação faz com que a pasta perca completamente a capacidade de ligação ao cloreto. Os resultados apresentados por Liu *et al.* (2017), demonstram que a carbonatação afeta notavelmente o perfil de cloreto, reduzindo a capacidade de ligação destes íons além de acelerar a taxa de difusão de cloretos no concreto.

Adicionalmente, a influência da carbonatação no ingresso de cloreto é dependente de sua sequência de ocorrência. Quando os concretos são submetidos à exposição a cloretos seguida de carbonatação, os íons cloro são redistribuídos durante a etapa de carbonatação e a extensão dessa redistribuição está relacionada ao grau de carbonatação das amostras. No entanto, quando concretos carbonatados são expostos a cloretos, há um aumento da penetração de cloretos muito mais profundamente no concreto devido à possível presença de microfissuras induzidas por carbonatação na região próxima à superfície (Wang *et al.*, 2017).

No que diz respeito à influência do ataque de cloretos nos processos de carbonatação, Liu *et al.* (2016) afirmam em seu trabalho, onde empregaram a aspersão de solução de cloretos e confinamento das amostras de concreto em câmara acelerada de carbonatação, que a presença de cloretos no concreto pode resultar em uma menor taxa de carbonatação, quando comparado a concretos sem a contaminação por cloretos. Já na pesquisa de Liu *et al.* (2017), que também fizeram uso de aspersão de solução de cloretos e câmara acelerada de carbonatação, os autores relataram, além da redução na taxa de carbonatação devido à presença de cloretos, uma menor profundidade da frente de carbonatação destes concretos quando comparados a amostras somente sujeitas ao ingresso de CO₂.

Por fim, o Quadro 1 abaixo, relaciona as principais pesquisas publicadas nos últimos anos, relativas ao ataque sinérgico entre carbonatação e cloretos, bem como uma breve descrição das metodologias aplicadas.

Quadro 1 - Principais pesquisas sobre ataque sinérgico entre carbonatação e cloretos publicadas nos últimos anos

| Título do trabalho | Autor (ano) | Tipo de Cimento | a/ agl. | CPs | Método de deterioração |
|--|---|--|----------------------|--|--|
| Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete | Ramezani pour, Ghahari e Esmaili (2014) | Cimento Portland Tipo I | 0,35 0,40 0,45 | Diversos tamanhos a depender do ensaio | Parte superior da Ch.1 - Apenas CO ₂ Parte inferior da Ch.1- CO ₂ + Zona de maré a cada 6h |
| Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder | Saillio, Baroghel-Bouny e Barberon (2014) | CEM I, CEM III/A, CEM III/C, CEM I + 30% cinza volante, CEM I + 10% Metacaulim e CEM I + 25% Metacaulim | 0,53 | CPs triturados | Câmara de CO ₂ por 0, 3 dias e 60 dias + imersão em NaCl 0; 0,05; 0,25; 0,5; 1; 1,5M por 60 dias |
| Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride contaminated concrete | Geng <i>et al.</i> (2016) | Cimento Portland Comum 42.5 | 0,50 | Prismático 40x40x160 | Cl ⁻ interno (solução de cloreto de sódio 0,5 mol/l como água de mistura para a moldagem) + Carbonatação acelerada por até 90d Obs: Em todos os grupos foi aplicado 1 ciclo contínuo. |
| Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation | Ye <i>et al.</i> (2016) | Cimento Portland Comum Tipo I e escória de alto forno e cinza volante | 0,45 | Prismático 100x100x 460 | CICLO I (Cl ⁻ +O ₂) - 4 dias em solução de 15%NaCl + 2 dias de secagem 60°C+ 2 dias em LAB CICLO II (Cl ⁻ + CO ₂) - 4 dias em solução de 15%NaCl + 2 dias de secagem 60°C + 2 dias em CO ₂ CICLO III (Cl ⁻ + CO ₂) - 4 dias em solução de 15%NaCl + 2 dias de secagem 60°C + 4 dias em CO ₂ |
| Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete | Zhu <i>et al.</i> (2016a) | - | - | - | Modelo matemático baseado na alteração da estrutura porosa e equilíbrio químico no efeito combinado de carbonatação e ingresso de cloretos no concreto. |
| Probabilistic analysis of reinforcement corrosion due to the combined action of carbonation and chloride ingress in concrete | Zhu <i>et al.</i> (2016b) | - | - | - | Modelo probabilístico para previsão do início da corrosão devido à ação conjunta de carbonatação e ataque por cloretos em estruturas de concreto armado. |

| | | | | | |
|--|---------------------------|--|--------------------------------------|---|---|
| Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress | Liu <i>et al.</i> (2016) | CP e cinza volante | 0,47 | Cúbico 100 mm | GRUPO A (Cl ⁻) – 28 dias de aerossol de cloretos (10 h para pulverização de aerossol de cloreto e 14 h para condição de secagem) GRUPO B (CO ₂ + Cl ⁻) – 28 dias de CO ₂ + 28 dias de aerossol de cloretos GRUPO C (CO ₂) - 28 dias de carbonatação GRUPO D (Cl ⁻ + CO ₂) – 28 dias de aerossol de cloretos + 28 dias de CO ₂ Obs: Em todos os grupos foi aplicado 1 ciclo contínuo. |
| Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration | Jang <i>et al.</i> (2016) | Cimento Portland tipo I, escória de alto-forno e cinzas volantes | 0,50 | Cúbico 50 mm | (Cl ⁻ +O ₂) - 4 semanas em solução de NaCl + 4 semanas em LAB (3 ciclos) (Cl ⁻ + CO ₂) – 4 semanas em solução de NaCl + 4 semanas de CO ₂ (3 ciclos) |
| Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete | Zhang e Shao (2016) | Cimento Portland Comum e cinza volante | 0,40 | Cúbico 100 mm | Exposição A (Cl ⁻ +O ₂) - 3 dias em solução de NaCl + 4 dias em LAB (50 semanas) Exposição W (Cl ⁻ +CO ₂) - 3 dias em solução com NaCl + 1 dia em LAB + 3 dias em CO ₂ (50 semanas) |
| Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions | Chang (2017) | Cimento Portland P.II. 52.5 e Escória e Cinza | 0,30 0,40 0,50 0,60 0,70 | Prismático 40x40x160 mm | (CO ₂ +Cl ⁻) – 7 dias de secagem (estufa a vácuo) + 14, 28 e 56 dias de CO ₂ + 112 dias em solução de NaCl (Cl ⁻ +CO ₂) - 112 dias em solução de NaCl + 7 dias de secagem + 14, 28 e 56 dias de CO ₂ (Cl ⁻ interno+CO ₂) - 7 dias de secagem + 14, 28 e 56 dias de CO ₂ Obs: Em todos os grupos foi aplicado 1 ciclo contínuo. |
| Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes | Wang <i>et al.</i> (2017) | Cimento Portland, cinza volante e sílica ativa | 0,55 | Blocos de 150x150x 80 mm com quatro tubos de PVC embutidos. Blocos de 500x500x 80 mm | YCO ₂ +XCL – Condicionamento + Carbonatação por Y meses + Saturação em H ₂ O por 9 dias + imersão em Cl ⁻ por X meses XCl+YCO ₂ - Saturado H ₂ O por 9 dias + imersão em Cl ⁻ por X meses + Condicionamento + Carbonatação por Y meses Obs: Em todos os grupos foi aplicado 1 ciclo contínuo. |
| Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete | Liu <i>et al.</i> (2017) | Cimento Portland comum tipo I | 0,38 0,47 0,53 | Cúbico 100 mm | GRUPO A (Cl ⁻) – 28 dias na condição de controle 1 + 28 dias de ataque de aerossol de cloreto (10 h para pulverização de aerossol de cloreto e 14 h para condição de secagem) GRUPO B (CO ₂ +Cl ⁻) – 28 dias de carbonatação + 28 dias de ataque de aerossol de cloreto GRUPO C (CO ₂) – 28 dias na condição de controle 2 + 28 dias de carbonatação GRUPO D (Cl ⁻ +CO ₂) - 28 dias de ataque de aerossol de cloreto + 28 dias de carbonatação Obs: Em todos os grupos foi aplicado 1 ciclo contínuo. |

| | | | | | |
|---|---------------------------|---|----------------------|--|--|
| Influence of carbonation on “maximum phenomenon” in surface layer of specimens subjected to cyclic drying-wetting condition | Chang, Mu e Feng (2018) | Cimento Portland P.II. 52.5 e cinzas volantes | 0,50 0,60 0,70 | Cúbico 40 mm (pastas) Cúbico 70 mm (argamassa) | CONDIÇÃO A (Cl ⁻) - Imersão em NaCl (saturação de água a vácuo) CONDIÇÃO B (CO ₂ +Cl ⁻) - 28 dias em CO ₂ + 1 dia em solução de NaCl + 6 dias em LAB CONDIÇÃO C (Cl ⁻) - 28 dias LAB + 1 dia em solução de NaCl + 6 dias em LAB CONDIÇÃO D (Cl ⁻ +CO ₂) - 28 dias LAB + 1 dia em solução de NaCl + 6 dias em CO ₂ CONDIÇÃO E (Cl ⁻ +CO ₂) - Cl interno (cura) + Câmara de CO ₂ |
| Degradation of concrete with addition of mineral admixture due to free chloride ion penetration under the effect of carbonation | Jin <i>et al.</i> (2018) | Cimento Portland P.II 42.5, escória de alto forno e cinza volante | 0,35 0,45 0,55 | Cúbico 70 mm | (CO ₂ +Cl ⁻) - 28 dias de CO ₂ + 6/12/18 semanas em solução de NaCl (Cl ⁻) - 28 dias LAB + 6/12/18 semanas em solução de NaCl |
| Numerical study of carbonation and its effect on chloride binding in concrete | Shen <i>et al.</i> (2019) | Cimento Portland Comum | 0,50 | Quadrada 100x100 mm | Analisa numericamente a capacidade de ligação de cloretos considerando a influência da carbonatação e da difusão de cloretos livres pela introdução da taxa de carbonatação. |
| Long-term durability of underground reinforced concrete pipes in natural chloride and carbonation environments | Nguyen e Castel (2023) | - | - | Cilíndrico 100 mm ou 125 mm e altura variada | Estruturas pré-existentes sujeitas a deterioração natural |

Fonte: Elaborado pela autora

2.5 Métodos de avaliação de corrosão de armaduras inseridas no concreto

No que concerne à identificação e quantificação do fenômeno da corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado destacam-se as técnicas visuais, gravimétricas e eletroquímicas. Os métodos visuais dão uma primeira indicação do problema, porém não fornecem informações suficientes para uma análise satisfatória (Cascardo, 1997). O método visual é muito subjetivo e depende do grau de conhecimento do avaliador. Além disso, não há acesso direto às armaduras e, portanto, a observação dos sintomas visíveis pode se tornar um problema devido ao tempo demandado para o surgimento destes, podendo comprometer a estabilidade e a segurança da estrutura, pois a corrosão já pode ter alcançado consideráveis extensões até então (Cabral, 2000).

Os métodos gravimétricos visam quantificar o processo corrosivo pela determinação da perda de massa dos metais obtendo-se a taxa de corrosão gravimétrica (Cascardo, 1997). Para Gentil (1996), os métodos mais confiáveis para medida de velocidade de corrosão são aqueles baseados na perda de massa do material. Este método é utilizado somente em estudos laboratoriais, uma vez que possui uma característica destrutiva e longos períodos exigidos para se obter resultados significantes. Em contrapartida a estas limitações, tem-se a elevada confiabilidade, sendo um importante meio para comparação com métodos que também indicam a perda de massa das armaduras corroídas, tais como os métodos eletroquímicos (Cabral, 2000).

A avaliação da corrosão das armaduras deve ser feita preferencialmente por meio de técnicas eletroquímicas devido à natureza do fenômeno (Cascardo, 1997). Os métodos eletroquímicos dão respostas rápidas, possuem sensibilidade similar à do método gravimétrico e alguns destes métodos ainda possuem a vantagem de serem não destrutivos (Cabral, 2000).

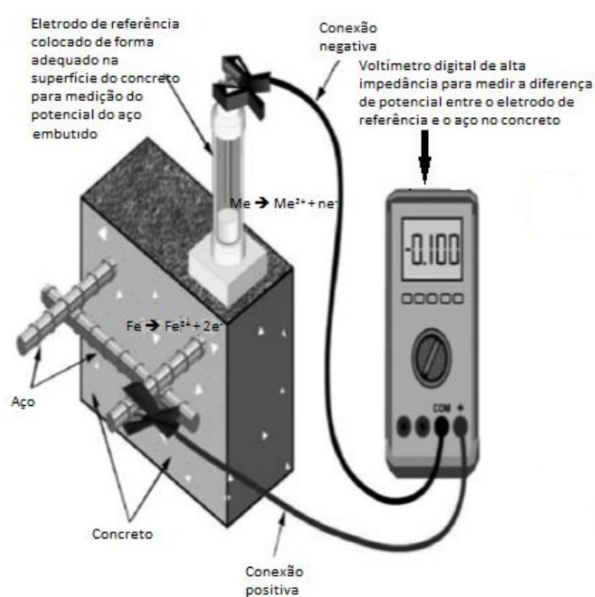
A avaliação da corrosão da armadura do concreto armado pode ser feita por seis técnicas eletroquímicas, divididas em perturbativas e não-perturbativas, ou seja, as que enviam estímulo ao eletrodo de trabalho ou não. As técnicas não perturbativas citadas são: medida dos potenciais de corrosão, resistividade elétrica e ruídos eletroquímicos. As técnicas perturbativas são definidas em curvas de polarização, resistência de polarização e impedância eletroquímica (Silva, 2006). Uma breve exposição de cada técnica empregada nesta pesquisa está a seguir.

2.5.1 Potencial de Corrosão

Um metal que sofre corrosão assume um potencial característico designado como potencial de corrosão. O potencial de corrosão é um dos parâmetros eletroquímicos de mais fácil determinação experimental, uma vez que é simples proceder a medida direta desse potencial com relação à um eletrodo de referência (Wolyneq, 2013). Os dados obtidos possibilitam a identificação de pontos e áreas possivelmente comprometidos em elementos de concreto armado, além de permitir o monitoramento do comportamento da estrutura ao longo do tempo (Cascardo, 1997).

O metal, cujo potencial de corrosão vai ser medido, é designado por eletrodo de trabalho (ET), e as extremidades deste e do eletrodo de referência (ER) são conectados diretamente aos terminais de um multímetro de alta impedância, permitindo a medição do potencial de corrosão, como pode ser observado na Figura 3 (Wolyneq, 2013).

Figura 3 - Arranjo experimental para a determinação do potencial de corrosão



Fonte: Neiva, Coelho e Landgraf (2013)

O eletrodo de referência é basicamente constituído por um metal imerso em uma solução específica. Existem diversos tipos de eletrodo de referência que se distinguem pelo seu potencial padrão, ou seja, pela diferença de potencial para o eletrodo padrão de hidrogênio (EPH) (IBRACON, 2021a). Os eletrodos de referência mais importantes são os eletrodos de calomelano saturado (ECS), de prata-cloreto de prata (ECP) e cobre-sulfato de

cobre (ESC). O eletrodo de calomelano tem ampla aplicação laboratorial, no entanto, ele exige o emprego de uma ponte salina, a qual para os ensaios de corrosão, é muito utilizado o capilar de Luggin (Wolyneec, 2013).

A medida do potencial de corrosão é uma técnica simples, prática, não destrutiva, não perturbativa, de baixo custo, de fácil e rápida aplicação, muito utilizada em análises de campo e laboratoriais. Contudo, essa técnica não permite avaliar a evolução do processo corrosivo, indicando apenas a probabilidade de ocorrência deste, ou seja, não fornece informações quantitativas quanto ao processo de corrosão, não sendo possível determinar a taxa ou velocidade de corrosão. Admite-se então que este é um método qualitativo (IBRACON, 2021a). A probabilidade de corrosão da armadura em função do tipo de eletrodo de referência pode ser observada no Quadro 2.

Quadro 2 - Probabilidade de ocorrência de corrosão da armadura em função do potencial, tendo como referência os diversos tipos de eletrodo

| Tipo de Eletrodo | | | | Probabilidade de Corrosão |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| EPH | ESC | ECS | ECP | |
| >118mV | < -200mV | > -124mV | > -104mV | <10% |
| 118mV a -32mV | -200mV a -350mV | -124mV a -274mV | -104mV a -254mV | Incerta |
| < -32mV | < -350mV | < -274mV | < -254 mV | >90% |

Fonte: IBRACON (2021a)

De acordo com a prática recomendada pelo IBRACON (2021a), após finalizar o ensaio de potencial de corrosão, em ambiente de laboratório, sugere-se a extração das armaduras dos corpos de prova com posterior limpeza. Em seguida, deve ser aferida a massa das barras, com determinação da perda de massa decorrente da corrosão e calculada a taxa de corrosão conforme a Equação 10:

$$TC = \frac{k.W}{A.T.\rho} \quad (10)$$

Onde:

TC: taxa de corrosão;

K: constante ($8,76 \cdot 10^7$ para TC em $\mu\text{m}/\text{ano}$ e $8,76 \cdot 10^7 \cdot \rho$ para TC em $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$);

W: perda de massa em g;

A: área de exposição em cm^2 ;

T: tempo de exposição em h;

ρ : densidade do aço (aproximadamente 7,85 g/cm³).

2.5.2 Resistividade Elétrica

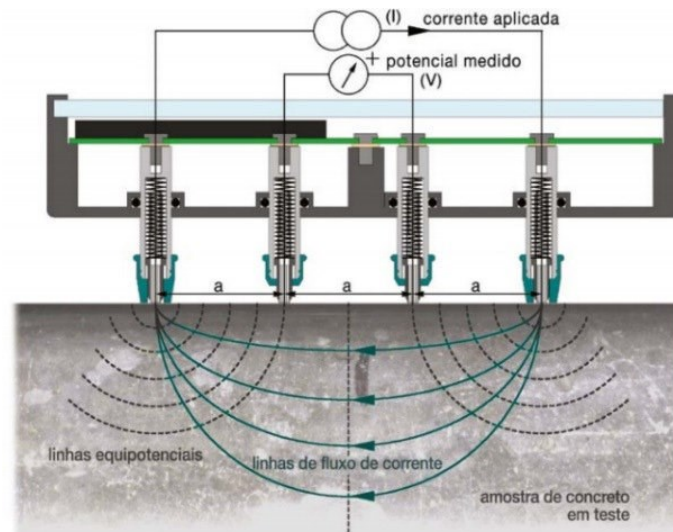
A resistividade elétrica do concreto caracteriza a capacidade do material de resistir à passagem da corrente elétrica e é uma propriedade muito utilizada para o monitoramento de estruturas por ser um método não destrutivo, permitindo um monitoramento externo, com a presença de eletrodos embutidos ou simplesmente encostados à superfície do concreto (Cascardo, 1997).

De acordo com Silva (2006), a resistividade elétrica do concreto é fundamental, tanto para a o período de iniciação quanto de propagação da corrosão, uma vez que é ela quem regula o fluxo de íons que se deslocam através da solução aquosa presente nos poros do concreto.

A medição da resistividade baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial entre eletrodos, posicionados em duas faces opostas ou entre dois eletrodos colocados no interior do concreto, e posterior medida da corrente resultante. A resistência elétrica (R) é obtida pela relação entre a tensão aplicada e a corrente medida. Ao se multiplicar essa resistência por um fator de conversão, chamado de constante de célula, que depende das dimensões do corpo de prova e da sua forma, obtém-se a resistividade elétrica (ρ) (Ribeiro *et al.*, 2014).

Esta resistividade pode ser obtida pelo Método de Wenner, ou método dos 4 eletrodos, normalizado pela ASTM G57-92, que consiste na aplicação de uma corrente elétrica entre dois eletrodos externos que estão em contato com a superfície do concreto e captando uma voltagem pelos eletrodos internos (Silva, 2006). O esquema de medição pelo método de Wenner pode ser observado na Figura 4 abaixo.

Figura 4 - Esquema da medição da resistividade pelo método de Wenner



Fonte: Proceq (2017)

Assim, a resistividade elétrica superficial do concreto é definida pela Equação 11:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot V}{I} \quad (11)$$

Onde:

ρ : resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$);

L: distância entre eletrodos (cm);

V: voltagem medida entre os eletrodos centrais (V);

I: corrente (A).

Os critérios para avaliação dos resultados obtidos, de acordo com o CEB 192 (1998), indicam de acordo com o valor da resistividade, o risco de corrosão da estrutura, por exemplo, para uma resistividade menor que $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ o risco de corrosão será muito alto. No entanto, não é aconselhável utilizar a resistividade elétrica como fator único de monitoramento ou diagnóstico de uma estrutura de concreto armado, pois nem sempre este é o fator determinante da velocidade de corrosão (Silva, 2006).

Simplificadamente, a técnica consiste em medir a facilidade com que uma corrente elétrica atravessa o concreto, uma menor resistividade permite mais facilidade no transporte de

cargas elétricas das zonas catódicas para as anódicas, o que acarreta uma maior velocidade do processo corrosivo caso a armadura esteja despassivada (Ribeiro *et al.*, 2014).

A presença de sais como cloretos, sulfatos e nitratos, como são eletrólitos fortes, reduzem a resistividade do meio, permitindo o fluxo de íons e possibilitando a corrosão das armaduras (Ribeiro *et al.*, 2014). A resistividade é influenciada ainda pela porosidade, pela composição química da solução dos poros e, principalmente, pelo teor de umidade presente nos poros do material. Devido à influência da umidade, é importante que a medição seja realizada de forma representativa das condições médias de exposição da estrutura analisada (Meira, 2017).

2.5.3 Impedância Eletroquímica

O método de impedância eletroquímica, ou método de impedância AC, ou ainda espectroscopia de impedância eletroquímica, é uma técnica eletroquímica derivada de um método que no lugar da aplicação de um potencial de eletrodo de corrente contínua, se aplica um potencial de corrente alternada (Wolyneec, 2013). De acordo com Silva (2006), a técnica de impedância eletroquímica representa o nível de dificuldade que um sinal elétrico alternado, enviado a um circuito, encontra ao percorrê-lo. Dessa forma, quanto maior a impedância do sistema, mais passivo este será, pois haverá uma maior restrição do eletrodo à passagem de corrente.

O princípio desta técnica consiste em aplicar um sinal alternado de pequena amplitude a um eletrodo inserido num eletrólito, neste caso, a armadura inserida no concreto. Compara-se, então, a perturbação aplicada com a resposta do eletrodo, que será um outro sinal senoidal, de corrente (ΔI) ou potencial (ΔE), pela medida da mudança de fase e de amplitudes. Portanto, a impedância, que se representa por Z , mede a relação entre ΔE e ΔI (Cabral, 2000; Ribeiro *et al.*, 2014).

As medidas de impedância AC em sistemas eletroquímicos podem ser realizadas de acordo com o arranjo experimental utilizado no método de Resistência de Polarização, com adição de um analisador de resposta de frequência. A corrente alternada a uma dada frequência é programada pelo microcomputador e aplicada no eletrodo de trabalho com o auxílio de um potenciostato, gerando uma resposta no eletrodo que é recebida pelo detector de resposta, que encaminha os dados ao microcomputador para processamento (Wolyneec, 2013).

Os resultados obtidos são normalmente apresentados nos diagramas de Nyquist e/ou de Bode. O primeiro é mais utilizado, e consiste de uma série de pontos, onde cada um representa a grandeza e a direção do vetor impedância, em cada frequência. O diagrama de Bode representa o ângulo de fase ou módulo de impedância, em relação ao logaritmo da frequência (Cascudo, 1997; Silva, 2006).

Essa técnica apresenta diversas vantagens em relação às técnicas eletroquímicas de corrente contínua, podendo-se citar a utilização de sinais muito pequenos que não perturbam as propriedades do eletrodo, fornece informações sobre a cinética do processo pela velocidade de corrosão, estuda reações de corrosão, apropriada para ambientes de alta resistividade, como é o caso do concreto, mede taxas de corrosão sem necessidade de compensar a queda ôhmica e ainda determina a resistividade elétrica do material, resistência de polarização e a capacitância da dupla camada elétrica em uma mesma medida (Silva, 2006; Ribeiro *et al.*, 2014).

2.5.4 Resistência de Polarização

A resistência de polarização provavelmente é o método mais empregado para a medição da velocidade de corrosão instantânea, permitindo estimar a perda de massa de aço da armadura em um intervalo de tempo, suprimindo assim uma das deficiências da técnica de medição do potencial de corrosão (E_{corr}) da armadura, que é a falta de dados que representem quantitativamente a cinética da corrosão (Ribeiro *et al.*, 2014).

Dentre as técnicas para medir taxas de corrosão, a resistência à polarização (seja de corrente contínua ou alternada), é o mais adequado porque incorpora a medida do potencial e da resistividade e é o único capaz de quantificar a quantidade de aço transformada em óxido (Andrade, 2023).

A resistência de polarização (R_p) representa a resistência que um sistema possui em desenvolver o processo eletroquímico de corrosão, onde, para o estudo de corrosão das armaduras em concreto, o sistema é composto pelo aço, pelo eletrólito e pelo concreto. Essa técnica baseia-se na R_p para alcançar a taxa ou velocidade de corrosão quantitativamente. Assim, é possível observar a presença do processo corrosivo como também a intensidade do fenômeno, pois quanto maior for a R_p , menos intensas serão as taxas de corrosão encontradas (Cascudo, 1997).

Para a determinação de R_p aplica-se uma pequena polarização em torno do E_{corr} do metal analisado, no sentido anódico ou catódico, registrando-se os incrementos de corrente (ΔI) oriundos da polarização imposta, e traça-se um gráfico E versus I (Millard *et al.*, 2001). De

acordo com Ribeiro *et al.* (2014), quando o processo de polarização ocorre em sentido anódico, o potencial medido deve ser maior do que o potencial de equilíbrio e, conseqüentemente, a sobretensão deve ser positiva. Em contrapartida, quando o processo ocorre em sentido catódico, a sobretensão deve ser negativa.

A polarização aplicada varia de 10 a 20 mV em torno de E_{corr} registrando-se a relação entre o potencial e a intensidade da corrente (Ribeiro *et al.*, 2014). Essa pequena polarização é adaptada para que se garanta que após a aplicação do potencial, o eletrodo em análise retorne ao seu valor inicial (E_{corr}), assim, a técnica assume um caráter não perturbativo do processo eletroquímico e pode ser aplicada repetidamente (Cascudo, 1997). De acordo com Cabral (2000), se as polarizações forem demasiadamente grandes, pode-se modificar a superfície do eletrodo, inabilitando o mesmo para futuras determinações.

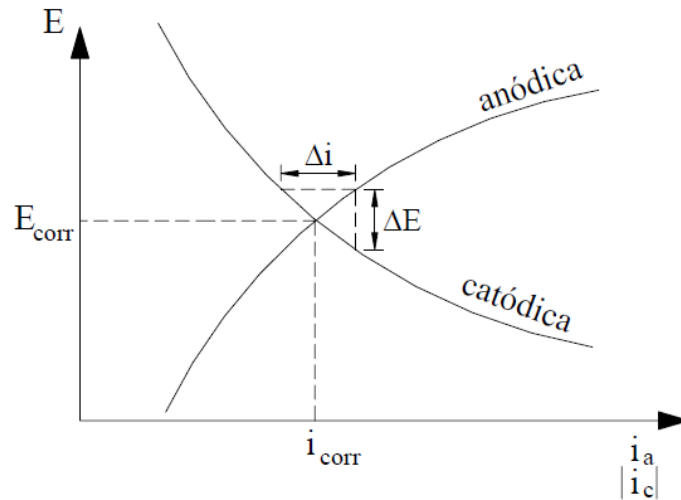
O valor de R_p é definido como o quociente entre os incrementos de potencial e corrente, sendo necessário restringir os valores de sobretensão de modo que se garantam a linearidade da relação $\Delta E/\Delta I$, conforme a Equação 12 (Kouřil; Novák; Bojko, 2006; Millard *et al.*, 2001):

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (12)$$

Ao impor essa pequena polarização, faz-se uma extrapolação das curvas anódicas e catódicas e, devido ao caráter semi-logarítmico das curvas, nas proximidades de E_{corr} considera-se as relações entre o potencial e a soma algébrica das pequenas correntes anódica e catódica linear. A relação entre os incrementos de potencial (ΔE) e de corrente (ΔI) não é linear, porém, para efeito de cálculo, nas regiões próximas do E_{corr} adota-se uma linearidade. Devido a isso, esse método também é conhecido por “polarização linear” (Cascudo, 1997).

De acordo com Stern e Geary (1957), a corrente externa resultante da polarização é medida por meio da diferença entre as taxas anódica e catódica. Isto pode ser observado no diagrama de Evans, na Figura 5.

Figura 5 – Diagrama de Evans



Fonte: Cabral (2000)

Após a determinação experimental de R_p , utiliza-se a equação de Stern-Geary (Equação 13) para determinar a corrente de corrosão instantânea (I_{corr}):

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,3 (\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad (13)$$

Onde:

R_p : Resistência de Polarização;

B: Constante de Stern-Geary, dependente das contribuições anódicas e catódicas;

β_a e β_c : constantes de Tafel;

I_{corr} : Corrente de corrosão;

ΔI : Variação na corrente;

ΔE : Potencial aplicado.

Após a obtenção de I_{corr} , essa corrente é dividida pela área inicialmente polarizada, obtendo-se a taxa ou velocidade de corrosão (i_{corr}), conforme a Equação 14 (Cabral, 2000; Meira, 2017):

$$i_{corr} = \frac{B}{A \cdot R_p} \quad (14)$$

Onde:

i_{corr} : Taxa ou velocidade de corrosão;

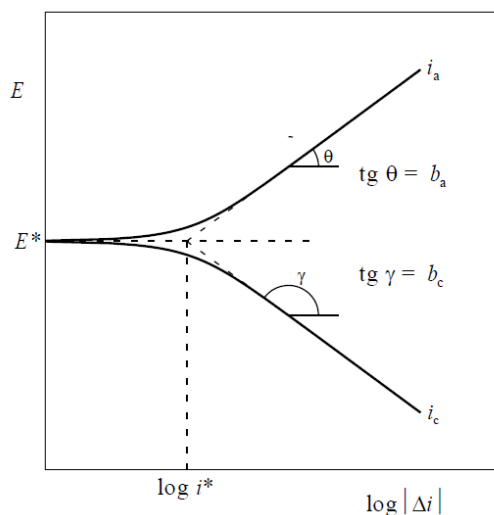
B: Constante de Stern-Geary, dependente das contribuições anódicas e catódicas;

R_p : Resistência de Polarização;

A: Área inicialmente polarizada.

O conhecimento das constantes de Tafel (β_a e β_c) para a determinação exata da taxa de corrosão pelo método de polarização linear é essencial, porém, na maioria dos casos essas constantes não são conhecidas, constituindo uma das limitações do método (Woly nec, 2013). As tangentes de Tafel das semi-reações anódica (β_a) e catódica (β_c) podem ser consideradas constantes, sendo obtidas experimentalmente a partir das curvas de polarização, dadas pelo declive da curva catódica e anódica na zona de polarização linear (Ribeiro *et al.*, 2014). A determinação dos parâmetros β_a e β_c pode ser feita a partir do método de extrapolação da reta de Tafel, como representada na Figura 6, se a inclinação da reta anódica for θ e da catódica γ , então β_a será igual a $\text{tg } \theta$ e β_c igual a $\text{tg } \gamma$ (Woly nec, 2013).

Figura 6 - Curvas de polarização anódica e catódica



Fonte: Woly nec (2013)

Porém, a amplitude das curvas de polarização obtidas no método de polarização linear, não é suficiente para a determinação das constantes pelo processo de extrapolação das retas de Tafel. Logo, para a determinação experimental através de métodos, como o método das curvas de Tafel, devem ser utilizados corpos de prova específicos, pois neste caso o sistema é sujeito a polarizações superiores a 200 mV, perturbando o sistema definitivamente (Woly nec, 2013).

Andrade e Alonso (2004) propõem a adoção da constante de Stern-Geary em função do estado da armadura no interior do concreto, elegendo-se como valores 26 mV, no caso do aço em estado ativo de corrosão, e 52 mV para o material passivo. Uma maneira de se determinar a validade dos valores de B adotados é através de ensaios gravimétricos realizados simultaneamente aos eletroquímicos, comparando-se a perda de massa gravimétrica com a perda de massa eletroquímica, determinada através da lei de Faraday (Andrade; Alonso, 2004). A Equação 15 calcula a taxa de corrosão total (i_T) através das taxas de corrosão instantâneas medidas a cada intervalo de tempo, a qual é utilizada no cálculo da perda de massa eletroquímica, usando a Equação 16 (Cabral, 2000; Neves, 2005).

$$i_T = \int_{t_i}^{t_f} i_{\text{corr}} \cdot dt \quad (15)$$

$$\Delta M_E = \frac{M_a}{z \cdot F} i_T = 0,025 i_T \quad (16)$$

Onde:

i_{corr} : taxa de corrosão total ($\mu\text{A}/\text{cm}.\text{dia}$);

ΔM_E : perda de massa eletroquímica (mg/cm^2);

M_a : massa atômica, que para o ferro é igual a 56g;

F : constante de Faraday (1116,9 mA.dia/eq);

z : valência, que para o ferro é igual a 2.

Uma das limitações desse método é de que a não compensação da queda ôhmica devido à resistividade do eletrólito e das películas superficiais pode gerar dados de polarização inadequados, influenciando na determinação da taxa de corrosão. A queda ôhmica entre o eletrodo de trabalho (armadura) e o eletrodo de referência pode ser definida pelo produto $I.R$, onde I é a corrente que passa pelos eletrodos e R é a resistência do meio, nesse caso, da camada de concreto entre os eletrodos (Wolyneć, 2013). De acordo com Ribeiro *et al.* (2014), os potenciostatos atuais fazem automaticamente a compensação ôhmica, eliminando um erro de medição, que pode ser significativo em concretos muito secos ou muito carbonatados.

Um outro fator a ser considerado nessa técnica é a necessidade do conhecimento da área efetiva do metal que é atravessada pela corrente, uma vez que a densidade de corrente depende deste parâmetro. Isso dificulta a aplicação da técnica em uma estrutura já construída,

pelo fato que a região polarizada está eletricamente ligada ao restante da estrutura (Ribeiro *et al.*, 2014).

Embora ainda não haja critérios muito definidos para relacionar a taxa de corrosão com o grau de deterioração, Alonso e Andrade (1990) *apud* Cascudo (1997), propõem os seguintes critérios de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3 - Critérios de avaliação da velocidade de corrosão

| Grau de Corrosão | Taxa de Corrosão | |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ | $\mu\text{m}/\text{ano}$ |
| Desprezível | 0,1 a 0,2 | 1,1 a 2,2 |
| Início de corrosão ativa | $> 0,2$ | $>2,2$ |
| Ataque importante mas não severo | $\approx 1,0$ | $\approx 11,0$ |
| Ataque muito importante | $>10,0$ | $>110,0$ |

Fonte: Cascudo (1997)

Uma outra relação entre os valores de i_{corr} e o estado de corrosão da armadura é apresentada por Ribeiro *et al.* (2014) e pode ser vista no Quadro 4.

Quadro 4 - Relação entre expectativa de corrosão e i_{corr}

| i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | Previsão de corrosão |
|---|---|
| $<0,2$ | Não é esperada corrosão |
| $0,2 < i_{\text{corr}} < 1$ | Corrosão possível dentro de 10 a 15 anos |
| $1 < i_{\text{corr}} < 10$ | Corrosão expectável dentro de 2 a 10 anos |
| >10 | Corrosão expectável em 2 anos ou menos |

Fonte: Ribeiro *et al.* (2014)

O conhecimento da evolução da taxa de corrosão permite a delimitação do início da corrosão e da sua propagação, uma vez que os valores variam de insignificantes (valores inferiores a $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), até um máximo de cerca de $100\text{--}200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Os dados da taxa de corrosão permitem a implementação adicional dos modelos para previsão da vida útil, aplicado principalmente a estruturas existentes (Andrade, 2023).

2.6 Pesquisas anteriores usando técnicas eletroquímicas e ataque de CO_2 e Cl^- às armaduras

A deterioração das armaduras por corrosão devido à despassivação por carbonatação e à despassivação por ação de cloretos, de forma isolada, já é um fenômeno

reconhecido pelo meio científico. Comumente, os efeitos dessas ações sobre a corrosão das armaduras no concreto são estudados de forma individualizada, muitas vezes com o objetivo de analisar a interferência de adições minerais na penetração de algum desses agentes agressivos ou de avaliar a eficiência de sistemas de reparo quanto ao combate à corrosão do aço por cloretos.

Oliveira e Cascudo, (2018) avaliaram os efeitos da adição de materiais pozolânicos em concretos sob a ação do ataque de cloretos. Nesta pesquisa, três diferentes adições minerais foram adicionadas em combinações binárias com cimento Portland (sílica ativa, metacaulim e cinza volante). O desempenho da corrosão nas amostras foi analisado durante um período de ataque de cloretos, com 44 ciclos semanais de molhagem em solução de NaCl e secagem ao ar. Os resultados, conforme a técnica do potencial de corrosão, mostraram que concretos com adições minerais mantiveram valores de potencial de corrosão na faixa de probabilidade de corrosão menor que 10%, sendo que o concreto de referência apresentou potenciais típicos de corrosão ativa, com probabilidade superior a 90% a partir do sétimo ciclo de molhagem-secagem na solução de cloretos.

O trabalho de Cabral (2000) teve como objetivo a avaliação da eficiência de alguns sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço por meio do ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos. O método aplicado para introdução de cloretos foi por ciclos de imersão e secagem, com dois dias de umedecimento em solução de 3,5% de NaCl e cinco dias de secagem em estufa a 50 °C, onde foram utilizados corpos de prova prismáticos de 45x80x90mm com duas barras de 5mm de diâmetro em cada face, distantes de 5 e 10mm da mesma. As variáveis, potencial de corrosão (E_{corr}), intensidade de corrosão (I_{corr}) e resistência ôhmica da argamassa (R_{ohm}) foram medidas a cada semi-ciclo, por meio de um potenciostato com compensação de queda ôhmica. A técnica eletroquímica de Resistência de Polarização (R_p) foi utilizada para se obter a taxa de corrosão (i_{corr}). O autor concluiu que, de acordo com comportamento apresentado pelas variáveis i_{corr} , E_{corr} e R_{ohm} , o desempenho apresentado pela técnica Resistência de Polarização foi satisfatório, corroborando para o uso do método na avaliação do processo de corrosão (Cabral, 2000).

Algumas pesquisas abordaram a ação simultânea da carbonatação e ataque de cloretos na avaliação do processo de corrosão das armaduras, empregando técnicas eletroquímicas para esta análise, como resistência de polarização linear e o potencial de corrosão.

Al-Ameeri, Rafiq e Tsioulou (2021) investigaram o potencial impacto da carbonatação do concreto na resistência à penetração de cloretos e na taxa de corrosão, através

de ensaios realizados em amostras prismáticas de concreto armado medindo 100x100x500 mm. Os CPs foram inicialmente expostos a um ambiente de carbonatação acelerada e então expostos ao ambiente de penetração de cloretos acelerado. A profundidade de carbonatação, profundidade de cloretos e grau de corrosão, determinado por meio de potencial de corrosão e resistência de polarização linear, foram medidos experimentalmente. Os resultados indicaram que a profundidade de penetração de cloretos e o perfil de concentração de cloretos em estruturas de concreto aumenta significativamente devido a influência da carbonatação. Além disso, para concretos expostos a carbonatação, o potencial de corrosão e a taxa de corrosão aumentam de forma significativa com a exposição de cloretos ao decorrer do tempo.

No trabalho de Mi *et al.* (2023) o mecanismo de corrosão de armaduras de aço em concreto de areia marinha dessalinizada (DSSC) sob combinação de cloretos e de carbonatação foram sistematicamente investigados. O processo de corrosão do aço embutido na pasta de cimento contendo íons cloreto foi monitorado por medições eletroquímicas. Com o auxílio de um potenciostato foram realizadas medições de Potencial de Circuito Aberto (OCP), resistência de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica. Além disso, o pH, o perfil de Cl⁻ e os produtos de corrosão foram examinados simultaneamente. A espectroscopia Raman foi empregada para avaliar a profundidade de carbonatação em microescala. Os resultados dos testes mostraram que a corrosão foi iniciada antes que a frente de carbonatação atingisse o reforço de aço. Com base nos resultados eletroquímicos, os autores afirmaram que o aço-carbono foi passivado nos primeiros 7 dias sendo seguido pelo início da corrosão, sendo evidenciado pelos resultados obtidos aos 14 dias de carbonatação e de forma crescente até os 28 dias. Os autores concluíram que a redistribuição de cloretos induzida pela carbonatação dominou o início da corrosão, e não a diminuição do pH.

De acordo com Mei *et al.* (2022) o nível de corrosão em ambiente sujeito ao ataque composto é mais sério do que aquele sob a condição de ação de fator único de cloretos ou carbonatação. Os resultados encontrados pelos autores mostram que a taxa de corrosão do aço sob efeito conjunto de carbonatação e cloreto aumenta no início e depois decresce devido à corrosão severa das barras de aço e à presença de uma grande quantidade de ferrugem.

O Quadro 5 apresenta as principais pesquisas publicadas nos últimos anos, relacionadas ao ataque conjunto de carbonatação e cloretos sob a análise de medidas eletroquímicas, bem como uma breve descrição das metodologias aplicadas.

Quadro 5 - Principais pesquisas sobre ataque conjunto de carbonatação e cloretos utilizando medidas eletroquímicas publicadas nos últimos anos

| Título do trabalho | Autor (ano) | Tipo de Cimento | a/ agl. | CPs | Método de deterioração |
|---|---|---|----------------------|------------------------------|--|
| Combined impact of carbonation and crack width on the Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Concrete Structures | Al-Ameeri, Rafiq e Tsioulou (2021) | CEM II/A-LL 32,5R | 0,40 0,50 0,60 | Prismático 100x100x500 mm | (Cl ⁻) – 15 semanas em câmara de névoa salina (5%) (Cl ⁻ +CO ₂) - 10 semanas em câmara de névoa salina (5%) + 5 semanas em câmara de CO ₂ + 5 semanas em câmara de névoa salina (5%) |
| Effect of coarse aggregate size on corrosion of reinforced concrete exposed to carbonation and chloride ingress by electrochemical measurements | Oliveira, Bragança e Medeiros Junior (2022) | CEM IV/A 32.5N | 0,60 | Cilíndrico 100x200 mm | GRUPO 1 – câmara de condicionamento por 80 dias GRUPO 2 – câmara de CO ₂ por 40 dias + câmara de condicionamento por 40 dias GRUPO 3 – câmara de CO ₂ por 80 dias Após esse período, todas as amostras foram submetidas a diferentes tempos de ataque de cloretos por imersão em solução de 3,5% NaCl |
| Study on electrochemical characteristics of reinforced concrete corrosion under the action of carbonation and chloride | Mei <i>et al.</i> (2022) | Cimento Portland Comum (42,5 MPa) | 0,40 | Cilíndrico 36x160 mm | (Cl ⁻) - 0,5% NaCl, 1% NaCl e 1,5% NaCl com relação a massa de cimento (Cl ⁻ + CO ₂) - 0,5% NaCl, 1% NaCl e 1,5% NaCl com relação a massa de cimento + 28 dias em câmara de carbonatação (20±3%) (Cl ⁻ + NaNO ₂) - 0,5% NaCl, 1% NaCl e 1,5% NaCl com relação a massa de cimento + proteção por nitrato de sódio (Cl ⁻ + CO ₂ + NaNO ₂) - 0,5% NaCl, 1% NaCl e 1,5% NaCl com relação a massa de cimento + 28 dias em câmara de carbonatação (20±3%) + NaNO ₂ (CO ₂) - 28 dias em câmara de carbonatação (20±3%) (CO ₂ + NaNO ₂) - 28 dias em câmara de carbonatação (20±3%) + NaNO ₂ |
| Inhibition resistance and mechanism of migrating corrosion inhibitor on reinforced concrete under coupled carbonation and chloride attack | Wang <i>et al.</i> (2023) | Cimento Portland Comum (42,5 MPa) e cinza volante | 0,56 | Prismático 100x100x300 mm | Grupo com proteção de amino álcool - 3,5 e 7 dias na câmara de CO ₂ (20±3%) + 7, 14,21,28 e 35 dias de ataque de cloretos por spray (3,5% NaCl) Grupo sem proteção de amino álcool - 3,5 e 7 dias na câmara de CO ₂ (20±3%) + 7, 14,21,28 e 35 dias de ataque de cloretos por spray (3,5% NaCl) |
| The effect of carbonation on chloride redistribution and corrosion of steel reinforcement | Mi <i>et al.</i> (2023) | Cimento Portland Comum | 0,45 | Cilíndrico 28x100 mm | (Cl ⁻ +CO ₂) - 0,06% de NaCl em relação a massa de cimento + 0, 1, 3, 7, 14 e 28 dias em câmara de CO ₂ (20%) |
| Influence of corrosion inhibitors on two different concrete systems under combined chloride and carbonated environment | Tiwari <i>et al.</i> (2023) | Cimento Portland Comum e Pozolânico | - | Prismático 300x300x42 mm | (Cl ⁻ +CO ₂) - 2 dias em solução de NaCl à 3,5 % + 2 dias de secagem ao ar +2 dias em câmara de CO ₂ à 5 % |

Fonte: Elaborado pela autora

3 MATERIAIS E MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo são apresentados e descritos os materiais e o método de pesquisa propostos para a etapa experimental do presente trabalho, em prol de atingir o objetivo de analisar o efeito sinérgico da carbonatação e do ataque de cloretos no fenômeno da corrosão em concreto armado. Foram produzidos concretos com três tipos de cimento diferentes.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

Para a produção do concreto foram utilizados cimentos Portland dos tipos CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI. O cimento CPV-ARI foi escolhido devido possuir menores quantidades de adições minerais, de forma a reduzir as interferências nas reações de carbonatação e ação de íons cloro no concreto. Já os cimentos dos tipos CPIII-32-RS e CPIV-32-RS foram escolhidos devido à maior quantidade de adições minerais e da influência reconhecida destas nas reações de carbonatação e de ataque de cloretos quando estas ocorrem de forma individualizada. Por exemplo, considera-se que cimentos com adições pozolânicas apresentam menor resistência à carbonatação devido à redução da reserva alcalina provocada pelas reações. Em contrapartida, apresentam melhor desempenho ao ataque de cloretos, primeiramente devido à maior presença de aluminatos impactando na capacidade de fixação dos íons, e de forma secundária, em função da redução da porosidade da matriz. Dessa forma pretende-se verificar o efeito desses cimentos no ataque sinérgico desses mecanismos de deterioração.

As Tabelas 1 e 2 apresentam as características químicas e características físicas e mecânicas dos cimentos utilizados. As caracterizações dos cimentos foram obtidas por meio dos dados fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 1 – Características químicas dos cimentos

| Propriedade | CPIII-32-RS | CPIV-32-RS | CPV-ARI |
|--|-------------|------------|---------|
| Perda ao Fogo - PF (%) | 2,59 | 3,23 | 3,58 |
| Óxido de Magnésio - MgO (%) | - | 2,57 | 3,19 |
| Anidrido Sulfúrico – SO ₃ (%) | 3,16 | 2,80 | 3,10 |
| Resíduo Insolúvel - RI (%) | 2,07 | - | 0,65 |

Fonte: Fornecido pelos fabricantes

Tabela 2 - Características físicas e mecânicas dos cimentos

| Propriedade | CPIII-32-RS | CPIV-32-RS | CPV-ARI |
|---|-------------|------------|---------|
| Área Específica (Blaine) (cm ² /g) | 4518 | 4094 | 4449 |
| Massa Específica (g/cm ³) | - | 2,98 | 3,12 |
| Finura - Resíduo de 0,075mm - (%) | - | 1,80 | 0,50 |
| Finura - Resíduo de 0,044mm - (%) | 0,36 | 9,80 | - |
| Início de Pega (min) | 286 | 245 | 130 |
| Fim de Pega (min) | 351 | 300 | 195 |
| Expansib. Le Chatelier - A Quente (min) | 0,50 | 0,00 | 0,00 |
| Resistência à compressão – 3 dias (MPa) | 16,00 | 21,20 | 36,00 |
| Resistência à compressão – 7 dias (MPa) | 28,00 | 26,50 | 40,90 |
| Resistência à compressão – 28 dias (MPa) | 41,90 | 38,80 | 46,90 |

Fonte: Fornecido pelos fabricantes

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados foram doados pela fornecedora de concreto Supermix e os dados de caracterização foram fornecidos pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFC. Como agregado miúdo foi empregado a areia natural, e como agregado graúdo, brita com DMC de 12,5mm, devido às dimensões dos CPs. Para caracterização destes materiais foram realizados os ensaios de determinação de massa específica real e composição granulométrica, de forma a identificar o Módulo de Finura (MF) e o Dimensão Máxima Característica (DMC) dos agregados. Essa caracterização é fundamental para estimar o consumo de materiais e fazer a dosagem, em função das características dos materiais utilizados. O traço de concreto em massa a ser utilizado foi fornecido pelo LMCC com base nas características dos agregados.

Os agregados miúdos foram caracterizados por meio dos seguintes ensaios:

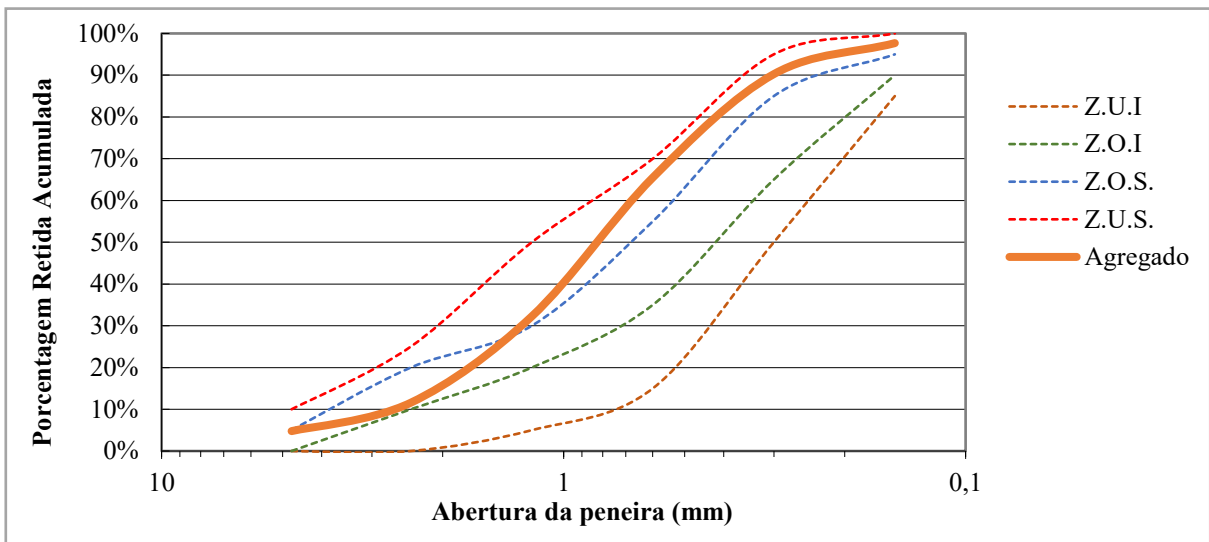
- a) determinação da densidade de acordo com a ABNT NBR 16.916:2021;
- b) determinação da composição granulométrica de acordo com a ABNT NBR 17.054:2022.

Os agregados graúdos serão caracterizados por meio dos seguintes dos ensaios:

- a) determinação da densidade e da absorção de água de acordo com a ABNT NBR 16.917:2021;
- b) determinação da composição granulométrica de acordo com a ABNT NBR 17.054:2022.

A areia apresentou massa específica na condição seca de 2,58 g/cm³. A distribuição granulométrica dos agregados está ilustrada na Figura 7. De acordo com os limites estabelecidos na ABNT NBR 7211:2022, o agregado miúdo se enquadra na zona utilizável superior com Módulo de Finura de 3,02, entre os limites de 2,9 e 3,5.

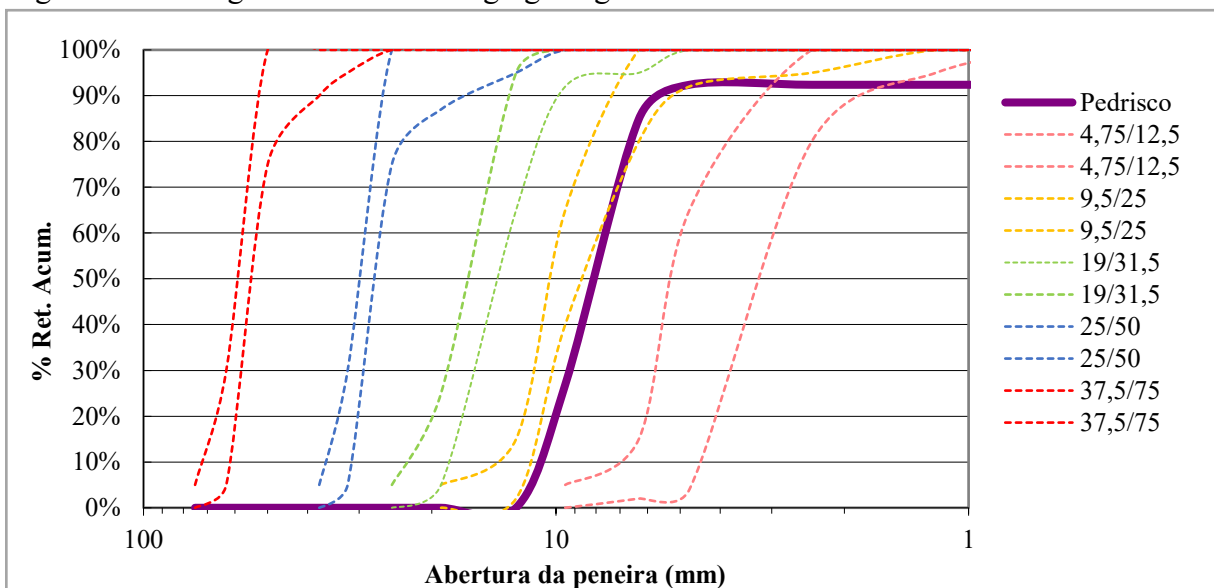
Figura 7 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborado pela autora

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos está apresentada na Figura 8. De acordo com os limites estabelecidos na ABNT NBR 7211:2022, a brita utilizada está enquadrada na faixa 4,75-12,5 mm, considerando que a dimensão máxima característica foi de 12,5 mm e o módulo de finura foi 5,81, entre os limites 5,77 e 6,15.

Figura 8 - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Elaborado pela autora

3.1.3 Aditivo

Foi utilizado um aditivo plastificante multifuncional de pega normal, que age como um agente dispersor das partículas de cimento. A dosagem do aditivo utilizada foi de 0,5% sobre a massa de cimento, mantendo-se dentro da faixa recomendada pelo fabricante, de 0,2 a 1,2% sobre a massa de cimento.

3.1.4 Água

A água utilizada para a fabricação do concreto foi proveniente da rede pública de abastecimento.

3.1.5 Armadura

As armaduras utilizadas para os CPs de concreto armado destinados ao ensaio acelerado de corrosão foram de 5mm de diâmetro e classe CA 60.

3.2 Método de Pesquisa

3.2.1 Programa experimental

O programa experimental foi dividido em cinco etapas: a primeira objetivou a caracterização física dos materiais, a limpeza das armaduras e moldagem do CPs; na segunda foi realizada a caracterização dos concretos; a terceira etapa refere-se aos ensaios de degradação acelerada, de modo isolado e de modo combinado, com medição das variáveis eletroquímicas; na quarta etapa, que ocorreu concomitantemente a terceira, foram determinadas a profundidade de penetração da frente de carbonatação e de cloretos, bem como do teor de cloretos, no decorrer dos ciclos de deterioração, na quinta e última etapa foram verificadas a perda da seção e da massa da armadura para o cálculo da perda de massa gravimétrica para comparação com a perda de massa eletroquímica. O programa experimental está apresentado na Figura 9.

Após a moldagem dos CPs, estes foram submetidos ao processo de cura por 28 dias. As normas de um modo geral indicam que os CPs devem ser armazenados em solução de hidróxido de cálcio ou em câmara úmida com 23,2°C de temperatura e umidade superior a 95%.

No entanto, a maioria das estruturas de concreto não recebem uma cura adequada, influenciando diretamente no processo de hidratação e na porosidade e permeabilidade do concreto. De forma a reproduzir as condições aplicadas nos canteiros, as amostras foram submetidas a uma cura submersa durante 6 dias e posteriormente expostas em ambiente de laboratório, até o início dos ensaios, após 28 dias.

Após a cura, apenas os CPs a serem expostos as condições de deterioração acelerada foram encaminhados à etapa de pré-condicionamento. De acordo com Pauletti (2009), o pré-condicionamento ou sazonalamento, constitui a etapa entre a cura das amostras e o início do ensaio de carbonatação, quando os CPs são submetidos ao CO₂. O processo de pré-condicionamento visa a constância de massa dos CPs, viabilizando uma distribuição balanceada da umidade no interior dos CPs, evitando a influência do grau de saturação do concreto na profundidade de carbonatação (Oliveira; Bragança; Medeiros Junior, 2022). Na presente pesquisa foram adotadas as práticas recomendadas pelo IBRACON (2021b), que segue as diretrizes da norma ISO 1920-12 de 2015. Dessa forma, no período de pré-condicionamento as amostras foram transferidas para um ambiente de laboratório com temperatura de 23 ± 2 °C e UR $60 \pm 10\%$ durante 14 dias. As temperaturas e umidades observadas estão descritas no Apêndice B. Após o pré-condicionamento foi realizada uma selagem parcial dos CPs em duas faces opostas, e nas faces superior e inferior, de modo a direcionar o fluxo dos agentes agressivos apenas pelas faces expostas.

Esse procedimento foi aplicado em todas as amostras e não apenas aquelas submetidas ao ataque de CO₂. Segundo Pauletti (2009), os ensaios acelerados podem ser utilizados em diferentes composições, para fins comparativos como parâmetro de durabilidade, desde que as condições de ensaio sejam as mesmas para todos os materiais. Portanto, todos os CPs foram expostos às mesmas condições iniciais.

Posteriormente à moldagem e à preparação das amostras, os CPs foram encaminhados para os ensaios de degradação acelerada, por ciclos de imersão e secagem, de modo isolado e de modo combinado. Os CPs de concreto expostos ao ataque de cloretos e ataque conjunto foram submetidos a ciclos de imersão em solução agressiva de cloreto de sódio a um molar, enquanto os CPs expostos à carbonatação foram imersos em água. Nos semi-ciclos de secagem, as amostras expostas ao ataque de CO₂ e ataque conjunto foram submetidas a ciclos de carbonatação acelerada em câmara continuamente alimentada com CO₂, enquanto as demais amostras foram sujeitas à secagem em ambiente de laboratório.

Ao final de cada semi-ciclo de deterioração foi realizada a medição das variáveis eletroquímicas, potencial de corrosão (E_{corr}), intensidade de corrosão (I_{corr}) e resistência ôhmica

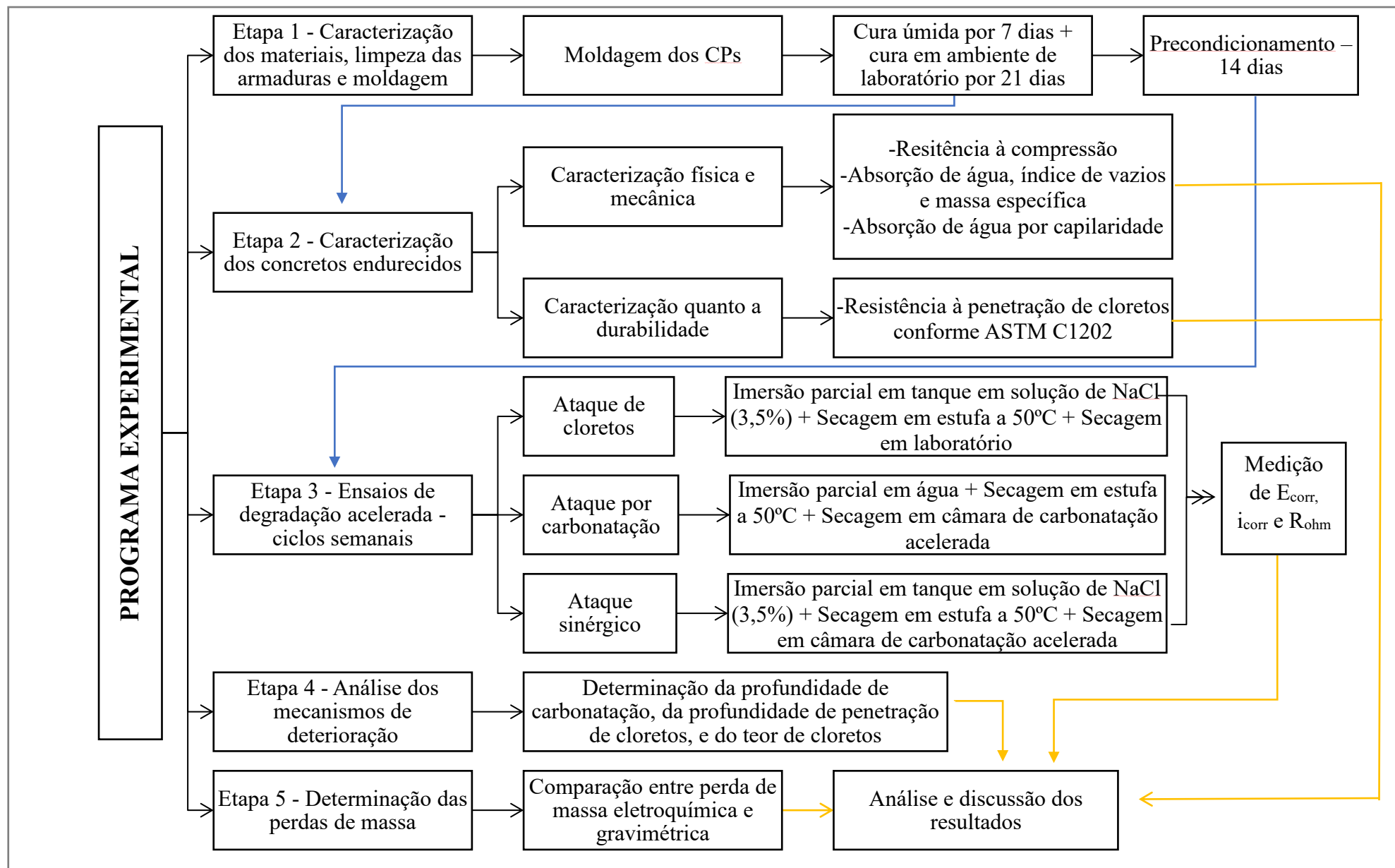
(R_{ohm}), nos CPs com armadura, com o auxílio de um potenciostato com compensação de queda ôhmica, fornecido pelo Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da UFC. O potencial de corrosão foi determinado de acordo com ASTM C876:15, enquanto a técnica eletroquímica de Resistência de Polarização (R_p) foi utilizada para se obter a taxa de corrosão (i_{corr}). O eletrodo de referência utilizado foi o de Cobre/Sulfato de cobre ($Cu/CuSO_4$).

O erro introduzido devido a uma má compensação de queda ôhmica pode ser considerável, devido à alta resistividade do concreto, subestimando a taxa de corrosão. Na presente pesquisa a correção da queda ôhmica foi feita por meio da técnica de EIS, com a determinação do parâmetro R_{ohm} correspondente à resistência elétrica da matriz do concreto. A determinação da R_{ohm} ocorreu após a estabilização do E_{corr} , para cada armadura individualmente, e foi calculada através do diâmetro do primeiro semicírculo capacitivo obtido pelo diagrama de Nyquist, o valor de R_{ohm} foi inserido no procedimento para a determinação da Resistência de Polarização Linear (RPL) para correção automática da queda ôhmica com o auxílio do software *Nova 2.1* através da função *IR drop correction*.

De forma a verificar a evolução dos fenômenos responsáveis pela deterioração das amostras, foram determinados o teor de cloretos e a profundidade da carbonatação, e ao final dos ciclos, a profundidade de penetração de cloretos, em CPs de concreto simples expostos às mesmas condições que os CPs de concreto armado, em períodos regulares.

Após o término dos ciclos de deterioração por carbonatação, cloretos e ataque conjunto, as armaduras foram removidas dos CPs de concreto e limpas de acordo com o procedimento indicado pelo IBRACON (2021a) baseado na norma ASTM G-1/03 (ASTM, 2017), descrito no Anexo A, posteriormente foram determinadas as perdas de massa gravimétrica que correspondem a diferença entre a massa da barra antes e depois do ensaio. A perda de massa eletroquímica foi calculada através da Equação 16.

Figura 9 – Fluxograma do programa experimental da pesquisa



3.2.2 Dosagem do concreto

Devido ao longo período necessário para a despassivação e aumento da profundidade de carbonatação observada em outros trabalhos, mesmo quando os CPs são submetidos a exposição acelerada, as amostras da presente pesquisa foram produzidas com o objetivo de possibilitar o avanço dos agentes agressivos, uma vez que o objetivo principal corresponde à análise do efeito do ataque sinérgico durante o processo corrosivo.

De forma a obter um concreto mais poroso que possibilite a despassivação da armadura e a progressão da corrosão durante o andamento de tempo da pesquisa, produziu-se um concreto de resistência de 20 MPa e maior relação água/cimento, igual a 0,62. Essas escolhas justificam-se, pois, uma menor relação água/cimento, conota menor porosidade, impedindo ou dificultando a penetração do CO₂ no corpo de prova (Ramezianpour; Ghahari; Esmaili, 2014).

Para a caracterização do concreto no estado fresco foi realizada a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (*slump test*), conforme ABNT NBR 16889:2020. No estado endurecido, a caracterização mecânica foi feita a partir da determinação da resistência a compressão do concreto aos 7 dias e 28 dias após a moldagem, conforme ABNT NBR 5739:2018 (Figura 10). Ainda com o objetivo de caracterizar o concreto, sob o ponto de vista da durabilidade, determinou-se resistência à penetração dos íons cloretos no concreto, de acordo com ASTM C 1202:2022 (Figura 11), a absorção de água por capilaridade conforme ABNT NBR 9779:2012 (Figura 12) e a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica conforme ABNT NBR 9778:2005 Errata 2:2009 (Figura 13).

Figura 10 - Determinação da resistência à compressão dos CPs



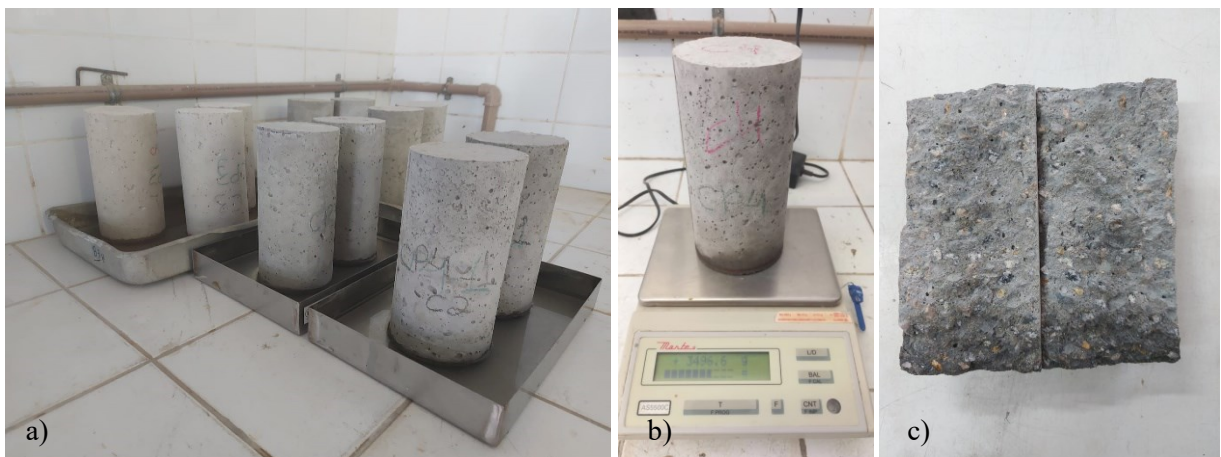
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 11 - Ensaio para determinação da resistência à penetração de cloretos



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 12 - Procedimento para determinação da absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 13 - Procedimento para determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica



Fonte: Elaborado pela autora

3.2.3 Tipos e quantidades dos corpos de prova utilizados

Para a realização dos experimentos foram necessários quatro tipos de corpos de prova, para cada um dos cimentos propostos, devido às particularidades dos ensaios. O primeiro CP foi produzido no formato cúbico com aresta de 8cm, em concreto armado, destinado ao ensaio de corrosão acelerada e medição de propriedades eletroquímicas. O segundo tipo também foi cúbico com aresta de 8cm, em concreto, porém sem armadura, destinados a determinação do teor de cloretos e da profundidade de penetração de cloretos. O terceiro tipo de CP, destinado a determinação da profundidade da carbonatação, foi prismático com seção transversal quadrada de 8cm de lado e 15cm de comprimento. O quarto tipo de CP foi feito no formato cilíndrico, com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, destinado aos demais ensaios de caracterização do concreto, conforme Figura 14.

Figura 14 – CPs utilizados na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora

As quantidades necessárias para os CPs cilíndricos foram estimadas de acordo com a normalização vigente e estão descritas na Tabela 3. Para cada tipo de cimento foram produzidos 14 CPs cilíndricos.

Os corpos de prova prismáticos foram dimensionados a partir das exigências normativas, da quantidade necessária para o desenvolvimento dos ensaios, bem como da dimensão geométrica da câmara de carbonatação disponível, tendo em vista que essa possui dimensões reduzidas. Além disso, de acordo com o manual de instruções da câmara de

carbonatação, para melhor performance é recomendado utilizar até 40% da capacidade da câmara (QUIMIS, 2020), o que reduz o volume útil da mesma. Portanto, as amostras foram pensadas para a condição mais desfavorável, que no presente trabalho são as amostras que foram expostas ao ataque de CO₂.

Para o cálculo da quantidade de CPs necessários aos ensaios de deterioração acelerada, e mais especificamente, no ensaio de carbonatação acelerada, foi considerado a existência das 3 condições de degradação para cada tipo de cimento. Na primeira, os CPs foram expostos ao ataque de cloretos, neste caso, não sendo inseridos na câmara de carbonatação, e, portanto, não interferem nas condições de limitação. Na segunda, foram consideradas as amostras sujeitas à carbonatação de forma isolada. No terceiro caso, as amostras expostas ao ataque sinérgico de cloreto e carbonatação e assim, tanto os CPs do segundo quanto do terceiro caso foram considerados para o cálculo da dimensão máxima e da quantidade de CPs.

Além das condições de exposição, foram considerados a natureza dos ensaios a serem realizados. Assim, foram necessários, para cada tipo de cimento, 2 CPs de concreto armado para a medição das variáveis eletroquímicas em cada uma das condições, 2CPs destinados à determinação do teor e da profundidade de penetração de cloretos, para as condições de ataque único de cloretos e ataque sinérgico e, 2 CPs para determinação da profundidade da carbonatação, para as condições de ataque único de CO₂ e ataque sinérgico.

Como supracitado, considerando as três condições e exposição, para cada tipo de cimento, foram necessários 6 CPs de concreto armado, 4 CPs de concreto simples para determinação da profundidade de penetração de cloretos e 4 CPs de concreto simples para determinação da profundidade da carbonatação, conforme descrito na Tabela 3.

Na câmara de carbonatação foram acondicionados, a cada ciclo, 18 CPs cúbicos, sendo 12 de concreto armado e 6 de concreto simples, e 12 CPs prismáticos de concreto simples, dispostos de forma que as faces seladas fiquem em contato, deixando as faces expostas livres para a penetração do CO₂ (Figura 15).

As dimensões internas da câmara são 50 cm de largura, 34 cm de profundidade e 40 cm de altura totalizando um volume de 68.000 cm³ (68 L), assim 40% da capacidade correspondem ao volume de 27200 cm³. Ponderando todos os fatores, para a quantidade de CPs necessária foi inviável o seguimento de todas as dimensões estabelecidas, portanto, buscou-se o equilíbrio entre atender as prescrições do IBRACON e a capacidade do equipamento disponível. Como a menor dimensão do prisma deve ser superior a quatro vezes a o DMC do agregado graúdo, neste caso de 12,5 mm, a aresta do CP foi de 80 mm.

Tabela 3 - Quantidade e tipos de CPs de acordo com as condições de exposição e ensaios

| Condição | Quantidade CPs por tipo de cimento |
|---|------------------------------------|
| CP cilíndrico – 10 x 20 cm | |
| Resistência à compressão - 7 dias | 2 |
| Resistência à compressão - 28 dias | 2 |
| Absorção de água, índice de vazios e massa específica – 28 dias | 2 |
| Absorção por capilaridade – 28 dias | 4 |
| Difusão de cloretos – 28 dias | 4 |
| Total de CPs | 42 ao total – (3 cimentos) |
| CP cúbico (8x8x8cm) de concreto com armadura - Corrosão acelerada | |
| Cloretos | 2 |
| Carbonatação | 2 |
| Ataque conjunto | 2 |
| Total de CPs | 18 ao total – (3 cimentos) |
| Teor de Cloretos e profundidade de cloretos - CP cúbico (8x8x8cm) de concreto sem armadura | |
| Cloretos | 2 |
| Ataque conjunto | 2 |
| Total de CPs | 12 ao total – (3 cimentos) |
| Profundidade de carbonatação – CP prismático (8x8x15cm) de concreto sem armadura | |
| Carbonatação | 2 |
| Ataque conjunto | 2 |
| Total de CPs | 12 ao total – (3 cimentos) |

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 15 - Disposição dos CPs na câmara de carbonatação



Fonte: Elaborado pela autora

3.2.4 *Moldagem dos CPs*

Devido a quantidade de corpos de prova necessários e a capacidade reduzida da betoneira disponível, os traços de concreto, para cada tipo de cimento, foram produzidos em duas etapas. Assim, para a realização dos ensaios, os CPs eram escolhidos em quantidades iguais para cada batelada, de acordo com a necessidade do ensaio.

O concreto produzido apresentou consistência seca, sendo necessário a utilização de energia mecânica para o correto adensamento do concreto. Dessa forma, os CPs foram produzidos em duas camadas vibradas por 15 segundos cada, esse procedimento foi cronometrado de forma a evitar variação na energia de compactação dos CPs, o que influenciaria em suas propriedades.

As amostras de concreto armado foram confeccionadas após a limpeza das barras pelo procedimento indicado pelo IBRACON (2021a), baseado na norma ASTM G-1/03 (ASTM, 2017), conforme descrito no Apêndice A. Após a limpeza, as massas iniciais das barras foram aferidas em uma balança analítica de precisão, para posterior determinação da perda de massa gravimétrica. As armaduras utilizadas possuíam Diâmetro Nominal (DN) de 5 mm, localizadas em cada face do CP, posicionadas de modo a obter um cobrimento de concreto de 10 mm nas faces expostas ao fluxo de CO₂ (Figura 17).

As extremidades das armaduras foram rosqueadas para possibilitar a sua fixação as fôrmas e facilitar a moldagem dos CPs. A delimitação da área de deterioração da armadura, com 40 mm de comprimento e área de 6,28 cm², foi executada com a aplicação de tinta anticorrosiva (Figuras 16-a e 16-b). As áreas sujeitas a corrosão foram limitadas uma vez que o conhecimento da área exposta é necessário para o cálculo da taxa de corrosão.

Figura 16 – Tinta anticorrosiva utilizada para delimitação da área sujeita à corrosão



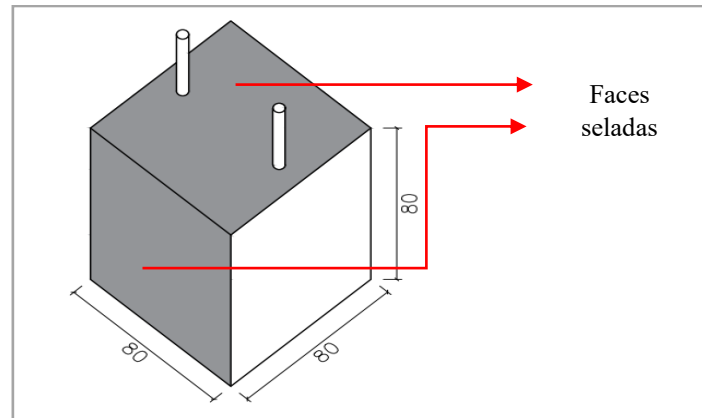
Fonte: Elaborado pela autora

As armaduras foram etiquetadas de forma a garantir a correta identificação durante os procedimentos de limpeza, pesagem, moldagem e medição das propriedades eletroquímicas. A convenção utilizada para identificação das barras foi a seguinte:

- a) o primeiro número indica o tipo de cimento utilizado no traço de concreto no qual as barras foram inseridas;
 - 3: CPIII-32-RS;
 - 4: CPIV-32-RS;
 - 5: CPV-ARI;
- b) as duas letras seguintes indicam o tipo de ataque a que a amostra foi submetida;
 - CL: ataque único de cloretos;
 - CO: ataque único por carbonatação;
 - AC: ataque conjunto entre cloretos e carbonatação;
- c) o segundo número indica em qual CP a armadura foi inserida (total de 2 CPs);
- d) a última letra indica de que lado do CP a armadura foi colocada (lado A ou B);

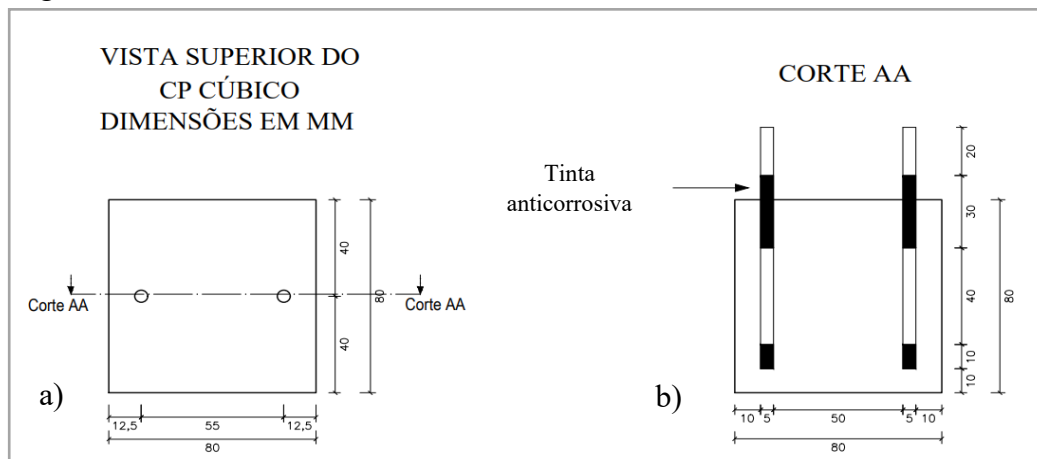
Posteriormente a moldagem dos CPs, os CPs foram destinados a cura e ao pré-condicionamento, as extremidades das armaduras expostas foram conectadas aos fios elétricos e, após essas etapas, foi feita a selagem parcial dos CPs em duas faces opostas, e nas faces superior e inferior com adesivo epóxi, de modo a direcionar o fluxo dos agentes agressivos.

Figura 17 – Corpo de prova para o ensaio de corrosão acelerada



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 18 – Posicionamento das barras no CP



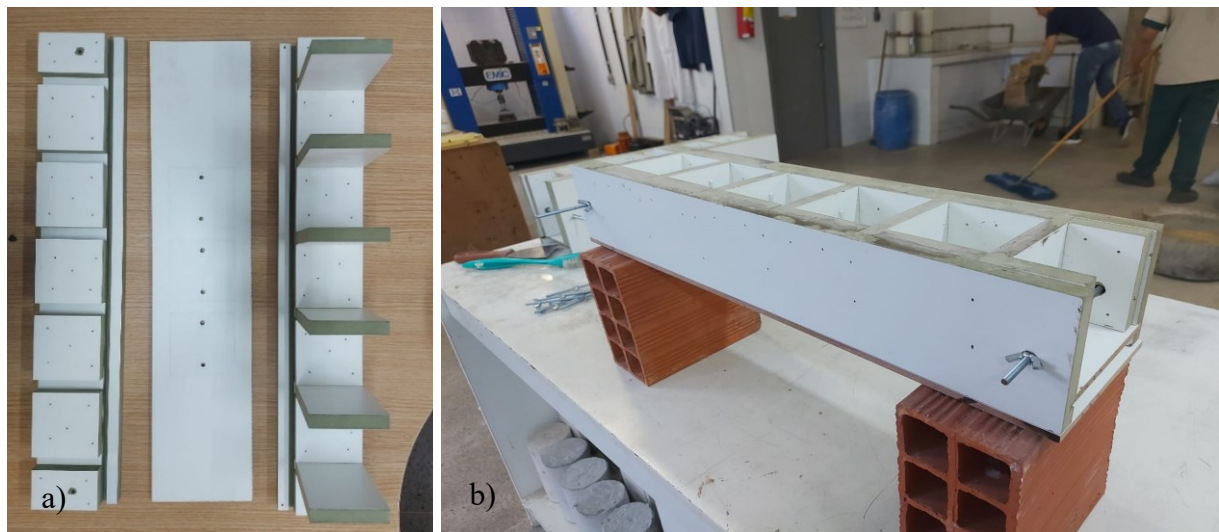
Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com o IBRACON (2021a), o espaçamento entre armaduras de um mesmo CP deve ser de duas vezes o DN, bem como deve ser igual ou superior ao DMC do agregado e a porção exposta de armadura no CP deve ser pelo menos um terço do comprimento. Como pode ser observado nas Figuras 18-a e 18-b, as recomendações foram atendidas.

A escolha da espessura do cobrimento se deu considerando a necessidade de observação do processo corrosivo durante o tempo limitado da pesquisa, uma vez que a escolha por cobrimentos superiores poderia retardar o início da corrosão por um período relativamente longo, como foi observado em outros trabalhos, como na pesquisa de Santos (2019), onde concretos com relação a/agn igual a 0,56 apresentaram frente de carbonatação de 1,5mm, somente após 140 dias na câmara de CO_2 . Ou seja, a profundidade de carbonatação esperada não ultrapassaria o cobrimento do concreto para o tempo de ensaio.

Para atingir as dimensões projetadas para os CPs prismáticos foram utilizadas fôrmas de madeira desmontáveis para facilitar o desmolde, de acordo com as Figuras 19-a e 19-b. As fôrmas destinadas às amostras de concreto armado foram projetadas com um fundo extra para que as barras de aço fossem rosqueadas, e assim não houvesse movimentação das barras durante a moldagem. Na moldagem dos CPs cilíndricos foram utilizados moldes metálicos disponíveis no LMCC.

Figura 19 - Formas para moldagem dos CPs



Fonte: Elaborado pela autora

3.2.5 *Ensaio de deterioração acelerada*

O método aplicado para indução de corrosão acelerada devido ataque por cloretos e pela carbonatação pretendeu analisar o efeito individual de cada ação de deterioração, bem como o efeito sinérgico entre elas. Dessa forma, as amostras prismáticas de concreto armado foram submetidas à ação desses agentes agressivos de três formas distintas: uma parcela dos CPs foi submetida apenas a ação de cloretos, uma segunda parcela foi submetida a ação exclusiva da carbonatação do concreto e uma terceira parcela foi exposta ao ataque sinérgico dos dois mecanismos.

As condições de ensaio foram as mesmas para todas as amostras, submetidas a ciclos de degradação similares, considerando os mesmos períodos de umedecimento e secagem para todas as condições de exposição durante um ciclo.

3.2.5.1 Ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos

De acordo com Meira e Ferreira (2019), no cenário internacional, a forma mais empregada de introdução de cloretos em ensaios acelerados é a adição salina à massa de concreto, em 31% das pesquisas. No panorama nacional, a forma mais empregada envolve os ensaios com mecanismo de transporte por ação conjunta de absorção e difusão, representando 61% das publicações, com os ciclos de imersão e secagem prevalecendo. Nestes ciclos, a sucção capilar prevalece nas camadas superficiais do concreto e nas camadas mais profundas, também ocorre difusão. Esse tipo de ensaio caracteriza-se por submeter as amostras a períodos de imersão, parcial ou total em solução agressiva, geralmente em solução de 3,5% de NaCl, devido à sua proximidade com a concentração salina média dos mares, seguido por secagem em ambiente de laboratório, câmara climática ou estufa. A condição de imersão parcial em solução de NaCl propicia uma maior penetração destes agentes agressivos.

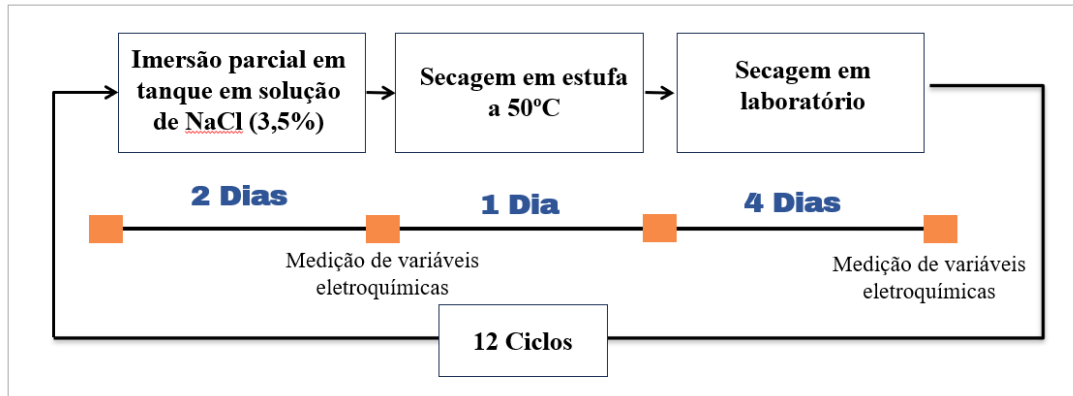
Na presente pesquisa, os CPs foram imersos parcialmente em tanque com solução de NaCl, em uma concentração de 3,5% por um período de 2 dias (Figura 20-a), seguido por 1 dia de secagem em estufa a 50 °C (Figura 20-b), e postos em ambiente de laboratório à temperatura controlada por 4 dias (Figura 20-c), totalizando 5 dias de secagem, conforme Figura 21, repetindo-se essa sequência dos semiciclos sucessivamente durante 12 ciclos completos.

Figura 20 - Ensaio acelerado de corrosão induzida por cloretos



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 21 - Ciclo de deterioração por ataque de cloretos



Fonte: Elaborado pela autora

3.2.5.2 Ensaio acelerado de corrosão induzida por carbonatação

As amostras foram submetidas ao processo de carbonatação com o auxílio de uma câmara microprocessadora de CO₂ da fabricante Quimis modelo Q316C1. A câmara possui capacidade de 68 litros, sendo continuamente alimentada com CO₂ com faixa de 0% a 20%.

A velocidade de carbonatação está diretamente relacionada à concentração de CO₂, à umidade e à temperatura. Em concentrações superiores a 20% não há alterações significativas nas taxas de carbonatação. Em pesquisa realizada por Cui *et al.*, (2015), os resultados experimentais mostraram que, sob a mesma idade de carbonatação, o aumento da profundidade de carbonatação foi alto quando as amostras de concreto foram expostas a concentrações de CO₂ de 2% a 20% e baixo quando as amostras foram expostas a concentrações de CO₂ de 50% a 100%. Ou seja, a profundidade de carbonatação do concreto aumentou com o aumento da concentração de CO₂, porém quando a concentração ultrapassa 20%, não há um grande aumento da profundidade de carbonatação no concreto. Isso pode ser explicado devido à alteração da microestrutura causada pela carbonatação do concreto. Visando uma padronização, o IBRACON (2021b) recomenda o atendimento dos requisitos da norma ISO 1920-12 de 2015, com a utilização de um teor de CO₂ igual a 3%±0,5%, no entanto, para que o objetivo do trabalho fosse alcançado, seria necessário que a carbonatação ocorresse em uma velocidade mais elevada, portanto, foi adotado um teor de 20%.

A umidade relativa ótima para a carbonatação fica entre 50% e 70%, enquanto a corrosão somente evolui rapidamente em umidades mais elevadas (Neville, 2016). Recomenda-se que a umidade no interior da câmara em locais quentes como o Brasil, seja 65±5% (IBRACON, 2021b).

Em ambientes com temperaturas entre 20 °C e 40 °C, o principal controlador da carbonatação é a difusão. A influência da temperaturas nessa faixa não é significativa. Recomenda-se em locais quentes como Fortaleza, que a temperatura no interior da câmara seja 27 ± 2 °C (IBRACON, 2021b).

A câmara de carbonatação foi instalada em um ambiente climatizado do LPC, de forma a propiciar um melhor controle das condições ambientais. A temperatura e a umidade relativa no interior da câmara de carbonatação foram aferidos com o auxílio de um termo-higrômetro, conforme Figura 22. Observou-se que as temperaturas foram superiores ao intervalo de 27 ± 2 °C durante todo o período de deterioração, porém foram inferiores ao limite de 40 °C. Supõe-se que a vedação da câmara impossibilitou a redução da temperatura inicial dos CPs. A UR foi superior ao limite de 70% até o 8º ciclo de deterioração. Isso foi decorrente do seguimento da recomendação do fabricante de manter um recipiente com água no interior da câmara, como os CPs já possuíam um nível de umidade elevada a UR no interior da câmara só reduziu após a retirada deste recipiente, porém, o teor de umidade não impediu a carbonatação das amostras nos ciclos iniciais.

Para a definição do ciclo de degradação deve-se considerar que a corrosão somente evolui rapidamente em umidades mais elevadas que a umidade ótima da carbonatação, ficando entre 70% e 80%, e provavelmente não há corrosão em concretos secos em umidade relativa inferior a 60% e em concreto totalmente imerso em água. A ocorrência dessas umidades relativas é possível quando o concreto é exposto a longos períodos de molhagem e secagem alternados (Neville, 2016).

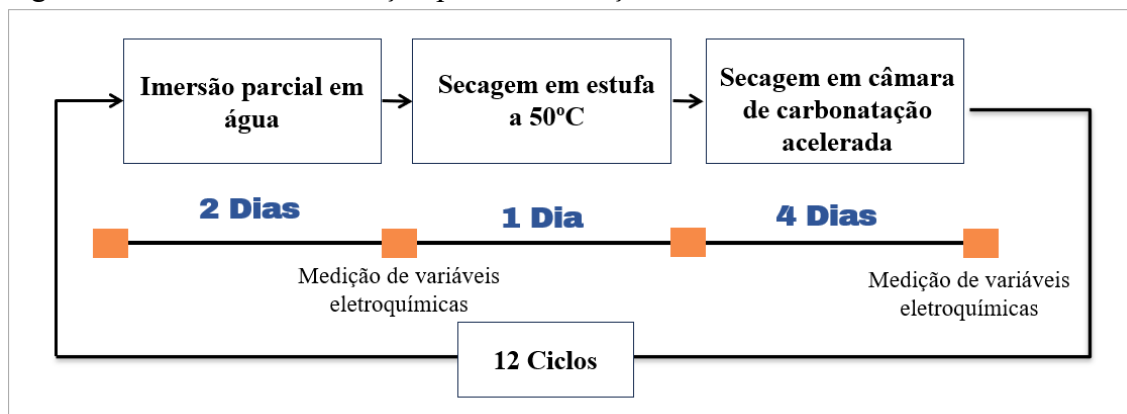
Figura 22 – Termo-higrômetro utilizado para aferição da T e UR



Fonte: Elaborado pela autora

De forma a atender as recomendações supracitadas e manter uma padronização com as demais condições de deterioração, o ciclo de carbonatação acelerada foi formado por 2 dias em imersão parcial em água, enquanto as amostras submetidas ao ataque de cloretos estavam parcialmente imersas em solução de NaCl. Seguido por 1 dia de secagem em estufa a 50 °C, e posteriormente levados à câmara de carbonatação por 4 dias, repetindo-se essa sequência dos semiciclos sucessivamente durante 12 ciclos completos, conforme a Figura 23.

Figura 23 - Ciclo de deterioração por carbonatação



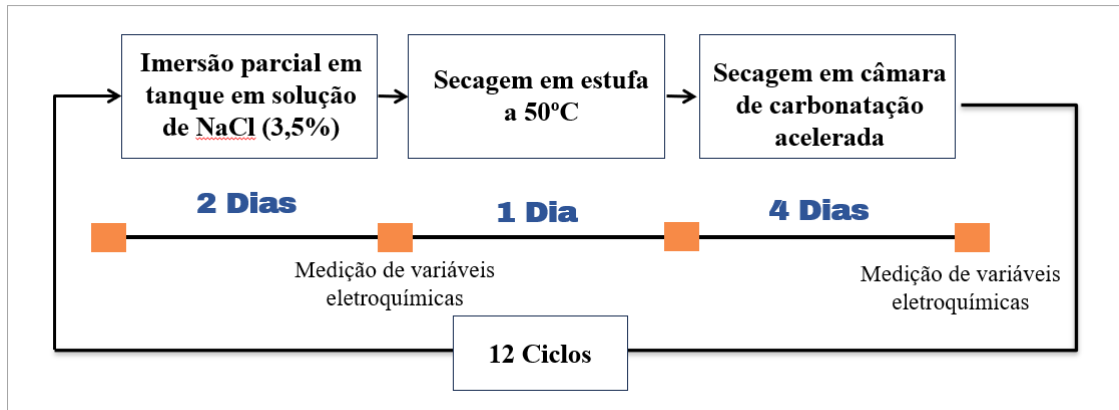
Fonte: Elaborado pela autora

3.2.5.3 Ensaio acelerado de corrosão pelo ataque sinérgico de carbonatação e cloretos

Para simular a ocorrência da carbonatação e do ataque de cloretos simultaneamente, as amostras foram submetidas aos dois processos de deterioração alternadamente, entre imersão em solução de NaCl a 3,5% e secagem em câmara de carbonatação acelerada com concentração de CO₂ igual a 20%, em ambiente com temperatura controlada.

Com o objetivo de promover a compatibilidade entre as formas de exposição, os CPs foram imersos parcialmente em tanque com solução de NaCl, numa concentração de 3,5%, por um período de 2 dias, seguido por 1 dia de secagem em estufa a 50 °C, e posteriormente colocados em câmara de carbonatação acelerada por 4 dias (Figura 24), repetindo-se essa sequência dos semiciclos sucessivamente durante 12 ciclos completos. Durante o período em que os CPs foram sujeitos ao ataque de CO₂, as amostras unicamente expostas ao ataque de cloretos, foram expostos a ambiente controlado de laboratório.

Figura 24 - Ciclo de deterioração por ataque conjunto

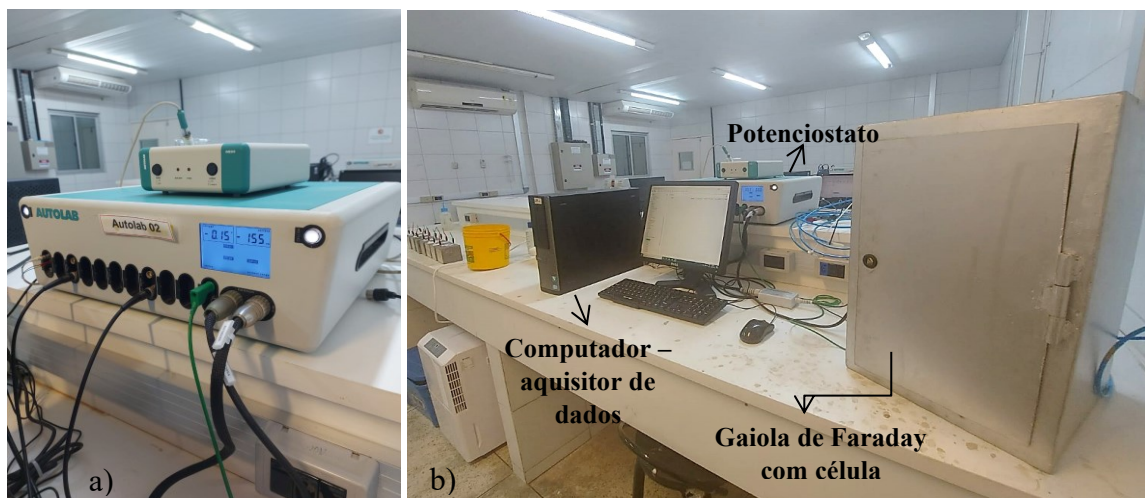


Fonte: Elaborado pela autora

3.2.5.4 Medição das variáveis eletroquímicas

Para identificar o início e monitorar a progressão do processo corrosivo na armadura, foram medidas a cada semiciclo saturado (2 dias de imersão) e seco (5 dias de secagem), as variáveis eletroquímicas, potencial de corrosão (E_{corr}), intensidade de corrosão (I_{corr}) e resistência ôhmica (R_{ohm}), totalizando 2 medições semanais em cada barra. Foi utilizado um potenciostato AUTOLAB PGSTAT 302N, com compensação de queda ôhmica disponibilizado pelos integrantes do LPC. O potenciostato foi conectado a um computador para armazenamento e processamento dos dados, com o auxílio do *software* Nova 2.1 (Figura 25).

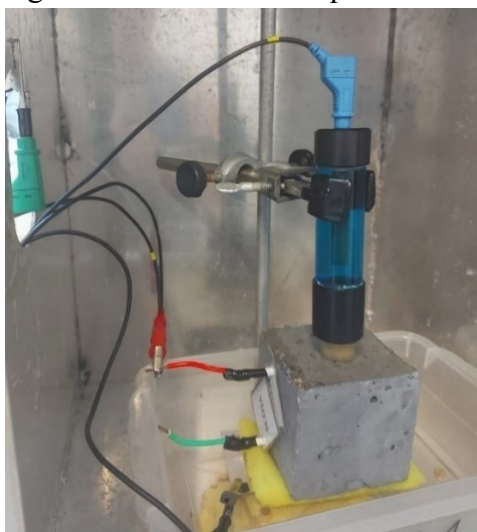
Figura 25 – Potenciostato AUTOLAB PGSTAT 302N



Fonte: Elaborado pela autora

A célula eletroquímica foi formada pelo eletrodo de Cobre/sulfato de cobre (ESC), Cu/CuSO_4 , como eletrodo de referência, chapas de inox como contra-eletrodo, e as armaduras inseridas nos CPs de concreto foram os eletrodos de trabalho. De forma a melhorar o contato entre o eletrodo de referência e o corpo-de-prova, bem como, entre a chapa de inox e o corpo-de-prova utilizou-se uma esponja úmida com água destilada. O eletrodo de referência foi posicionado no meio do CP, durante todas as leituras, com os conectores instalados na armadura mais próxima ao eletrodo de referência. Assim, para se fazer as medições das variáveis da armadura na face oposta, os CPs eram virados reposicionando-se o eletrodo de referência (Figura 26).

Figura 26 – Célula eletroquímica



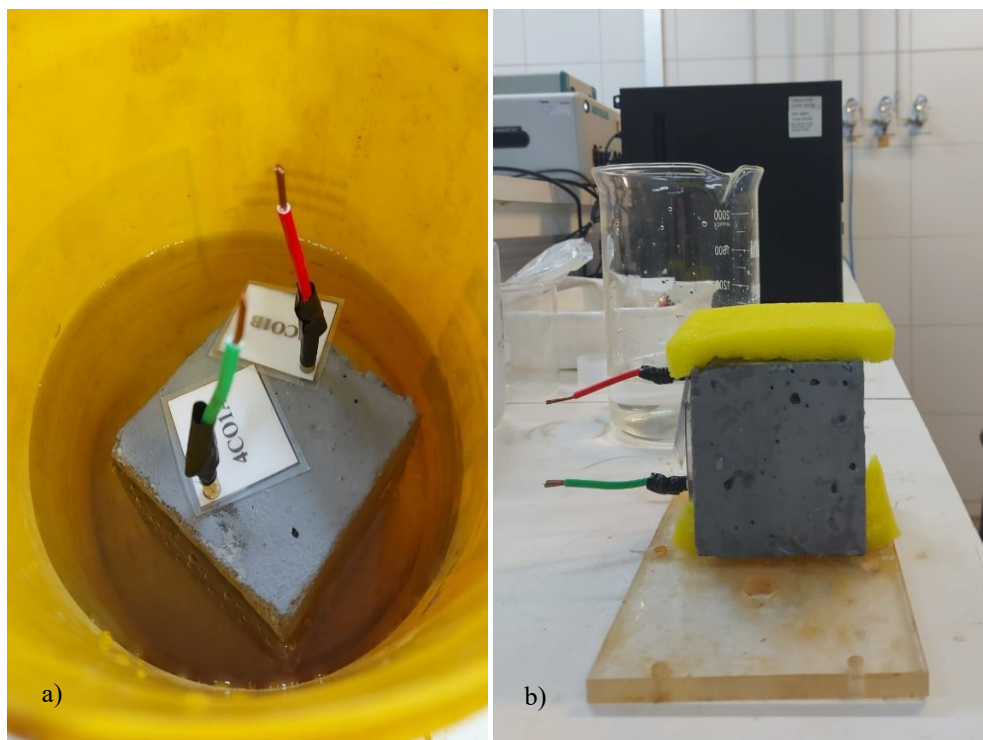
Fonte: Elaborado pela autora

O valor médio das variáveis medidas foi calculado a partir dos quatro valores disponíveis (2 CPs com 2 barras em cada) para cada tipo de cimento, em cada condição de deterioração.

A medição do potencial de corrosão (E_{corr}) foi realizada de acordo com a ASTM C876:15. De acordo com esta norma, se o valor medido do potencial de corrosão muda ou flutua com o tempo é necessário o pré-umedecimento da amostra por um período tal que a leitura da tensão seja estável, ou seja, com variação máxima de 0,02 V, quando observada por pelo menos 5 min. Assim, foi adotado um período de imersão da amostra por 30 s em água destilada, de forma que ao se medir o potencial por 5 minutos, não foi observada uma variação maior do que 20 mV. As amostras eram umedecidas antes de iniciar a medição das propriedades eletroquímicas, e aguardavam o tempo de estabilização do potencial em contato com duas

esponjas com água destilada, para evitar a secagem da superfície enquanto o CP anterior estava sendo aferido, conforme Figura 27-a e 27-b.

Figura 27 – Pré-umedecimento da amostra



Fonte: Elaborado pela autora

Após a determinação do potencial de corrosão foi medido o parâmetro R_{ohm} , correspondente à resistência elétrica da matriz do concreto, por meio da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), para a correção da queda ôhmica, uma vez que uma má compensação desse efeito pode influenciar nos resultados, subestimando a taxa de corrosão. A determinação da R_{ohm} ocorreu após a estabilização do E_{corr} , para cada armadura individualmente, e foi calculada através do diâmetro do primeiro semicírculo capacitivo obtido pelo diagrama de Nyquist, onde posteriormente o valor de R_{ohm} foi inserido no procedimento para a determinação da Resistência de Polarização Linear (RPL) para correção automática da queda ôhmica com o auxílio do *software Nova 2.1* através da função *IR drop correction*.

A técnica eletroquímica de Resistência de Polarização Linear (RPL) foi utilizada para se obter a taxa de corrosão (i_{corr}), dividindo-se a corrente I_{corr} medida pela área inicialmente polarizada ($6,28 \text{ cm}^2$). Utilizou-se uma polarização anódica de 10 mV, em relação ao potencial de corrosão, com uma velocidade de varredura de 10 mV/minuto. O valor de B foi adotado de acordo com os valores estabelecidos na literatura, ou seja, 52 mV quando a barra apresentava

passividade, ou seja, com valores de potencial mais positivos que -350 mV (ESC), e de 26 mV quando a barra apresentava estado ativo de corrosão, quando o potencial de corrosão medido pelo eletrodo de referência era mais negativo que -350 mV (ESC).

Para determinação do período de início da corrosão adotou-se o critério de despassivação da armadura pautado na indicação simultânea do potencial de corrosão mais eletronegativo que -350 mV, indicando probabilidade de corrosão superior a 90%, e da densidade de corrente de corrosão maior que o intervalo de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

A variação de massa (VM) dos CPs foi mensurada a cada semiciclo, usando-se uma balança eletrônica de precisão para avaliação do processo corrosivo. A umidade superficial (US) das amostras foi determinada ao final dos ciclos secos com o auxílio de um umidímetro. De forma resumida, as medições ocorreram após o período de cura de acordo com a seguinte sequência:

- a) condicionamento em ambiente de laboratório por 14 dias;
- b) medição inicial das variáveis: E_{corr} , I_{corr} , R_{ohm} e VM;
- c) imersão parcial em água ou solução NaCl por 2 dias;
- d) medição das variáveis: E_{corr} , I_{corr} , R_{ohm} e VM – 1º Ciclo Saturado;
- e) secagem em estufa a 50°C por 1 dia;
- f) secagem em ambiente de laboratório ou câmara de carbonatação por 4 dias;
- g) medição das variáveis: E_{corr} , I_{corr} , R_{ohm} , VM e US – 1º Ciclo Seco;
- h) imersão parcial em água ou solução NaCl por 2 dias (2º ciclo);
- i) repete-se o processo até o final dos 12 ciclos completos.

3.2.6 Ensaios complementares para compreensão do avanço dos agentes de deterioração

3.2.6.1 Determinação do teor de cloretos livres nas argamassas

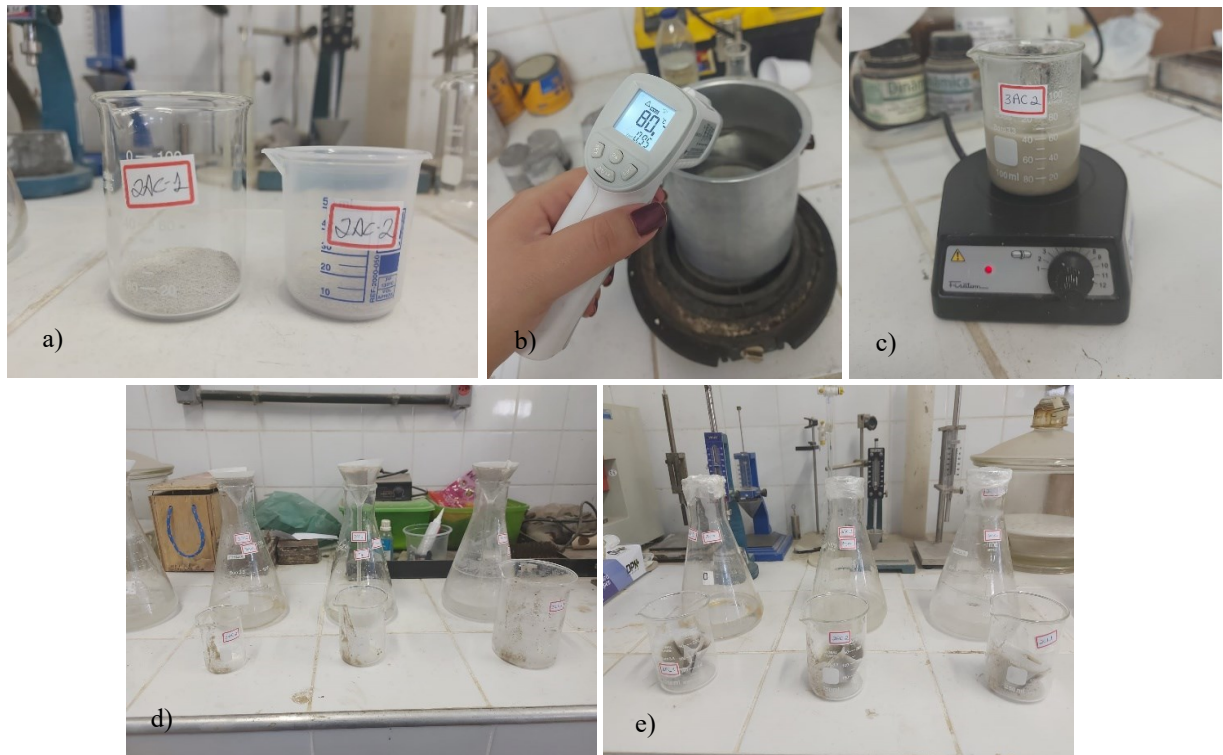
Conforme citado no item 3.2.3, foram produzidos CPs cúbicos de concreto sem armadura, expostos aos ciclos de degradação nas mesmas condições que os CPs de concreto armado, para a análise do desenvolvimento dos fenômenos por meio da determinação periódica das profundidades de penetração de cloretos, e da carbonatação, bem como do teor de cloretos.

O teor de cloretos foi determinado após o 5º e o 12º ciclos de deterioração, para a profundidade 10 mm, referente ao cobrimento do concreto, por meio das prescrições descritas na NBR 9917 (ABNT, 2022), através do procedimento de determinação de cloretos solúveis pelo analisador de íons – método da curva de calibração (extrapolação).

A coleta das amostras foi feita por meio da perfuração dos CPs até a profundidade desejada, nas faces expostas ao ingresso de cloretos, de forma a pulverizar o concreto, gerando pó suficiente para a coleta de aproximadamente 10 g de amostra (Figura 28-a). No 5º ciclo a amostra foi retirada de um lado do CP, sendo submetido aos demais ciclos de deterioração. Após o 12º ciclo, a amostra foi retirada da outra face do corpo-de-prova, para a realização de novos ensaios. O procedimento utilizado para preparação da solução está apresentado na Figura 28 e a configuração para medição dos potenciais está representada na Figura 29.

Os resultados médios finais foram obtidos a partir da média de duas determinações em cada CP, ou seja, duas determinações para o CP da primeira batelada e duas para o CP da segunda batelada.

Figura 28 – Extração de sais solúveis



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 29 – Configuração para determinação dos cloretos



Fonte: Elaborado pela autora

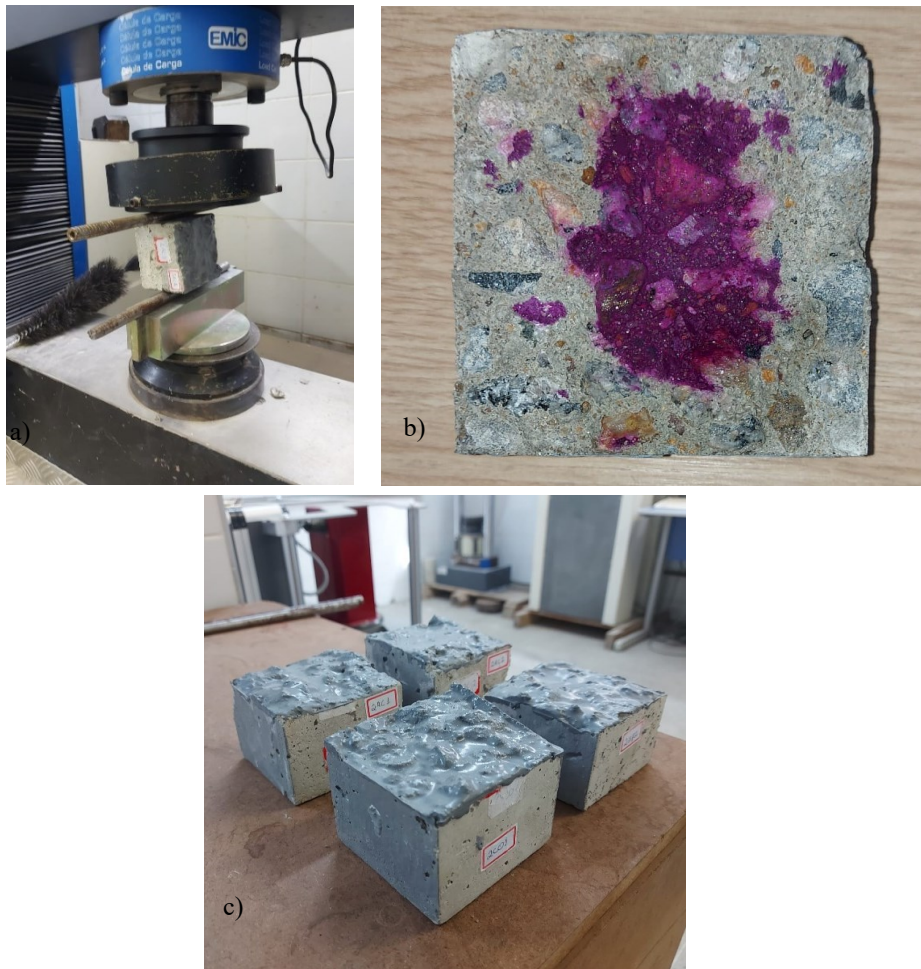
3.2.6.2 Determinação da profundidade de carbonatação

A profundidade de carbonatação foi determinada após o 5º, 9º e 12º ciclos conforme os procedimentos indicados pelo IBRACON (2021b). Para este fim foram produzidos 2 CPs prismáticos com seção transversal quadrada de aresta de 80 mm e comprimento de 150 mm, para cada tipo de cimento, submetidos à carbonatação única e ao ataque conjunto, nas mesmas condições que os CPs de concreto armado.

Como na presente pesquisa este foi um ensaio de caráter destrutivo, os CPs foram produzidos de forma a possibilitar a retirada de uma fatia de aproximadamente 5cm de comprimento em cada medição. As amostras foram obtidas fraturando-se o CP em tração por flexão diametral (Figura 30-a), após cada período de exposição, seguida da aspersão de uma solução indicadora de pH de fenolftaleína (Figura 30-b). Após o contato da solução com a região não carbonatada, há uma mudança de cor em função do pH, para uma coloração magenta, mantendo a região carbonatada, de pH inferior ao ponto de viragem, com a mesma coloração do concreto (IBRACON, 2021b). A superfície fraturada do CP restante foi selada com resina epóxi bicomponente e destinada aos demais ciclos de deterioração (Figura 30-c).

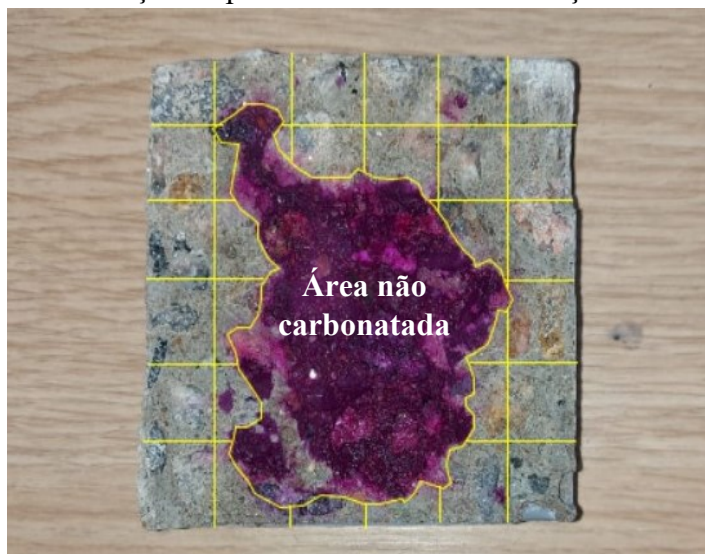
A avaliação das medidas de profundidade carbonatada do concreto e de área da seção transversal carbonatada dos CPs foi feita com o auxílio de um *software* de tratamento de imagens, *ImageJ*. As profundidades foram medidas a cada 1,33 cm representadas pelas linhas amarelas na Figura 31, totalizando 5 medições individuais em cada lado do CP. As médias foram calculadas a partir dos valores obtidos para as duas amostras de cada concreto, em cada condição de degradação, totalizando 40 valores a serem considerados.

Figura 30 – Procedimento para determinação da profundidade de carbonatação



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 31 – Corpo de prova analisado para determinação da profundidade de carbonatação



Fonte: Elaborado pela autora

3.2.6.3 Determinação da profundidade de penetração de cloretos

A avaliação qualitativa da profundidade de penetração de cloretos no concreto ao final do 12º ciclo, foi obtida para os CPs cúbicos (8x8x8 cm) sem armadura, expostos ao ataque conjunto e ao ataque de cloretos, nas mesmas condições que os CPs com armadura inserida, por meio da aspersão de uma solução de nitrato de prata sobre a superfície fraturada do concreto. Como este é um ensaio de caráter destrutivo, os CPs foram primeiramente destinados à retirada da amostra para determinação do teor de cloretos e posteriormente ao ensaio de determinação de profundidade de penetração de cloretos.

O nitrato de prata reage com os cloretos livres presentes no concreto, formando uma região esbranquiçada com precipitação de cloreto de prata. Na região livre de cloretos forma-se uma coloração de tom marrom. Essa reação permite mensurar a profundidade da frente de cloretos (IBRACON, 2021d).

A estimativa das medidas da profundidade de penetração de cloretos no concreto e da área da seção transversal dos CPs contaminada por cloretos foi feita com o auxílio do *software ImageJ*, de tratamento de imagens, as profundidades foram medidas a cada 1cm representadas pelas linhas amarelas na Figura 32, totalizando 7 medições individuais em cada lado do CP. As médias foram calculadas a partir dos valores obtidos para duas amostras de cada concreto em cada condição de deterioração.

Figura 32 – Corpo de prova analisado para determinação da profundidade de penetração de cloretos



Fonte: Elaborado pela autora

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, para cada tipo de cimento e condição de deterioração, a evolução do potencial de corrosão (E_{corr}), da taxa de corrosão (i_{corr}), da resistência ôhmica (R_{ohm}), da variação de massa e da umidade superficial. A média foi calculada a partir dos quatro valores existentes para as variáveis em estudo, sendo retirados os valores considerados espúrios.

Além das propriedades eletroquímicas, serão apresentados os resultados para os ensaios complementares de profundidade de carbonatação, teor de cloretos e profundidade de penetração de cloretos. Para a determinação destes dados, em cada ensaio, foram utilizados dois CPs de concreto simples, sem armadura, para cada tipo de cimento e condição de deterioração, de forma que todos os resultados foram obtidos a partir da média entre duas determinações.

Os resultados dos ensaios voltados para a caracterização do concreto quanto a sua durabilidade também serão abordados neste tópico. Os ensaios realizados para este fim foram: absorção por capilaridade, absorção por imersão, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão e resistência à penetração de cloretos. Nestes experimentos foram utilizadas amostras cilíndricas de concreto simples (10x20 cm), para cada traço de concreto, de forma que todos os resultados foram obtidos a partir da média entre duas ou mais determinações, a depender do ensaio.

Após os ciclos de deterioração, as armaduras foram removidas para a determinação da perda de massa gravimétrica, e os resultados comparados à perda de massa eletroquímica, conforme tópico 2.5.6.

4.1 Apresentação e análise dos resultados

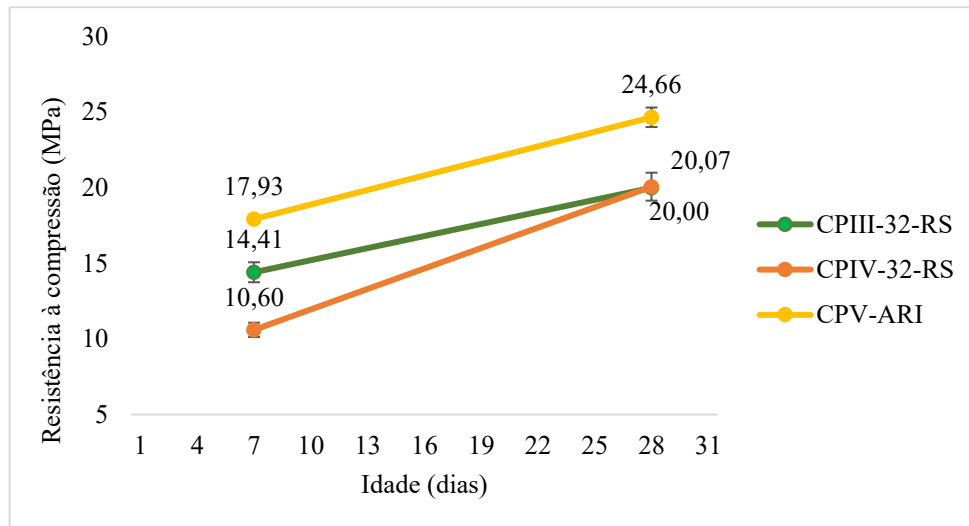
4.1.1 *Ensaio de caracterização do concreto*

Para uma maior compreensão do comportamento apresentado pelas armaduras imersas em cada traço de concreto durante os ensaios de deterioração acelerada, foram realizados ensaios de caracterização do concreto. Os resultados relativos a cada ensaio serão apresentados neste item e discutidos no item 4.2.

4.1.1.1 Resistência à compressão

Na Figura 33 estão apresentados os valores médios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, para CPs de cilíndricos de concreto, sujeitos às mesmas condições de cura que as demais amostras.

Figura 33 – Resistência à compressão do concreto



Fonte: Elaborado pela autora

Através dos resultados apresentados na Figura 33 verifica-se que embora os concretos tenham sido produzidos com cimentos de mesma classe de resistência e com o mesmo traço, as resistências finais aos 28 dias diferiram.

Os concretos contendo CPIII-32-RS e CPIV-32-RS desenvolverem a resistência esperada aos 28 dias de aproximadamente 20 Mpa. Salienta-se que o CPIII-32-RS apresentou resistência mais alta aos 7 dias em comparação ao CPIV-RS, porém houve um aumento de 38,8% de resistência entre medições para o primeiro cimento enquanto o CPIV-32-RS apresentou um crescimento de 89,3%, igualando as resistências aos 28 dias. Este comportamento era esperado, uma vez que cimentos pozolânicos desenvolvem resistências mais lentamente que os cimentos com escória, enquanto a escória contribui consideravelmente para a resistência aos sete dias, um cimento pozolânico apresenta um ganho de resistência apenas após esse período (Mehta; Monteiro, 2008).

O concreto produzido com CPV-ARI exibiu maiores resistências nas duas idades, sendo mais expressiva a resistência aos 7 dias, comparativamente aos demais cimentos houve um menor aumento de resistência entre medições, em torno de 37,5%. Este resultado era

esperado, uma vez que é uma característica deste tipo de cimento a ocorrência de maiores resistências iniciais. O cimento em questão possui um teor mínimo de adições minerais, sendo esta exclusivamente o filer calcário (no máximo 10 %), o aumento de resistência pode ser explicado pela menor finura exigida para a comercialização do material, tendo como consequência o aumento da reatividade com a água e intensificando o desenvolvimento de resistência nos primeiros dias.

4.1.1.2 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

A apresentação dos resultados médios referentes a absorção por imersão, índice de vazios e massa específica em CPs cilíndricos de concreto, de acordo com as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2009) pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4 - Absorção, índice de vazios e massa específica para concretos produzidos com cada tipo de cimento

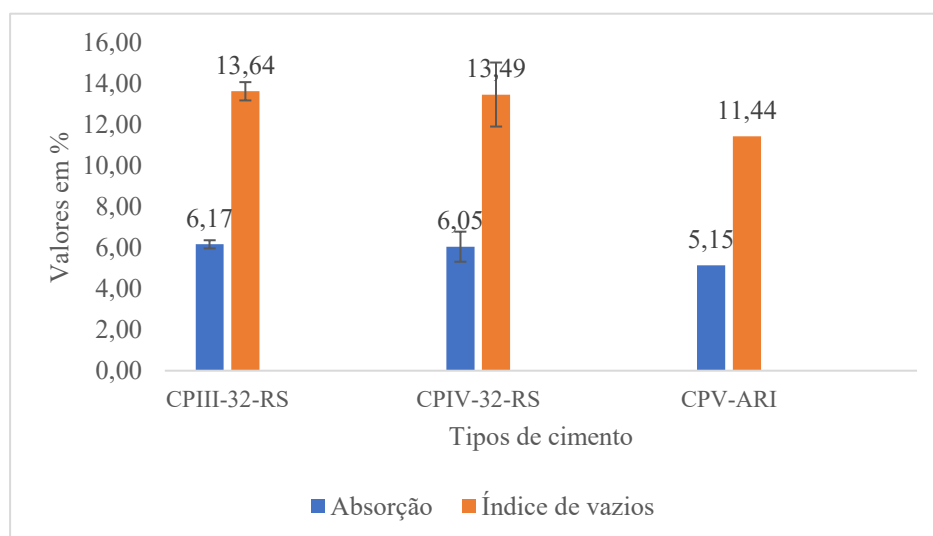
| CP | Absorção média (%) | Índice de vazios (I_v) médio (%) | Massa esp. Real média (g/cm^3) |
|-------------|--------------------|--------------------------------------|---|
| CPIII-32-RS | 6,17 | 13,64 | 2,560 |
| CPIV-32-RS | 6,05 | 13,49 | 2,577 |
| CPV-ARI | 5,15 | 11,44 | 2,507 |

Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se que para todas as amostras, as massas específicas foram bastante similares, o que é esperado, uma vez que os concretos foram produzidos com o mesmo traço e insumos, modificando-se apenas o tipo de cimento.

Na Figura 34 a seguir é apresentado os valores médios de absorção de água por imersão para os concretos produzidas com cada tipo de cimento, obtidos conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). Os valores de absorção representam a percentagem de massa absorvida em relação à massa do corpo-de-prova na condição seca enquanto o índice de vazios (I_v) representa a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.

Figura 34 - Absorção e índice de vazios médios dos concretos



Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com os dados apresentados, observa-se que os concretos produzidos com CPIII-32-RS e CPIV-32-RS apresentaram maiores valores para absorção de água e índice de vazios, comparativamente ao concreto de CPV-ARI. O concreto produzido com CPV-ARI exibiu menores índices de absorção e de vazios, com 5,15% e 11,44%, respectivamente, onde estes menores índices observados podem estar relacionados a maior finura do cimento, e conseqüente redução da porosidade, dificultando a entrada da água.

As amostras produzidas com CPIII-32-RS e CPIV-32-RS apresentaram resultados bastante similares tanto para absorção de água, quanto para índice de vazios, mas superiores aos do CPV-ARI. Uma provável justificativa para os resultados obtidos seria a formação de pastas mais compactas e menos porosas, devido a presença de adições minerais nos dois tipos de cimento empregados nestes concretos.

O Comité Euro-International du Béton (CEB 192, 1989), relaciona a absorção de água do concreto com a sua qualidade, de forma qualitativa. Tem-se que os concretos são considerados de boa qualidade e de baixa absorção para um nível de absorção menor que 3%, como de qualidade e absorção média para absorção de 3% a 5% e de baixa qualidade e alta absorção para índices superiores a 5%. Dessa forma, todas as amostras podem ser classificadas como de alta absorção e baixa qualidade. Esses resultados vão de encontro à proposta inicial de produzir concretos com maior porosidade, de forma a permitir o ingresso dos agentes agressivos em um curto período de pesquisa.

4.1.1.3 Absorção por capilaridade

A Tabela 5 mostra a variação da água absorvida por capilaridade ao longo do tempo e ascensão máxima de água para os concretos produzidos com CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI, respectivamente, obtidos através do método de ensaio prescrito pela NBR 9779 (ABNT, 2012) em CPs cilíndricos de 10x20cm, após 28 dias de cura nas mesmas condições das demais amostras.

Tabela 5 – Absorção de água por capilaridade ao longo do tempo

| CP | 3h (g/cm ²) | 6h (g/cm ²) | 24h (g/cm ²) | 48h (g/cm ²) | 72h (g/cm ²) | Ascensão máxima média (cm) | Desvio padrão (cm) |
|-------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| CPIII-32-RS | 0,196 | 0,257 | 0,424 | 0,534 | 0,578 | 5,249 | 1,286 |
| CPIV-32-RS | 0,170 | 0,221 | 0,390 | 0,493 | 0,531 | 4,493 | 0,259 |
| CPV-ARI | 0,232 | 0,320 | 0,611 | 0,796 | 0,877 | 5,813 | 1,029 |

Fonte: Elaborado pela autora

Conforme os dados apresentados os concretos que apresentaram maiores absorções de água por capilaridade foram aqueles produzidos com CPV-ARI, apresentando aumento significativo durante todo o período de ensaio, enquanto as amostras de CPIII-32-RS e CPIV-32-RS apresentaram maior crescimento nas primeiras 24h, indicando uma tendência à estabilização.

No concreto produzido com CPV-ARI, o resultado foi contrário ao apresentado pela absorção por imersão. Isso pode ser atribuído ao refinamento dos poros e à redução de seus diâmetros, em associação com a maior pressão capilar da água, tendo como consequência uma maior penetração de água no concreto (Mehta; Monteiro, 2008).

4.1.1.4 Resistência à penetração de cloretos

A resistência à penetração de íons cloreto foi determinada de acordo com a norma ASTM C1202 - *Test Method for Electrician Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* (ASTM, 2019). Na Figura 35 estão descritos os resultados médios para todas as amostras.

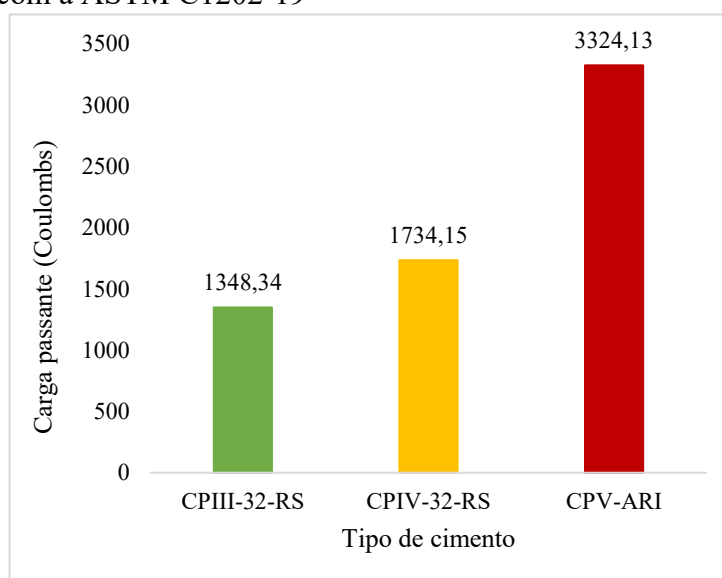
Com os valores obtidos foi feita a indicação qualitativa da penetrabilidade do íon cloreto, através dos parâmetros fornecidos na Tabela 6, formulada a partir da norma ASTM C1202 (2019).

Tabela 6 – Penetrabilidade de íon cloreto com base na carga passante

| Carga passante (Coulombs) | Penetrabilidade de íons cloreto |
|---------------------------|---------------------------------|
| > 4000 | Alto |
| 2000 – 4000 | Moderado |
| 1000 – 2000 | Baixo |
| 100 – 1000 | Muito baixo |
| < 100 | Negligenciável |

Fonte: Adaptado de ASTM C1202 (2019)

Figura 35 - Resistência à penetração de cloretos de acordo com a ASTM C1202-19



Fonte: Elaborado pela autora

O concreto produzido com CPV-ARI apresentou carga passante, em coulombs, 2,5 vezes superior à do concreto fabricado com CPIII-32-RS e 1,9 vezes maior que o concreto de CPIV-32-RS.

O concreto de CPV-ARI apresentou as maiores cargas passantes, sendo classificado como de moderada penetrabilidade de cloretos. Dessa forma, observa-se que as adições diminuíram a migração de cloretos dos concretos com CPIII-32-RS e CPIV-32-RS, sendo que o CPIII-32-RS produziu um resultado ainda mais vantajoso.

O resultado é coerente com o apresentado por autores como Yildirim, Ilica e Sengul (2011), onde a permeabilidade rápida de cloretos de concretos produzidos com cimento de escória de alto-forno e com cinza volante foram menores do que de outros cimentos. Neste estudo, para a classe de concreto C25, o concreto de cimento Portland comum apresentou permeabilidade de cloretos cerca de 6 vezes superior ao concreto produzido com escória. Para

os autores, nos cimentos com escória de alto-forno, a menor permeabilidade é resultante de uma microestrutura mais densa, tornando-os mais eficientes em resistir ao ingresso de cloretos.

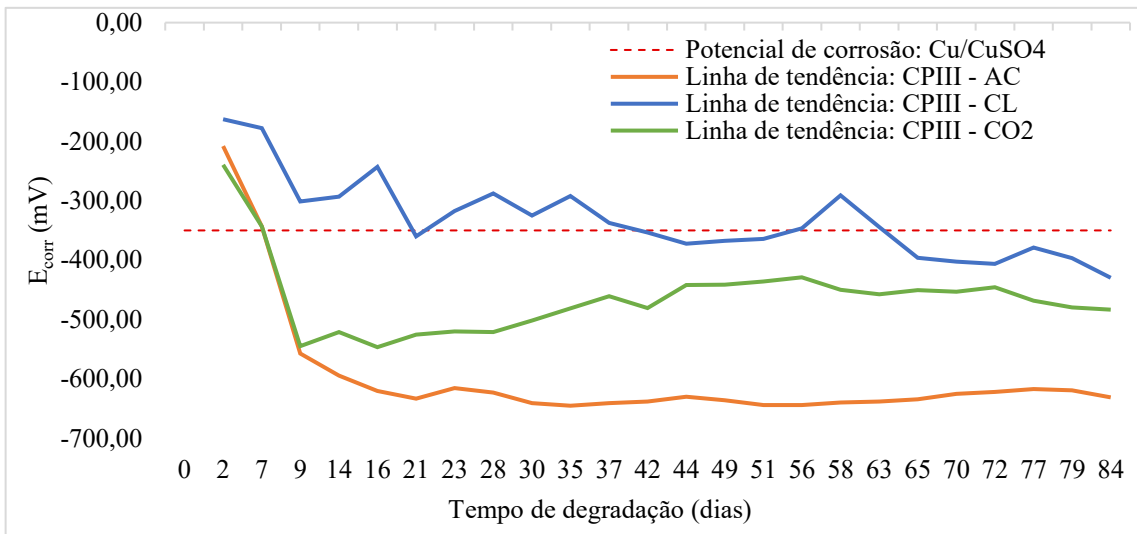
O resultado aqui encontrado também é coerente com o encontrado por Agra, Lobo e Monteiro (2017), onde a amostra de cimento CPIII-32-RS apresentou uma menor penetrabilidade de cloretos, quando comparada com a amostra de CPIV-32-RS, evidenciada pelo menor valor de carga passante encontrado para o primeiro.

4.1.2 Potencial de corrosão

O critério de avaliação dos resultados das medidas de potencial de corrosão, utilizando-se o eletrodo de cobre-sulfato de cobre (ESC), segundo a ASTM C 876-15, encontra-se no Quadro 2. Valores de potenciais mais positivos que -200 mV indicam que a probabilidade de corrosão na armadura é inferior a 10%. Em contrapartida, valores de potenciais mais negativos que -350 mV indicam probabilidade de corrosão superior a 90%. Para potenciais no intervalo entre -200 mV e -350 mV, a probabilidade de corrosão é incerta (ASTM, 2015).

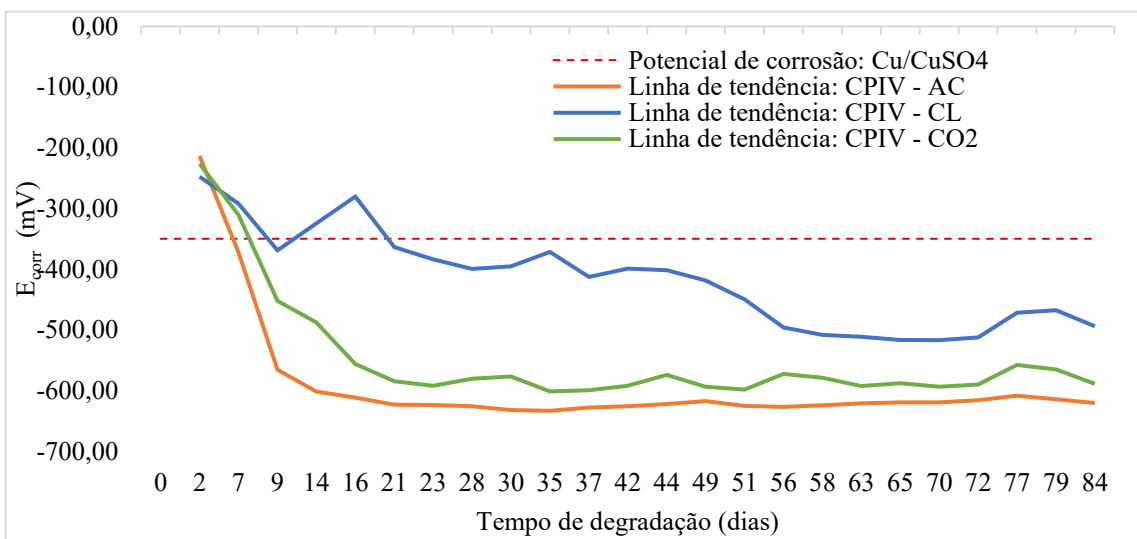
No Apêndice C encontra-se um comparativo da evolução do potencial de corrosão médio, para cada tipo de cimento e tipo de ação de deterioração, em cada ciclo. No apêndice D estão representados os gráficos referentes aos valores médios de E_{corr} em cada ciclo de deterioração. As Figuras 36 a 38 mostram a evolução do potencial de corrosão (E_{corr}), por meio de linhas de tendência, para as amostras produzidas com CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI, respectivamente, para cada condição de deterioração (ataque por carbonatação- CO_2 / ataque por cloretos - Cl^- / ataque conjunto - AC). Nas imagens, a zona de passivação das barras de aço foi limitada por uma linha vermelha, na horizontal dos gráficos de potencial de corrosão.

Figura 36 -Evolução do E_{corr} para amostras produzidas com CPIII-32-RS

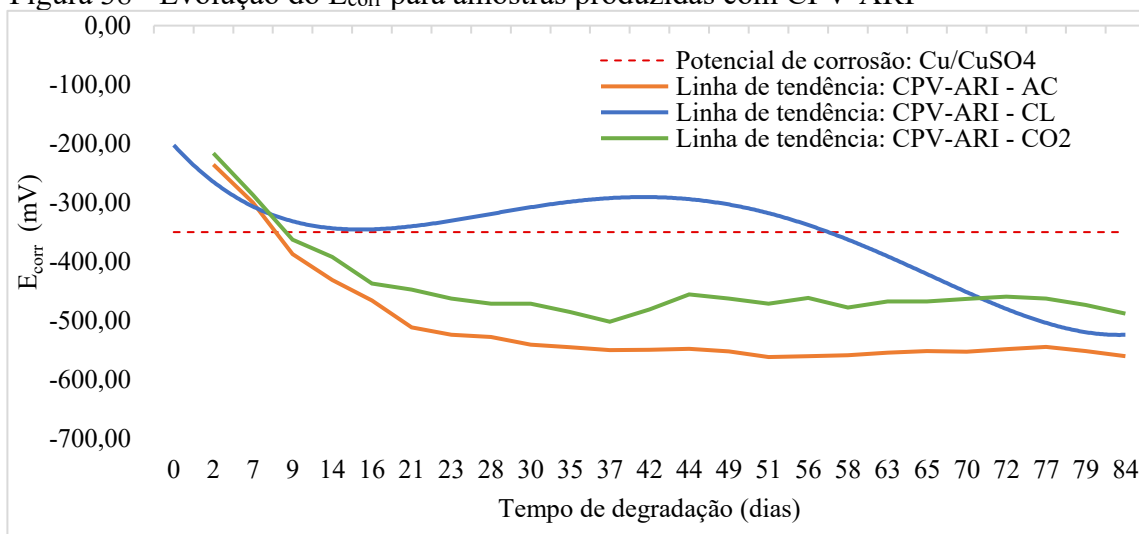


Fonte: Elaborado pela autora

Figura 37 - Evolução do E_{corr} para amostras produzidas com CPIV-32-RS



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 38 - Evolução do E_{corr} para amostras produzidas com CPV-ARI

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 7 abaixo apresenta as possíveis datas de despassivação para cada tipo de cimento, considerando a probabilidade de corrosão superior a 90% de acordo com o E_{corr} .

Tabela 7 – Possíveis datas de despassivação a partir do E_{corr}

| CP | CO ₂ | Cl ⁻ | AC |
|-------------|-----------------|-----------------|--------|
| CPIII-32-RS | 8 dias | 41 dias | 8 dias |
| CPIV-32-RS | 8 dias | 21 dias | 7 dias |
| CPV-ARI | 9 dias | 58 dias | 8 dias |

Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com os gráficos apresentados (Figuras 36, 37 e 38) e com a Tabela 7, nota-se que de um modo geral, as armaduras imersas em concreto com cimento CPIV-32-RS, apresentaram menores tempos de despassivação, praticamente iguais às das armaduras em CPs com CPIII-32-RS, seguidas pelas barras dos CPs de CPV-ARI.

De acordo com a Tabela 7, observa-se para todos os tipos de cimento, que o tempo para despassivação de acordo com o E_{corr} , foi superior para a condição de ataque único de cloretos, em comparação as barras submetidas as demais ações de deterioração. Isso pode ser destacado para o concreto produzido com CPV-ARI, onde, as barras submetidas unicamente à cloretos, ultrapassaram o valor limite a partir do qual considera-se uma probabilidade de corrosão superior a 90% (350 mV), na condição de ataque por cloretos em um tempo 6,44 vezes maior que para o ataque por carbonatação e 7,25 vezes maior que para o ataque conjunto.

Nos CPs produzidos com CPIII-32-RS, as barras submetidas ao ataque de cloretos extrapolaram o limite para o qual se considera o início da corrosão no 41º dia de deterioração, com variações ligeiramente mais positivas que -350 mV nos dias subsequentes, superando o

valor limite definitivamente apenas a partir do 64º dia. Embora, a despassivação das barras submetidas ao ataque conjunto e à carbonatação tenha ocorrido de forma similar, no 8º dia de deterioração, a partir do 9º dia de deterioração, o E_{corr} foi mais eletronegativo para as barras submetidas ao ataque conjunto. Nas amostras produzidas com CPIV-32-RS (Figura 37), de forma simplificada, pode-se afirmar que a despassivação por ataque sinérgico ocorreu três vezes mais rapidamente que pelo ataque de cloretos, com base apenas no E_{corr} .

Quanto à influência do tipo de ataque sobre a corrosão das armaduras, qualitativamente, entende-se que o fenômeno da corrosão ocorre de forma menos intensa para a condição de ataque único de cloretos em comparação com as demais. Analogamente, para todos os tipos de cimento analisados o E_{corr} foi mais eletronegativo para a condição de ataque conjunto entre carbonatação e cloretos em comparação com as barras submetidas a essas ações separadamente, indicando que existe uma tendência de que o ataque sinérgico entre cloretos e carbonatação influenciou diretamente na intensidade do processo corrosivo. Isso também foi observado no trabalho de Mei *et al.* (2022), no qual os resultados indicam que as barras de aço sob ataque conjunto já apresentam risco de corrosão nos primeiros dias de cura, com potencial menor que -350 mV, com valor decrescendo com o passar do tempo.

Salienta-se que a magnitude numérica do potencial geralmente fornece uma indicação da presença ou ausência de corrosão no aço embutido em concreto não carbonatado e exposto à atmosfera, e próximo à ponta do eletrodo de referência. No entanto, a magnitude numérica não indica a taxa de corrosão do aço. Os potenciais de corrosão podem refletir a química do ambiente do eletrodo, por exemplo, o aumento das concentrações de cloretos pode reduzir a concentração de íons ferrosos em um ânodo de aço, tornando o potencial mais negativo. No entanto, a menos que tal química, e a presença ou ausência de reações de eletrodo concorrentes, seja conhecido, um potencial de eletrodo de referência não deve ser interpretado como indicativo da taxa de corrosão, ou mesmo como indicativo de uma reação de corrosão (ASTM, 2015).

Em pesquisa realizada por Mei *et al.* (2022) os autores verificaram que no ambiente de ataque único por cloretos, o acréscimo na concentração dos sais internos aumenta de forma significativa a área de corrosão das barras e o grau de perda de massa. Nesse estudo foram adicionados diferentes teores de sais cloretos ao concreto, observou-se que com o acréscimo no teor de cloretos, a curva de potencial decresce rapidamente, o que indica que a proporção de corrosão das barras aumenta de acordo com a concentração dos sais.

Assim, na presente pesquisa, concomitantemente ao E_{corr} foi determinada a intensidade de corrosão (I_{corr}), e a partir desta, calculada a taxa de corrosão (i_{corr}). Dessa forma,

é possível fazer considerações mais assertivas a respeito do processo corrosivo. Esses dados serão apresentados no tópico seguinte.

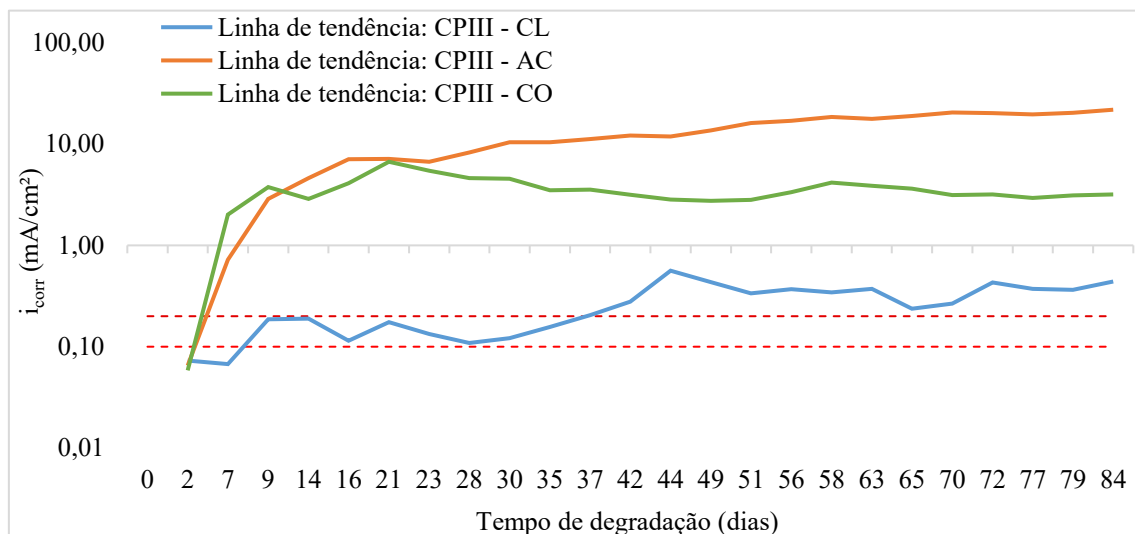
4.1.3 Taxa de corrosão

O critério de despassivação da armadura deve ser pautado na indicação simultânea do potencial de corrosão mais eletronegativo que -350 mV, para o eletrodo de cobre/sulfato de cobre, indicando probabilidade de corrosão superior a 90%, e da densidade de corrente de corrosão superior ao intervalo de $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Al-Ameeri; Rafiq; Tsioulou, 2021).

A técnica eletroquímica de Resistência de Polarização Linear (RPL) foi utilizada para se obter a taxa de corrosão (i_{corr}), onde o valor de B utilizado foi de 26 mV, quando a barra apresentava corrosão ativa. Para a condição em que as barras se apresentavam passivadas, utilizou-se B igual a 52 mV.

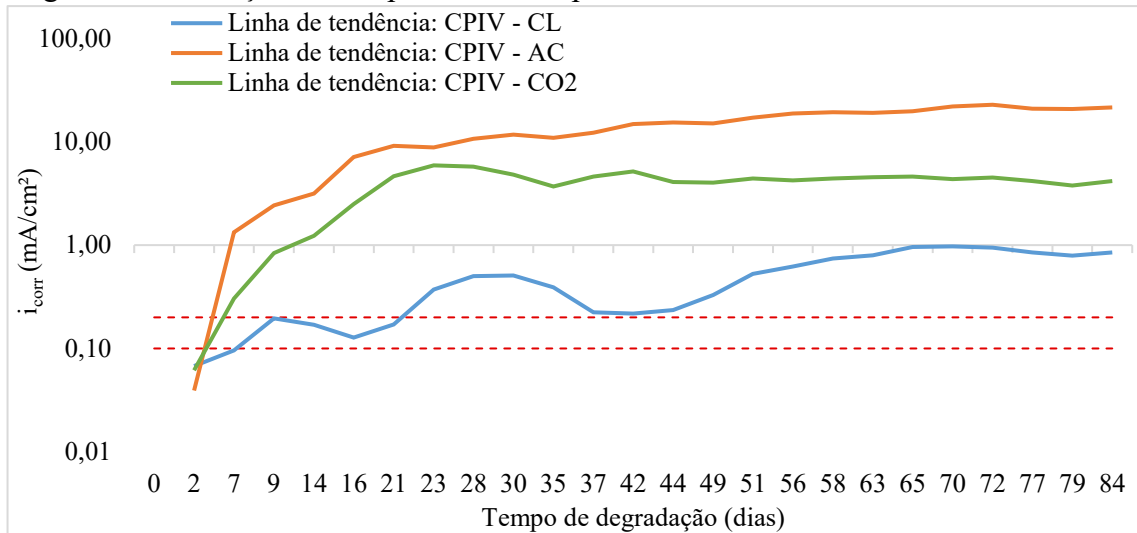
As Figuras 39 a 41 mostram a evolução da taxa de corrosão (i_{corr}), através de linhas de tendência, para as amostras produzidas com CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI, respectivamente, para cada condição de deterioração. O Apêndice E apresenta a evolução da taxa de corrosão média, para cada tipo de cimento e condição de deterioração, em cada ciclo. No apêndice F estão representados os gráficos referentes aos valores médios de i_{corr} em cada ciclo de deterioração. Nas imagens a zona de passivação das barras de aço foi limitada por linhas vermelhas, na horizontal dos gráficos de intensidade de corrosão.

Figura 39 - Evolução do i_{corr} para amostras produzidas com CPIII-32-RS



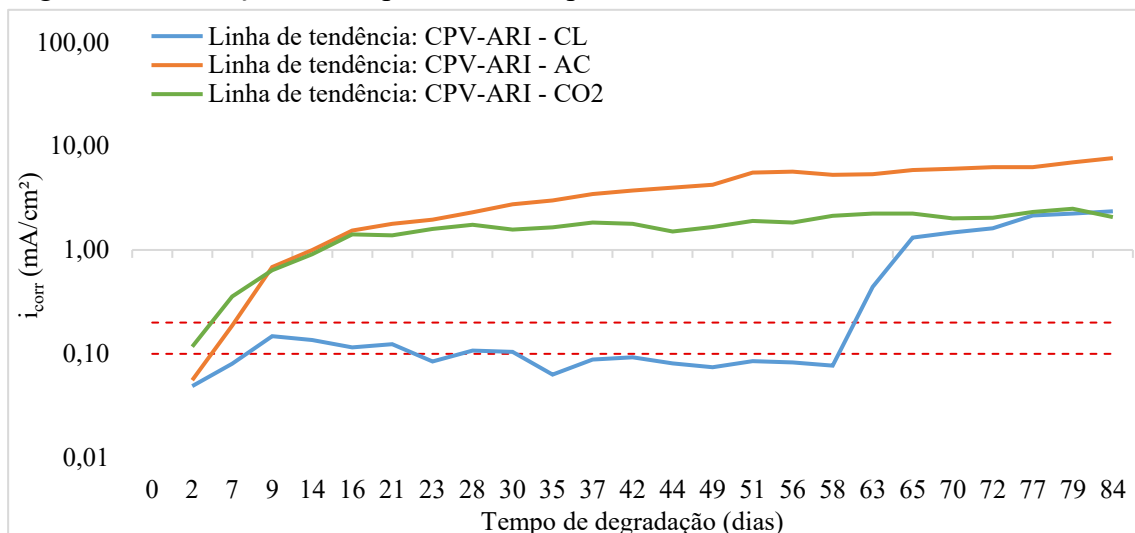
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 40 - Evolução do i_{corr} para amostras produzidas com CPIV-32-RS



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 41 - Evolução do i_{corr} para amostras produzidas com CPV-ARI



Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 8 abaixo apresenta as possíveis datas de despassivação para cada tipo de cimento de acordo com o i_{corr} .

Tabela 8 - Possíveis datas de despassivação a partir do i_{corr} e valor de i_{corr} no 12º ciclo saturado

| CP | Tempo de despassivação (dias) | | | i_{corr} no 12º ciclo saturado ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | | |
|-------------|-------------------------------|-----------------|--------|--|-----------------|--------|
| | CO ₂ | Cl ⁻ | AC | CO ₂ | Cl ⁻ | AC |
| CPIII-32-RS | 4 dias | 40 dias | 4 dias | 4,555 | 0,572 | 25,005 |
| CPIV-32-RS | 5 dias | 21 dias | 4 dias | 4,734 | 1,108 | 23,421 |
| CPV-ARI | 3 dias | 60 dias | 7 dias | 3,102 | 2,341 | 9,532 |

Fonte: Elaborado pela autora

Quanto a influência do tipo de cimento para o tempo de despassivação das armaduras, observa-se a partir das Figuras 39, 40 e 41, e da Tabela 8, que de um modo geral, as armaduras imersas em concreto com cimento CPIV-32-RS, apresentaram menores tempos de despassivação, seguidas pelos CPs com os cimentos CPIII-32-RS e CPV-ARI.

De acordo com os dados apresentados nas Figuras 39 e 40 observa-se que para as barras inseridas em concreto produzido com CPIII-32-RS e CPIV-32-RS, o valor limite de i_{corr} para o qual se considera que o estado de corrosão foi ultrapassado, ocorreu primeiramente para a condição de ataque conjunto, seguida pela ação da carbonatação e posteriormente pelo ataque de cloretos. Para os CPs com CPV-ARI, embora a despassivação das armaduras por carbonatação tenha ocorrido em um período menor (Tabela 8), as barras expostas ao ataque conjunto sofreram um processo corrosivo mais expressivo, uma vez que o i_{corr} foi maior para as barras submetidas ao ataque sinérgico a partir do 9º dia de degradação.

Esses resultados indicam uma maior agressividade do ataque conjunto comparativamente as demais ações de deterioração individualmente, ocasionando uma aceleração no processo de despassivação da armadura e/ou um maior valor de i_{corr} no decorrer dos ciclos de deterioração. Esse comportamento é observado principalmente quando se compara o efeito do ataque conjunto ao ataque de cloretos. Por exemplo, a despassivação das barras inseridas em concreto com CPIII-32-RS, ocorreu em um período dez vezes maior para o ataque de cloretos comparativamente ao ataque conjunto. O mesmo comportamento pode ser observado para as armaduras dos CPs produzidos com CPIV-32-RS e CPV-ARI.

Isso pode ser comprovado analisando-se os valores máximos de i_{corr} medidos ao final do 12º ciclo saturado, onde para as armaduras inseridas nos CPs com CPIII-32-RS, expostas ao ataque conjunto, apresentaram uma velocidade de corrosão cerca de 43,71 vezes maior quando comparada às barras submetidas ao ataque de cloretos, e 5,49 vezes maior em comparação às barras submetidas à carbonatação. O i_{corr} das barras dos CPs de CPIV-32-RS expostas ao ataque conjunto foi cerca de 21,14 vezes maior que o i_{corr} quando submetido ao ataque de cloretos, e 4,95 vezes maior em comparação às barras submetidas à carbonatação. Para o CPV-ARI, a velocidade de corrosão para o ataque conjunto foi cerca de 4,07 vezes maior que o i_{corr} quando submetido ao ataque de cloretos, e 3,07 vezes maior que o i_{corr} para as barras submetidas à carbonatação, neste ciclo.

Quanto ao i_{corr} para as barras submetidas a cada mecanismo de deterioração separadamente, observa-se que, o i_{corr} foi superior para as barras sujeitas à carbonatação em comparação as barras submetidas ao ataque de cloretos. Para o CPV-ARI isso ocorre até o 81º

dia de ataque, onde, a partir deste momento, observa-se que a evolução do i_{corr} ocorre de forma semelhante para as duas ações (Figura 41).

De forma geral, apesar do período de despassivação para as condições de ataque conjunto e carbonatação serem próximos, as barras expostas ao ataque conjunto sofreram um processo corrosivo mais expressivo para todos os tipos de cimento analisados, o que é confirmado pelas maiores taxas de corrosão apresentadas (Tabela 8). De acordo com os dados expostos nas Figuras 39, 40 e 41, as maiores taxas de corrosão ocorreram para a condição de ataque conjunto em todas as amostras de concreto. Esses resultados são coerentes com os do trabalho de Mei *et al.* (2022), onde sob o efeito conjunto de carbonatação e cloretos, as barras de aço apresentam risco de corrosão nos primeiros dias do estágio de cura, com taxa de corrosão superior do que sob a ação individual de cada mecanismo.

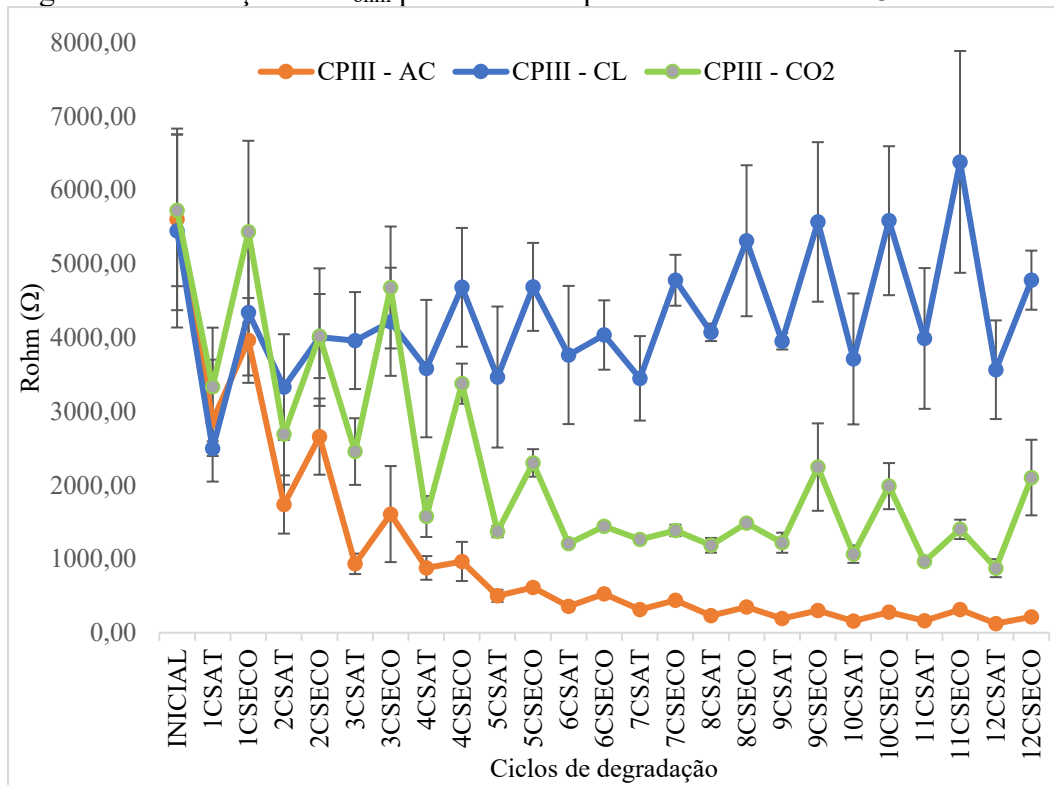
Esse resultado era esperado, pois um efeito secundário da carbonatação, que é significativo em termos de sua influência na corrosão do aço, é que esta pode impedir a ligação do cloreto e causar a liberação de cloretos ligados na fase de solução de poros do concreto (Geng *et al.*, 2016).

Ressalta-se que para todas as condições de exposição existe coerência entre os valores do potencial de corrosão e da taxa de corrosão, uma vez que, na maioria dos resultados, tem-se que um incremento de potencial no sentido mais negativo implica em um incremento da taxa de corrosão no sentido mais positivo, ou seja, quando o potencial de corrosão diminui, a respectiva taxa aumenta. Outro aspecto importante consiste no fato que os valores de i_{corr} são maiores para os semi-ciclos saturados e menores para os semi-ciclos secos. Isto pode ser explicado pela redução da resistividade do concreto com o aumento da saturação, influenciando a cinética da corrosão.

4.1.4 Resistência ôhmica

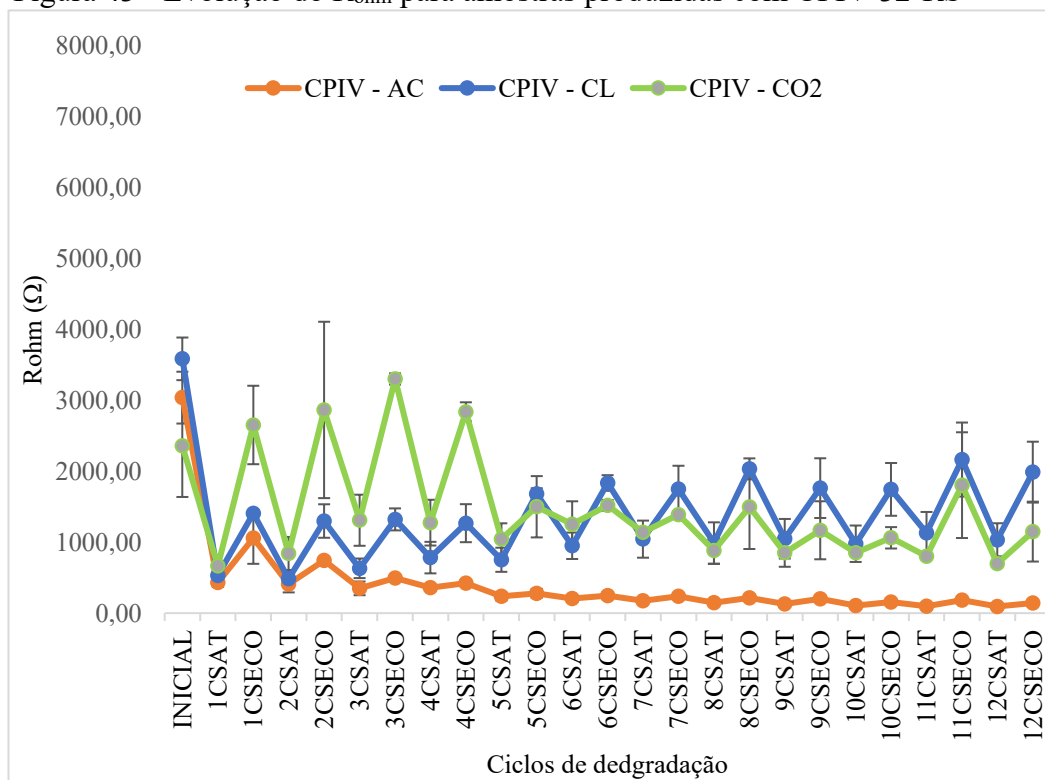
As Figuras 42 a 44 mostram a evolução da resistência ôhmica (R_{ohm}), para as amostras produzidas com CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI, respectivamente, para cada condição de deterioração. No Apêndice G encontram-se descritos os valores médios medidos a cada semi-ciclo. Enquanto no apêndice H estão representados os gráficos referentes aos valores médios de R_{ohm} em cada ciclo de deterioração.

Figura 42 - Evolução do R_{ohm} para amostras produzidas com CPIII-32-RS

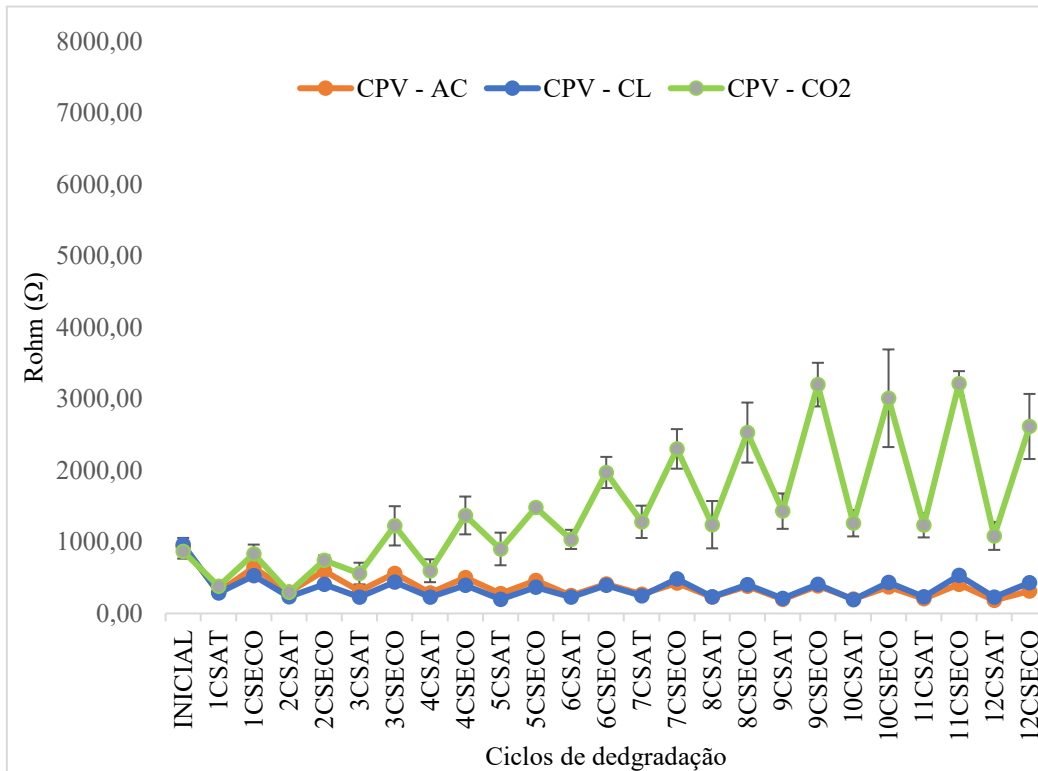


Fonte: Elaborado pela autora

Figura 43 - Evolução do R_{ohm} para amostras produzidas com CPIV-32-RS



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 44 - Evolução do R_{ohm} para amostras produzidas com CPV-ARI

Fonte: Elaborado pela autora

A Tabela 9 abaixo apresenta os valores iniciais de R_{ohm} , antes do 1º ciclo saturado, assim como os valores da resistência ôhmica média no 12º ciclo.

Tabela 9 – Valores iniciais e finais de R_{ohm}

| CP | R_{ohm} Inicial (Ω) | | | R_{ohm} médio no 12º ciclo saturado (Ω) | | |
|-------------|--------------------------------|-----------------|---------|--|-----------------|--------|
| | CO ₂ | Cl ⁻ | AC | CO ₂ | Cl ⁻ | AC |
| CPIII-32-RS | 5726,85 | 5446,68 | 5604,03 | 1490,46 | 4172,88 | 170,12 |
| CPIV-32-RS | 2359,75 | 3584,65 | 3037,93 | 924,39 | 1510,83 | 119,69 |
| CPV-ARI | 870,88 | 962,05 | 935,55 | 1850,29 | 328,79 | 248,36 |

Fonte: Elaborado pela autora

Algumas amostras apresentaram valores mínimos de R_{ohm} em ciclos intermediários, ao invés do ciclo final, onde a umidade das amostras durante as medições pode ter influenciado neste resultado.

Nas amostras produzidas com CPIII-32-RS os valores máximos de R_{ohm} foram observados na medição inicial, e foram reduzindo gradativamente. De acordo com os dados apresentados na Tabela 9, a redução das resistências ôhmicas entre a medição inicial e final, para as barras submetidas ao ataque de cloretos, à carbonatação e ao ataque conjunto, foram respectivamente de, 23,39%, 74% e 97%. As amostras de CPIV-32-RS apresentaram redução

de R_{ohm} , nas condições de ataque de cloretos, carbonatação e ataque conjunto de, respectivamente, 57,85%, 60,83% e 96,06%. Nos corpos de prova com CPV-ARI, a redução de R_{ohm} entre a medição inicial e final foi de 65,82% e 73,45%, para as condições de ataque de cloretos e ataque conjunto, respectivamente. Em contrapartida, houve um aumento de aproximadamente 112,46% no valor de R_{ohm} para a condição de ataque por carbonatação.

Considerando o efeito do tipo de ataque sobre a redução da resistência ôhmica, conforme apresentado na Tabela 9 e nas Figuras 42, 43 e 44, nota-se que as maiores variações de R_{ohm} , com relação a resistência inicial, ocorreram para as barras imersas em CPs sujeitos ao ataque conjunto de carbonatação e cloretos. Pois nessa condição foi observada a maior redução de R_{ohm} ao longo dos ciclos de deterioração, para todos os tipos de cimento analisados, o que indica que o ataque sinérgico influenciou diretamente na redução da resistência do meio e consequentemente no aumento da taxa de corrosão, como citado no tópico anterior.

Um fator a ser analisado consiste no fato das barras submetidas ao ataque de carbonatação única, apresentarem um comportamento diferente nas amostras produzidas com CPV-ARI, em comparação as amostras produzidas com os demais tipos de cimentos, uma vez que a R_{ohm} cresceu significativamente com o decorrer dos ciclos de deterioração. Este fenômeno pode ser justificado pelo aumento da resistividade elétrica em concretos carbonatados, pois, de modo geral, há uma redução da porosidade causada da precipitação do carbonato de cálcio ($CaCO_3$), que preenche os poros.

No que diz respeito ao efeito do tipo de cimento na R_{ohm} , nota-se que as amostras que apresentaram maiores valores de resistência foram aquelas produzidas com cimento do tipo CPIII-32-RS, seguida pelas de CPIV-32-RS e CPV-ARI. De forma geral, as amostras de CPIII-32-RS (Figura 42) e CPIV-32-RS (Figura 43), sujeitas ao ataque de cloretos apresentaram os maiores valores de R_{ohm} ao longo dos ciclos, o que é coerente com os menores valores de i_{corr} exibidos, em comparação as demais condições de deterioração, ou seja, as barras que apresentaram os maiores valores de R_{ohm} obtiveram os menores valores de i_{corr} . Para os CPs de CPV-ARI, existe coerência entre os valores de resistência ôhmica e taxa de corrosão, para as barras submetidas ao ataque conjunto e ao ataque de cloretos, uma vez que, tem-se um incremento da taxa de corrosão no sentido mais positivo quando ocorre uma redução da resistência ôhmica.

Para todos os corpos de prova analisados, a resistência ôhmica variou de acordo com os ciclos de deterioração. Nas Figuras 42, 43 e 44 constata-se que ocorre uma diminuição da resistividade do concreto com o aumento da saturação, para todas as condições de deterioração. Essa redução é esperada, uma vez que a condutividade cresce à medida que a

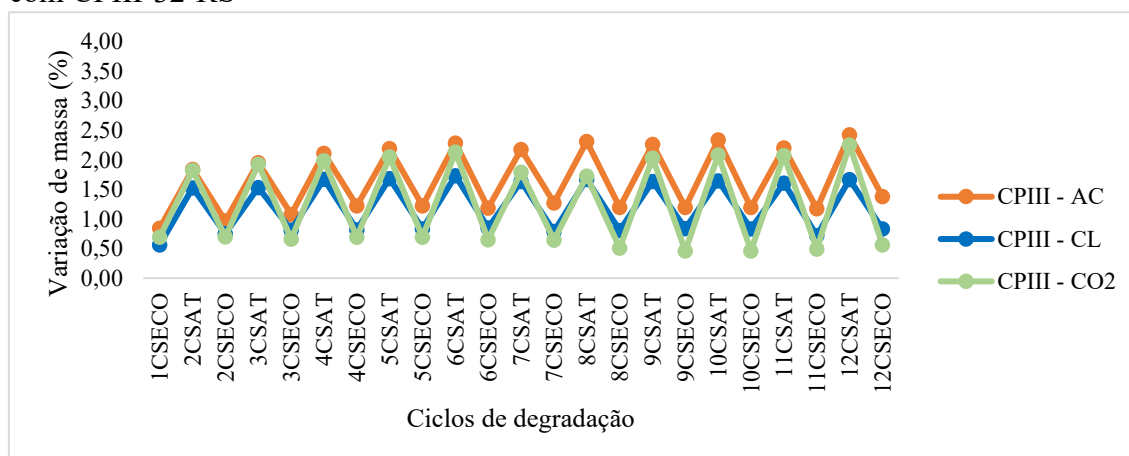
porosidade e teor de umidade aumentam, proporcionando maior mobilidade para os íons, o que ocorre geralmente em concretos com alta relação a/c.

4.1.5 Variação de massa e de umidade superficial

A variação de massa dos corpos-de-prova (VM) e a Umidade Superficial foram mensuradas a cada semi-ciclo seco, usando-se uma balança eletrônica com uma precisão de décimo do grama e um medidor de umidade (*moisture meter*), da marca *Extech Instruments*, modelo MO50, com limite de medição de 33%. Tais variáveis são utilizadas na avaliação do processo de corrosão.

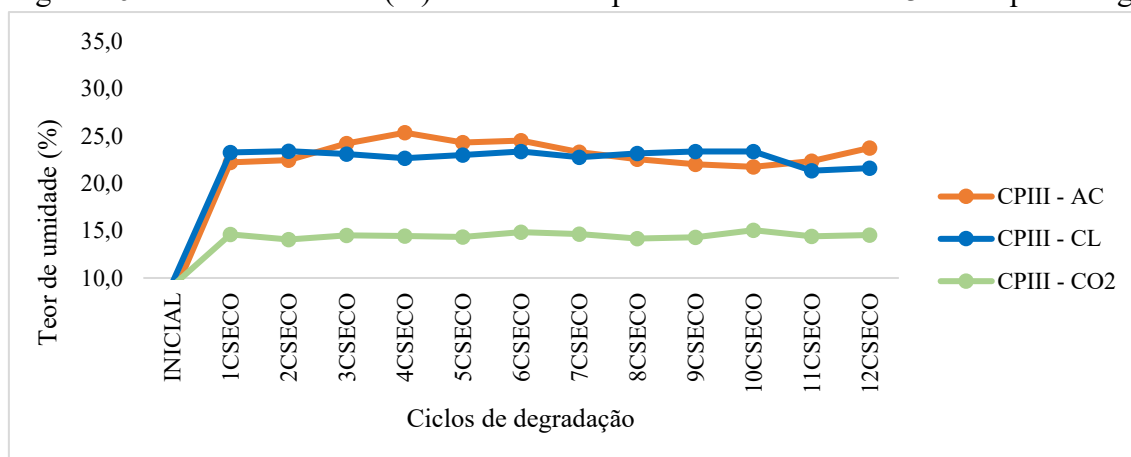
As Figuras 45, 47 e 49 mostram a evolução da variação de massa, enquanto as Figuras 46, 48 e 50 mostram a evolução da umidade superficial, para as amostras produzidas com CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI, respectivamente em cada condição de ataque. No Apêndice I encontram-se descritos os valores medidos a cada semi-ciclo, bem como gráficos comparativos para cada traço de concreto.

Figura 45 - Variação de massa (%) em relação a massa inicial das amostras produzidas com CPIII-32-RS



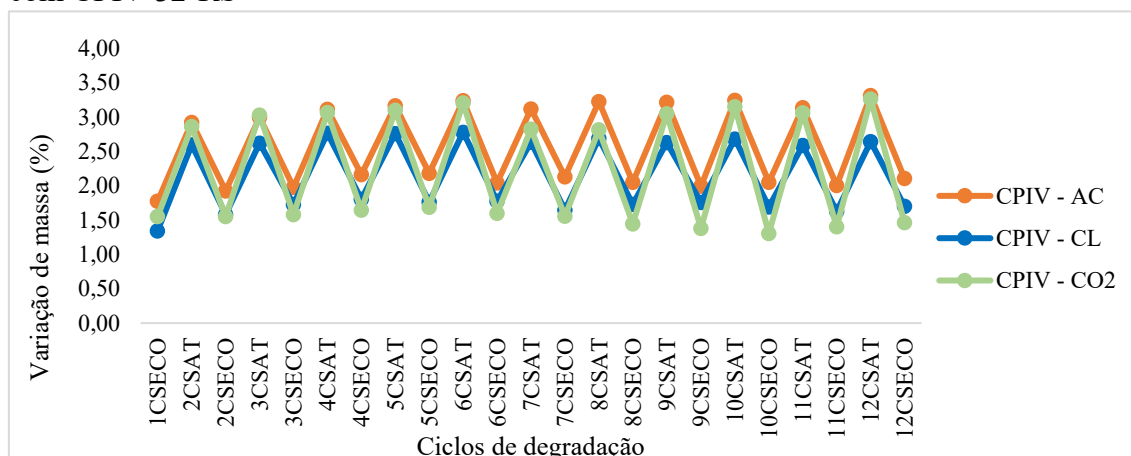
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 46 - Teor de umidade (%) das amostras produzidas com CPIII-32-RS após secagem



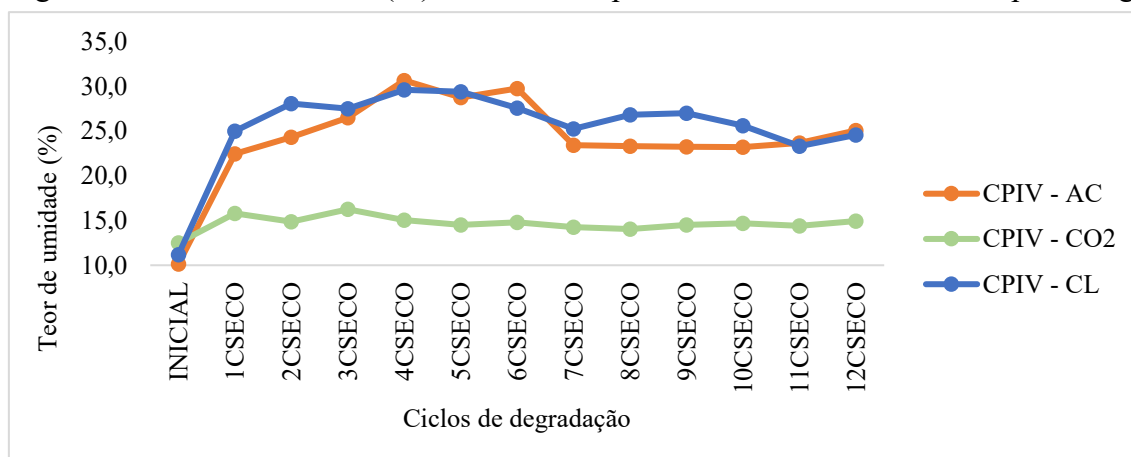
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 47 - Variação de massa (%) em relação a massa inicial das amostras produzidas com CPIV-32-RS



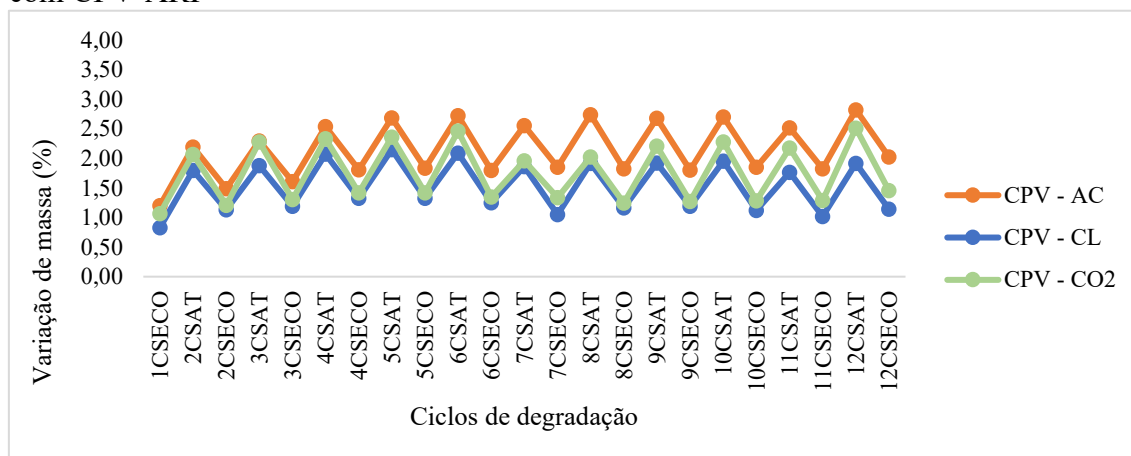
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 48 - Teor de umidade (%) das amostras produzidas com CPIV-32-RS após secagem



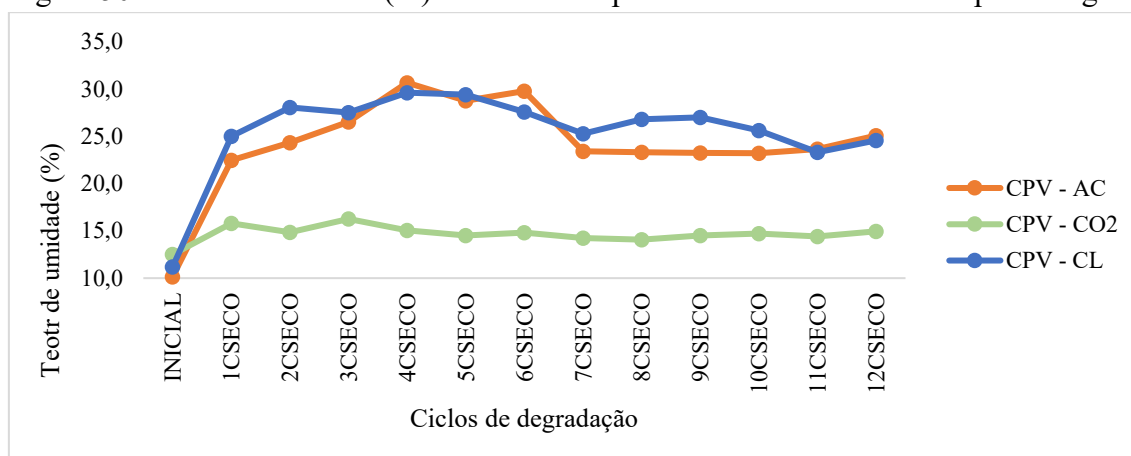
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 49 - Variação de massa (%) em relação a massa inicial das amostras produzidas com CPV-ARI



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 50 - Teor de umidade (%) das amostras produzidas com CPV-ARI após secagem



Fonte: Elaborado pela autora

Com relação aos dados apresentados nas Figuras 45, 47 e 49, observa-se uma maior amplitude para as amostras expostas ao ataque conjunto de carbonatação e cloretos em comparação aos CPs expostos ao ataque individual, no entanto, essa diferença é pequena, e de modo geral. De acordo com as variações de massa apresentadas na Figura 47, para as amostras produzidas com CPIV-32-RS, esse acréscimo foi menos expressivo, com alguns valores de variação muito próximos para a condição de ataque conjunto e ataque por carbonatação. A variação de massa para os mecanismos de degradação únicos ocorreu de forma bastante similar, para todas as amostras.

O ganho de massa nos CPs pode ser explicado por uma possível perda na eficiência da secagem, aliada a fenômenos inerentes a cada mecanismo de deterioração. Por exemplo, o aumento do teor de cloretos, em função de sua higroscopicidade, faz com que o concreto

consERVE mais umidade resultando no acréscimo da massa dos corpos-de-prova sujeitos ao ataque único de cloretos ao longo dos ciclos. Em contrapartida, durante o processo de carbonatação, ocorre uma redução de porosidade causada pela precipitação de CaCO_3 responsável pelo preenchimento dos poros, gerando um aumento na massa dos CPs sujeitos à carbonatação, influenciando para o aumento de massa dos CPs. Assim, o aumento da variação de massa nas amostras sujeitas ao ataque conjunto pode ocorrer devido a ambos os efeitos, simultaneamente.

Isso pode ser corroborado pelos gráficos representativos do teor de umidade superficial ao longo dos ciclos de deterioração (Figuras 46, 48 e 50). Percebe-se que os CPs expostos ao ataque de cloretos e ao ataque conjunto apresentaram maior teor de umidade ao longo dos ciclos, ultrapassando inclusive o limite de 33% do equipamento em alguns ciclos, o que influencia no aumento da massa, como supracitado. As amostras sujeitas à carbonatação, por outro lado, apresentaram menores teores de umidade, porém exibiram uma variação de massa muito próxima dos CPs sujeitos ao ataque de cloretos, em consequência do preenchimento dos poros pelos produtos da carbonatação.

O maior teor de umidade dos CPs sujeitos ao ataque conjunto e ao ataque único de cloretos, pode ser explicado pelo aumento no teor dos íons ao longo dos ciclos, devido também a uma provável liberação de cloretos fixados em concretos carbonatados, aumentando a quantidade de cloretos livres na amostra. Além dos fatores citados, deve-se considerar a porosidade do concreto analisado, uma vez que concretos mais porosos absorvem e perdem mais água em comparação a concretos menos porosos.

De modo geral, comparando-se os traços produzidos com cada tipo de cimento, os teores de umidade foram superiores para as amostras produzidas com CPIV-32-RS e CPV-ARI, apresentando sempre valores muito próximos ao longo de todos os ciclos, principalmente para o ataque de cloretos e ataque conjunto. Isso pode ser justificado pelos maiores índices de carga passante no ensaio de migração de cloretos, para estes tipos de concreto, comparativamente ao concreto produzido com CPIII-32-RS.

Os menores teores de umidade ocorreram para os concretos produzidos com CPIII-32-RS, nas condições de ataque de cloretos e ataque conjunto. Para a condição de carbonatação acelerada, todos os traços de concreto apresentaram comportamentos similares, com teores de umidade menores comparativamente as outras condições de deterioração e com valores próximos.

No que concerne à variação de massa para cada concreto, variando-se o tipo de cimento, nota-se que as maiores amplitudes foram observadas para os CPs com CPIV-32-RS,

seguidas pelas amostras com CPV-ARI e CPIII-32-RS, nesta ordem, em todas as condições de deterioração. Este é um indicativo de maior porosidade para os concretos fabricados com CPIV-32-RS, uma vez que os valores indicam que estes absorvem e perdem água com maior facilidade que os demais concretos.

4.1.6 Ensaios complementares

4.1.6.1 Determinação do teor de cloretos no concreto no 5º e 12º ciclos

O teor de cloretos no concreto ao final do 5º e 12º ciclo foi obtido para os CPs cúbicos (8x8x8 cm) sem armadura, expostos ao ataque conjunto e ao ataque de cloretos nas mesmas condições que os CPs com armadura inserida, por meio das determinações descritas na NBR 9917 (ABNT, 2022), por meio do procedimento de determinação de cloretos solúveis pelo analisador de íons – método da curva de calibração (extrapolação).

Os resultados alcançados foram a média de duas determinações em cada amostra, ou seja, duas determinações para o CP da primeira batelada e duas para o CP da segunda batelada, utilizados no cálculo da média final, apresentada na Tabela 10 abaixo. As amostras foram nomeadas de acordo com o tipo de cimento utilizado em cada traço (3, 4 ou 5), seguido pelo tipo de ataque ao que a amostra estava sujeita, Ataque Conjunto (AC) ou Ataque de Cloretos (CL).

Tabela 10 - Teor de cloretos livres nos concretos

| Ciclo de deterioração | Teor de cloretos livres na profundidade 10mm (em %) | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 3AC | | 3CL | | 4AC | | 4CL | | 5AC | | 5CL | |
| | Méd | Desv | Méd | Desv | Méd | Desv | Méd | Desv | Méd | Desv | Méd | Desv |
| 5º Ciclo | 0,09 | 0,02 | 0,26 | 0,10 | 0,20 | 0,05 | 0,18 | 0,05 | 0,16 | 0,03 | 0,17 | 0,08 |
| 12º Ciclo | 0,38 | 0,08 | 0,31 | 0,03 | 0,48 | 0,03 | 0,43 | 0,08 | 0,33 | 0,03 | 0,43 | 0,01 |

Fonte: Elaborado pela autora

Para a condição de ataque único de cloretos, no 5º ciclo, o menor teor de cloretos ocorreu para as amostras produzidas com CPV-ARI, já no 12º ciclo esse resultado foi observado para os concretos produzidos com CPIII-32-RS. Os maiores teores nessa condição de deterioração ocorreram no 5º ciclo para os concretos produzidos com CPIII-32-RS, e ao final do 12º ciclo para os concretos de CPIV-32-RS e CPV-ARI igualmente.

Dentro deste contexto, nos concretos produzidos com CPIII-32-RS houve uma redução na concentração de cloretos na profundidade de 10mm em comparação às demais

amostras, para a condição de ataque único de cloretos. Este comportamento era esperado, uma vez que nos ensaios realizados para medir a capacidade do concreto de resistir à penetração de cloretos, as amostras compostas de CPIII-32-RS apresentaram o menor valor de carga passante, indicando uma baixa penetrabilidade dos íons.

Os concretos com CPIV-32-RS e CPV-ARI, submetidos ao mecanismo de deterioração por cloretos, apresentaram maiores teores de cloretos ao final do 12º ciclo, o que pode ser explicado pelo ensaio de determinação da penetrabilidade de íons, onde as amostras produzidas com CPIV-32-RS e o CPV-ARI apresentaram valores de carga passante de 1734,15 coulombs e 3324,13 coulombs, respectivamente, indicando maiores penetrabilidades de íons em comparação com o concreto fabricado com CPIII-32-RS.

Para as amostras fabricadas com CPIV-32-RS, a maior concentração de íons pode ser ainda explicada pela Resistência a Sulfatos própria do cimento utilizado, uma vez que esta característica requer um baixo teor de C_3A , e como este produto é responsável pela fixação dos cloretos, formando cloroaluminato de cálcio, em baixos teores de C_3A pode haver uma maior concentração de cloretos livres (Neville, 2016).

Na condição de ataque conjunto, o menor teor de cloretos após o 5º ciclo de deterioração foi observado nas amostras produzidas com CPIII-32-RS, e no 12º ciclo para o CPV-ARI, seguido pelo CPIII-32-RS. Em contrapartida, os maiores teores de cloretos ao final do 5º e do 12º ciclo foram observados para os concretos produzidos com CPIV-32-RS.

Maiores concentrações de cloretos para amostras produzidas com CPIV-32-RS e submetidas ao ataque conjunto podem ser explicadas pela menor resistência à carbonatação deste concreto. Na pesquisa de Wang *et al.* (2017), os autores afirmam que de modo geral, a carbonatação de concretos contaminados com cloretos resulta na liberação de cloretos ligados, o que empurra os cloretos para maiores profundidades. Esse efeito pode ser mais acentuado em alguns tipos de concretos, como aqueles com adição de cinza combustível pulverizado (PFA), que se trata de um material pozzolânico. Em adições desse tipo, um dos efeitos consiste na fixação do $Ca(OH)_2$ disponível, reduzindo a reserva alcalina e aumentando a velocidade de propagação da frente de carbonatação (IBRACON, 2021b).

Nos concretos produzidos com CPV-ARI, um menor teor de cloretos pode ser uma consequência da maior resistência mecânica, ocasionada pela maior finura do cimento, e consequentemente proporcionando uma redução da porosidade, dificultando a entrada dos agentes agressivos. Nessas amostras também foram observados os menores índices de vazios e de absorção de água por imersão.

No 5º ciclo, nota-se que os maiores teores de cloretos ocorreram para a condição de ataque único de cloretos, com exceção do CPIV-32-RS por uma pequena diferença. Já no 12º as maiores concentrações dos íons foram observadas para a condição de ataque conjunto, com exceção do CPV-ARI. Uma provável causa desse comportamento consiste no efeito da carbonatação, que no decorrer dos ciclos de deterioração pode ter influenciado para um aumento no teor de cloretos nas amostras sujeitas a esta ação de deterioração, demonstrando uma maior agressividade do ataque conjunto em comparação ao ataque único de cloretos. De acordo com Geng *et al.* (2016), a liberação de cloretos combinados leva a um aumento de cloretos livres e à difusão correspondente de cloretos livres de uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração. Além disso, a carbonatação pode influenciar na difusão de íons cloreto no concreto, pois pode alterar o volume dos poros e estrutura dos poros e, portanto, as propriedades de transporte destes íons no concreto.

A ABNT NBR 7211:2022 estabelece os limites máximos de cloretos presentes nos agregados iguais a 0,2% para uso em concreto simples e 0,1% em concreto armado. Agregados que excedam os limites estabelecidos podem ser utilizados em concreto, desde que o teor total introduzido no concreto por todos os seus componentes, não exceda os limites de 0,15% para concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura, 0,40% para concreto armado em condições de exposição não severas e 0,30% para outros tipos de construção em concreto armado. Na presente pesquisa, o teor de cloretos foi determinado para o concreto produzido com todos os seus componentes, e não apenas para os agregados ou cimento, como estabelece a NBR 14832 (ABNT, 2022). Os teores médios para as amostras expostas tanto ao ataque conjunto quanto ao ataque de cloretos, pós o 12º ciclo de deterioração, ultrapassaram todos os limites estabelecidos.

Salienta-se que a profundidade em que foram determinados os teores de cloretos impede a análise completa do perfil de penetração dos íons, sendo necessário determinar o teor de cloretos para maiores profundidades. Porém, de maneira geral, existe coerência entre os maiores teores apresentados e os tipos de cimento analisados.

4.1.6.2 Avaliação da profundidade de penetração de cloretos

A avaliação qualitativa da profundidade de penetração de cloretos no concreto foi realizada ao final do 12º ciclo e foi obtida para os CPs cúbicos (8x8x8 cm) sem armadura, expostos ao ataque conjunto e ao ataque de cloretos, nas mesmas condições que os CPs com

armadura inserida, por meio de aspersão com solução indicadora de nitrato de prata sobre a superfície fraturada do concreto.

As médias foram calculadas a partir dos valores obtidos para duas amostras de cada concreto em cada condição de deterioração e estão indicadas na Tabela 11 abaixo. As amostras foram nomeadas de acordo com o tipo de cimento utilizado em cada traço (3, 4 ou 5), seguido pelo tipo de ataque a que estava sujeita: Ataque Conjunto (AC) ou Ataque de Cloretos (CL). A profundidade de penetração máxima considerada para cada lado do corpo de prova foi de 40 mm.

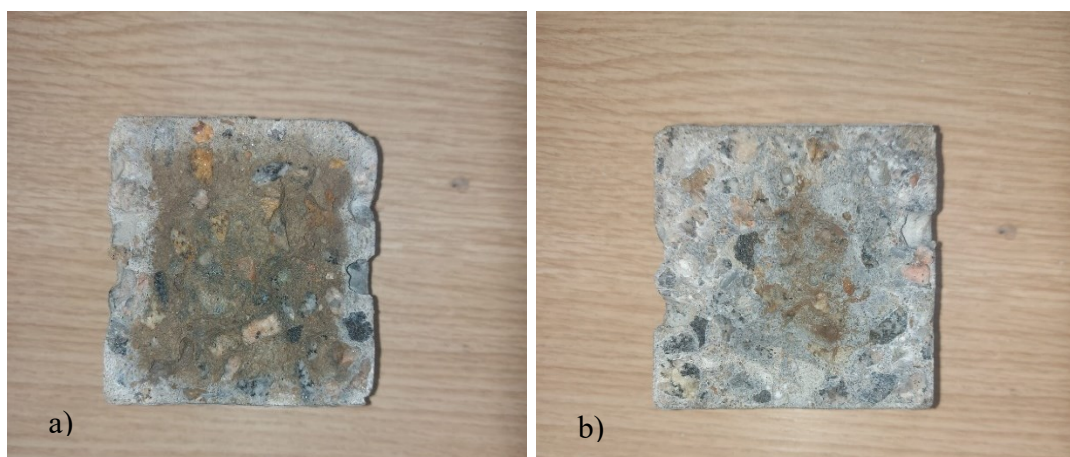
Tabela 11 – Profundidade de penetração de cloretos por aspersão de nitrato de prata após o 12º ciclo de deterioração

| | Penetração de cloretos | | | | | |
|----------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3AC | 3CL | 4AC | 4CL | 5AC | 5CL |
| Profundidade (mm) | 27,59 | 11,53 | 32,39 | 24,59 | 32,13 | 29,69 |
| Desvio (mm) | 10,55 | 8,83 | 8,59 | 10,58 | 9,07 | 10,42 |
| Área contaminada (%) | 72,92 | 40,57 | 83,92 | 67,54 | 84,36 | 80,73 |

Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 51 mostra as superfícies fraturadas dos CPs de concreto, onde foi aspergida a solução de nitrato de prata. A região em tom prateado identifica a presença de cloretos. A Figura 51-a apresenta a amostra que obteve menor penetração de cloretos, que ocorreu para o concreto de CPIII-32-RS sob ataque apenas de cloretos, enquanto a Figura 51-b a que obteve a maior penetração, ocorrida para o concreto de CPV-ARI, na condição de ataque conjunto. No Apêndice L estão dispostas as profundidades de penetração de cloretos para todas as amostras.

Figura 51 – Profundidade de penetração de cloretos para as amostras 3CL (a) e 5AC (b)



Fonte: Elaborado pela autora

Na condição de ataque conjunto e também de ataque único de cloretos, as maiores profundidades de penetração de cloretos foram observadas nos CPs produzidos com CPV-ARI, seguidos pelo CPIV-32-RS. Estes resultados são coerentes com os maiores teores de cloreto apresentados pelas amostras produzidas com estes dois tipos de cimento. Tais resultados justificam-se pelo maior valor de carga passante, indicando uma maior facilidade de penetração dos íons cloreto. Além disso, ocorre uma provável redução da reserva alcalina em concretos fabricado com CPIV-32-RS, o que aumenta a velocidade de propagação da frente de carbonatação, proporcionando a liberação dos cloretos previamente ligados.

No concreto fabricado com CPV-ARI, como citado no tópico anterior, foi observado o menor teor de cloretos, para o ataque conjunto. Na tabela 11, é apresentado uma maior profundidade de penetração de cloretos, evidenciando que as amostras podem apresentar teor de cloretos reduzido próximo a superfície como resultado da redistribuição de cloretos pela carbonatação para maiores profundidades, tal como foi observado por Wang *et al.* (2017). Os autores verificaram que a carbonatação de concretos contaminados com cloretos resultou em uma redistribuição dos cloretos para maiores profundidades devido à liberação de íons Cl^- que estavam anteriormente ligados a produtos de hidratação, e devido às alterações microestruturais do concreto. Dessa forma, o pico do teor de cloretos não permaneceu na camada de cobrimento, mas moveu-se para o interior do concreto.

As menores profundidades de penetração de cloretos, na condição de ataque conjunto, ocorreram para as amostras produzidas com CPIII-32-RS, com 27,59 mm. O teor de cloretos apresentado no tópico anterior é coerente com esse resultado uma vez que o teor médio de cloretos solúveis na mesma condição foi de 0,38%, valor inferior aos das amostras de CPIV-32-RS. Como supracitado, embora os concretos produzidos com CPV-ARI tenham apresentado menores teores de cloretos, estes exibiram grandes profundidades de penetração de íons, próximas as profundidades apresentadas pelos concretos com CPIV-32-RS.

Nos concretos expostos a degradação por ataque de cloretos, maiores profundidades de penetração de cloretos foram observadas nas amostras produzidas com CPV-ARI, com 29,69 mm. Observa-se que para o CPV-ARI houve uma redução de 7,6% na profundidade de penetração de cloretos para a condição de ataque conjunto.

A menor profundidade de penetração, para ataque de cloretos apenas, ocorreu para o concreto produzido com CPIII-32-RS, com média de 11,53 mm, representando uma redução de 58,2% na profundidade de penetração de cloretos em comparação a profundidade de penetração na condição de ataque conjunto, enquanto as amostras de CPIV-32-RS apresentaram uma redução de 24,1%. Dessa forma, o cimento que apresentou vantagens em termos de

menores penetrações de cloretos tanto para a condição de ataque conjunto entre carbonatação e cloretos, quanto para o mecanismo de ataque único de cloretos, foi o CPIII-32-RS.

Este comportamento era esperado, uma vez que as amostras produzidas com este cimento apresentaram o menor valor de carga passante comparativamente as demais amostras, indicando uma baixa penetrabilidade dos íons. O resultado também é coerente com o encontrado por Yildirim, Ilica e Sengul (2011), que ao realizarem o mesmo ensaio, observaram que a permeabilidade de cloretos em concretos produzidos com cimento de escória de alto-forno foi substancialmente menor do que de outros cimentos. Como citado anteriormente, a adição de escória promove uma menor permeabilidade, o que pode reduzir o transporte de íons cloretos no concreto.

De fato, o controle da difusão de cloretos no concreto pode estar relacionado à sua composição química e mineralógica. Pesquisadores observaram que a relação água/cimento não é o parâmetro primário para controle da difusão de cloretos no concreto, sendo que outros fatores afetam mais significativamente esta propriedade, como o teor de aluminatos, a finura do cimento utilizado e a relação água/aglutinante (Ribeiro *et al.*, 2021).

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram que as profundidades de penetração de cloretos foram superiores para as amostras submetidas ao ataque conjunto entre carbonatação e cloretos, comparativamente as amostras expostas ao ataque único de cloretos. Estes resultados sugerem que a carbonatação influenciou para um aumento da profundidade de penetração de cloretos, provavelmente devido a redução da capacidade de ligação dos cloretos, já estabelecida por alguns autores, como Liu *et al.* (2016) e Wang *et al.* (2017).

Quanto ao tipo de cimento utilizado, observa-se que os CPs produzidos com CPIII-32-RS apresentaram menores profundidades de penetração de íons, para todas as condições, indicando uma maior resistência desse cimento contra o ataque de cloretos, enquanto as amostras com CPV-ARI apresentaram as maiores profundidades, o que pode ser explicado pelo seu maior grau de penetrabilidade de cloretos.

4.1.6.3 Avaliação da profundidade de carbonatação

A avaliação qualitativa da profundidade de carbonatação no concreto foi realizada ao final do 5º, do 9º e do 12º ciclo para análise da evolução da carbonatação ao longo do tempo, por meio aspersão com solução indicadora de fenolftaleína sobre a superfície fraturada do concreto. As profundidades de carbonatação foram determinadas em CPs prismáticos (8x8x15 cm).

As médias foram calculadas a partir dos valores obtidos para duas amostras de cada concreto em cada condição de deterioração e estão indicadas na Tabela 12 abaixo. As amostras foram nomeadas de acordo com o tipo de cimento utilizado em cada traço (2, 3, 4 ou 5), seguido pelo tipo de ataque a que estavam sujeitas, Ataque Conjunto (AC) ou Carbonatação (CO). A profundidade de penetração máxima para cada lado do corpo de prova foi de 40 mm.

Tabela 12 – Profundidade de carbonatação e área carbonatada do concreto após o 5º, 9º e 12º ciclos de deterioração

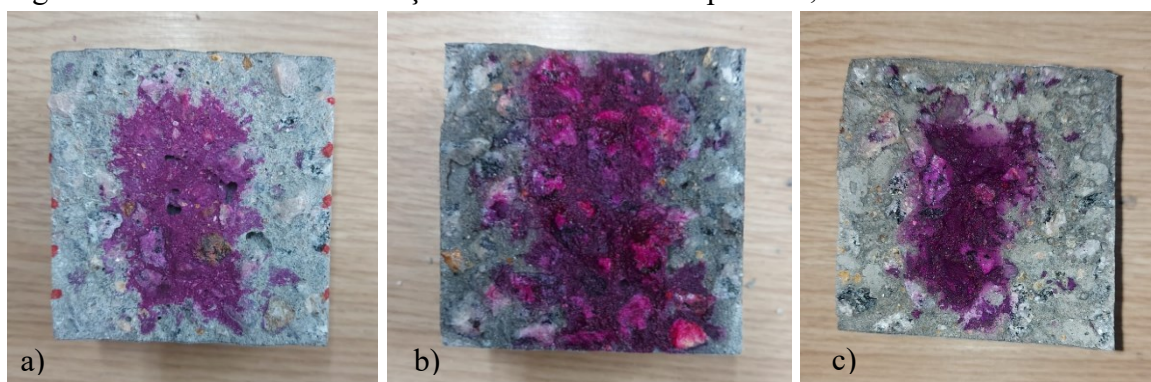
| | AMOSTRA | | | | | |
|---|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3AC | 3CO | 4AC | 4CO | 5AC | 5CO |
| Profundidade de carbonatação - 5º ciclo (mm) | 11,26 | 19,33 | 12,92 | 20,15 | 6,53 | 10,29 |
| Desvio (mm) | 6,40 | 10,94 | 6,82 | 10,75 | 3,46 | 5,53 |
| Área carbonatada – 5º ciclo (%) | 42,26 | 55,44 | 46,97 | 62,10 | 24,80 | 37,07 |
| Profundidade de carbonatação - 9º ciclo (mm) | 13,24 | 22,83 | 17,88 | 18,82 | 3,83 | 9,11 |
| Desvio (mm) | 9,22 | 11,16 | 11,58 | 12,26 | 2,79 | 8,29 |
| Área carbonatada – 9º ciclo (%) | 50,78 | 71,74 | 58,21 | 59,37 | 21,32 | 34,34 |
| Profundidade de carbonatação - 12º ciclo (mm) | 18,07 | 20,23 | 14,99 | 22,86 | 4,28 | 9,02 |
| Desvio (mm) | 10,96 | 11,87 | 10,19 | 11,58 | 2,73 | 8,53 |
| Área carbonatada – 12º ciclo (%) | 54,78 | 62,43 | 51,43 | 66,59 | 18,80 | 32,90 |

Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 12, verifica-se que o aumento da profundidade de carbonatação não ocorreu de forma crescente, apresentando inclusive reduções de profundidade entre as medições realizadas no 5º, 9º e 12º ciclos de deterioração. Salienta-se que estes resultados representam as médias de medições feitas em 2 CPs, onde foram realizadas 20 medidas em cada um, totalizando uma média entre 40 valores. Portanto pode haver discrepâncias entre um CP e outro de forma a alterar a média final. Soma-se a isso o fato de que os ensaios foram realizados em diferentes amostras de um mesmo CP, uma vez que o corpo de prova foi produzido com 15cm de altura, sendo destinadas uma fatia de 5cm para cada uma das medições, dessa forma, a penetração de CO₂ pode ter ocorrido de forma diferente em toda a altura da amostra, devido as propriedades heterogêneas do concreto. Além disso, os CPs foram expostos a ciclos úmidos por imersão parcial, onde apenas metade do CP ficava submerso, assim a umidade não foi constante em toda a altura da amostra influenciando na frente de carbonatação medida, uma vez que a penetração de CO₂ depende da umidade do

concreto. Esse fato pode ser observado na Figura 52-a, 52-b e 52-c abaixo, onde a profundidade de carbonatação no corpo-de-prova 4CO2 (CPIV-32-RS, sujeito ao ataque único de CO₂, CP2) reduziu do 5º para o 9º ciclo. No Apêndice M estão dispostas as frentes de carbonatação para todas as amostras.

Figura 52 - Frente de carbonatação da amostra 4CO2 após o 5º, 9º e 12º ciclos de deterioração



Fonte: Elaborado pela autora

Outro ponto a ser observado nas frentes de carbonatação exibidas na Figura 52, é o formato pouco regular apresentado. Este fato pode ser associado à formação do ácido carbônico em excesso sob a concentração de 20 % de CO₂ (Cascardo; Carasek, 2011), que possivelmente alterou a configuração do perfil carbonatado, penetrando em regiões que, sob carbonatação natural ou em menores teores de concentração, não seriam afetadas.

De acordo com os dados apresentados, o concreto de CPV-ARI exibiu as menores profundidades de carbonatação comparativamente aos demais concreto para ambas as condições de deterioração. Estes resultados estão relacionados à porosidade dos concretos, uma vez que o concreto de CPV-ARI exibiu maior resistência à compressão e menor índice de vazios em comparação aos demais concretos. A relação entre porosidade e penetração de agentes agressivos já foi tratado em outros trabalhos como na pesquisa realizada por Al-Ameeri, Rafiq e Tsioulou (2021), onde os autores observaram que o aumento na profundidade de carbonatação ocorreu de acordo com a relação água/cimento como resultado do acréscimo na porosidade do concreto e volume de vazios permeáveis, facilitando a penetração de CO₂.

Os concretos produzidos com CPIII-32-RS e CPIV-32-RS apresentaram frentes de carbonatação aproximadas, com profundidades de carbonatação sempre superiores ao do concreto de CPV-ARI, o que pode ser justificado tanto pela maior resistência à compressão deste último concreto (Al-Ameeri; Rafiq; Tsioulou, 2021), quanto pela composição dos cimentos. Ligantes com adições minerais, como escória de alto-forno e cinza volante, formam

menos Hidróxido de Cálcio quando comparados com ligantes sem essas adições minerais. Consequentemente, para uma mesma exposição e tempo, o ingresso da carbonatação nestes concretos é maior do que em concretos com ligantes comuns (Saillio; Baroghel-Bouny; Barberon, 2014).

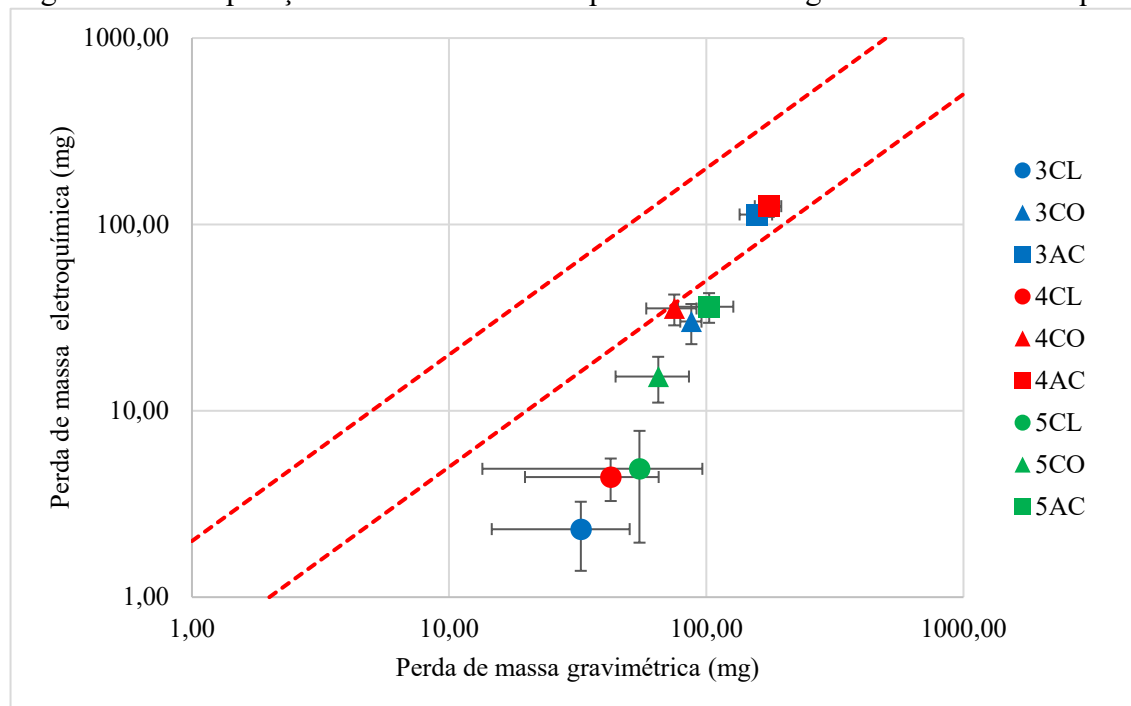
De forma geral, os concretos de cada tipo de cimento apresentaram maior frente de carbonatação quando submetidas a carbonatação individualmente comparada ao ataque conjunto. Este resultado também foi observado no estudo de Liu *et al.* (2016), onde concretos sujeitos ao efeito composto de cloretos e carbonatação apresentaram uma menor profundidade de carbonatação quando comparado a concretos expostos somente a carbonatação. Para os autores, a taxa de carbonatação é reduzida pelo ingresso de cloretos. Kuosa *et al.* (2014) afirmam que a higroscopia dos cloretos no concreto relaciona-se a um maior teor de umidade e espessura da película de água dentro dos poros retardando o processo de carbonatação. Em contrapartida, a rede de poros pode ser preenchida pela precipitação de cristais à base de cloretos, o que posterga a penetração do dióxido de carbono (Liu *et al.*, 2016).

Na primeira medição, a frente de carbonatação já havia ultrapassado o equivalente a camada de cobertura para todas as amostras, excluindo-se os concretos fabricados com CPV-ARI. Com exceção das amostras 5CO e 5AC, todas apresentaram crescimento da profundidade de carbonatação entre a primeira e a última medição, porém o crescimento da frente de carbonatação entre o 5º ciclo e o 12º ciclo de deterioração foi menor do que o observado entre o início da deterioração e a primeira medição. Após o 5º ciclo houve uma desaceleração no avanço da frente de carbonatação, que pode ter sido causado pelo preenchimento dos poros pelos produtos das reações, retardando a penetração de CO₂, influenciado na velocidade de carbonatação. De acordo com Cui *et al.* (2015), a formação de uma estrutura densa de concreto carbonatado retarda o processo de carbonatação, pois os poros das camadas mais externas de concreto são preenchidos e obstruídos com partículas, dessa forma, o concreto torna-se menos permeável à difusão de CO₂ devido aos menores poros e sua baixa conectividade.

4.1.7 Perda de massa gravimétrica e eletroquímica das armaduras

A Figura 53 apresenta a comparação entre a perda de massa gravimétrica e a eletroquímica para as barras embutidas nos corpos-de-prova expostos a cada condição de ataque. As linhas correspondem ao fator de erro igual a 2, conforme utilizado em outras pesquisas, como a de Oliveira, Bragança e Medeiros Junior (2022).

Figura 53 - Comparação entre as médias das perdas de massa gravimétrica e eletroquímica



Fonte: Elaborado pela autora

A partir dos dados expostos é possível notar que as armaduras sujeitas ao ataque conjunto apresentaram maiores valores de perda de massa gravimétrica e eletroquímica. Para as armaduras em concreto de CPIII-32-RS esse aumento foi de 384,6% e de 80% em comparação ao ataque de cloretos e a carbonatação, respectivamente. Nas barras em concreto produzido com CPIV-32-RS, foi observado um crescimento para o ataque conjunto de 311,8% em comparação ao ataque de cloretos e de 133,3% com a carbonatação. O acréscimo na perda de massa gravimétrica para as barras imersas em concreto de CPV-ARI sujeitas ao ataque sinérgico foi de 86,4% e 57,7% comparativamente ao ataque de cloretos e à carbonatação, respectivamente.

Os resultados da perda de massa gravimétrica objetivam revelar uma imagem real da situação enquanto o método eletroquímico pode mostrar uma situação errônea, dado que, no tempo do teste, a presença dos produtos de corrosão que criaram a camada protetiva já possam estar presentes nas barras (Oliveira; Bragança; Medeiros Junior, 2022). Neste trabalho, as maiores perdas de massa gravimétricas foram verificadas nas armaduras sujeitas ao ataque conjunto, seguida pela degradação por carbonatação e cloretos, respectivamente, ratificando os resultados apresentados pela medição das variáveis eletroquímicas, de que a sinergia entre os ataques de degradação combinados foi mais nociva do que o ataque individual de cada agente

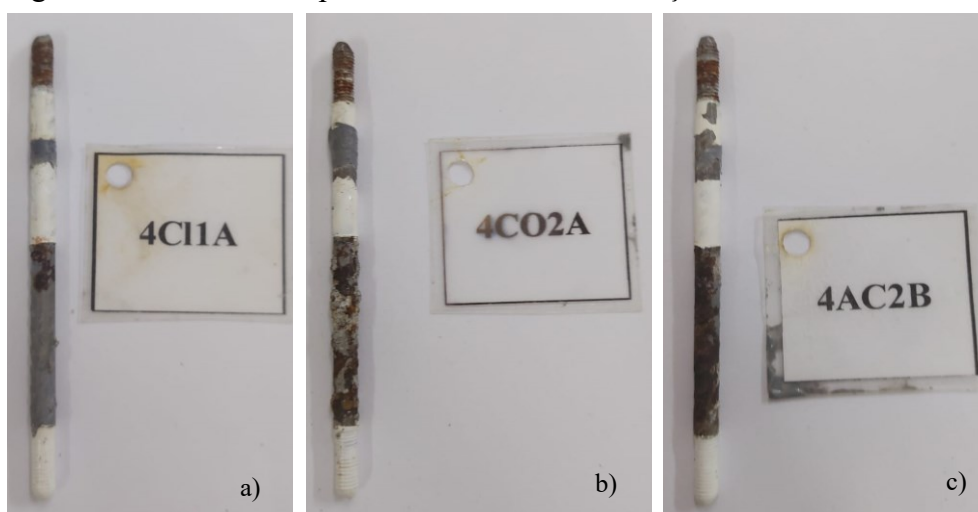
agressivo. Sendo que as maiores perdas de massa gravimétricas para o ataque conjunto ocorreram para armaduras inseridas no concreto produzido com o CPIV-32-RS e para o ataque único de carbonatação para as barras inseridas no concreto com CPIII-32-RS. Já para o ataque por cloretos, a maior perda foi observada para as barras imersas no concreto de CPV-ARI.

De acordo com a Figura 53, pode-se notar que a maior parte dos dados referentes as barras submetidas ao ataque conjunto permanecem dentro do erro estimado proposto pela literatura, enquanto as demais apresentaram dispersão com perda de massa gravimétrica superior a perda de massa eletroquímica, onde este efeito é ainda mais significativo nas barras submetidas ao ataque de cloretos.

A dispersão nos resultados de perda de massa eletroquímica pode ser explicada pela deterioração não uniforme das barras, que não chegou a atingir toda a área de aço exposta. Assim, como a área de corrosão efetiva foi inferior a área considerada no cálculo, o resultado de perda de massa eletroquímica foi subestimado. Isso foi observado na pesquisa de Oliveira, Bragança e Medeiros Junior (2022), para os autores as distorções encontradas entre os dados gravimétricos e eletroquímicos para a perda de massa resultaram do fato de que a corrosão causada pelos cloretos apresenta uma deterioração não uniforme, onde os pites levam a perdas de massa localizadas no aço, enquanto no cálculo, considera-se a densidade de corrente média que ocorre sobre toda a superfície exposta do eletrodo de trabalho.

Isso pode ser observado na Figura 54-a, 54-b e 54-c, onde estão expostas para o mesmo traço, as barras 4CL1A, 4CO2A e 4AC2B sujeitas ao ataque de cloretos, a carbonatação única e ao ataque conjunto respectivamente, após o 12º ciclo de deterioração.

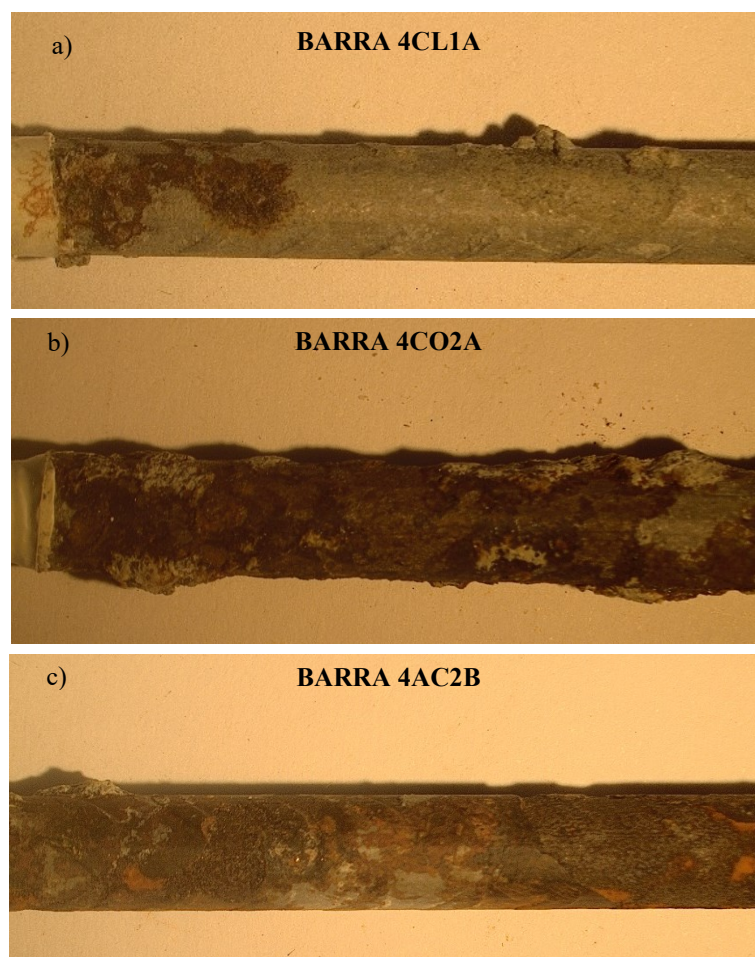
Figura 54 - Armaduras após o 12º ciclo de deterioração



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 55-a, 55-b e 55-c, feita com o auxílio de um estereomicroscópio disponibilizado pelo LPC/UFC, é possível notar o aspecto provocado por cada mecanismo de deterioração nas armaduras de forma ampliada.

Figura 55 - Configuração da deterioração das armaduras após o 12º ciclo de deterioração



Fonte: Elaborado pela autora

A deterioração não foi uniforme em todas as armaduras, percebe-se que para o ataque único de cloretos, representado pela barra 4CL1A, a deterioração ocorreu de forma localizada em uma área reduzida, enquanto para o mecanismo de carbonatação, na barra 4CO2A, o ataque ocorreu de forma mais generalizada, embora não tenha atingido toda a área exposta no período de ensaio. Já para o ataque conjunto, na barra 4AC2B, a deterioração atingiu quase a totalidade da superfície do aço. Isso corrobora com uma melhor equivalência entre a perda de massa gravimétrica e eletroquímica para a condição de ataque conjunto, uma vez que a área deteriorada foi próxima à área exposta utilizada no cálculo, assim, a barra 4AC2B ficou dentro do limite de erro esperado, como pode ser visto no Apêndice K, onde estão expostos os

valores das massas das barras antes e após a deterioração, assim como o gráfico comparativo entre perda de massa gravimétrica e eletroquímica para cada barra.

Uma outra possibilidade para uma maior perda de massa gravimétrica em comparação a eletroquímica seria causada pela ineficiência da limitação da área a ser corroída, de forma que uma área não considerada no cálculo fosse deteriorada, aumentando a perda de massa gravimétrica. Na presente pesquisa isso não foi observado, dado que a limitação da área pela tinta epóxi impediu a corrosão além do limite especificado, como pode ser observado na Figura 56 abaixo.

Figura 56 - Área previamente pintada para limitação de superfície exposta à corrosão

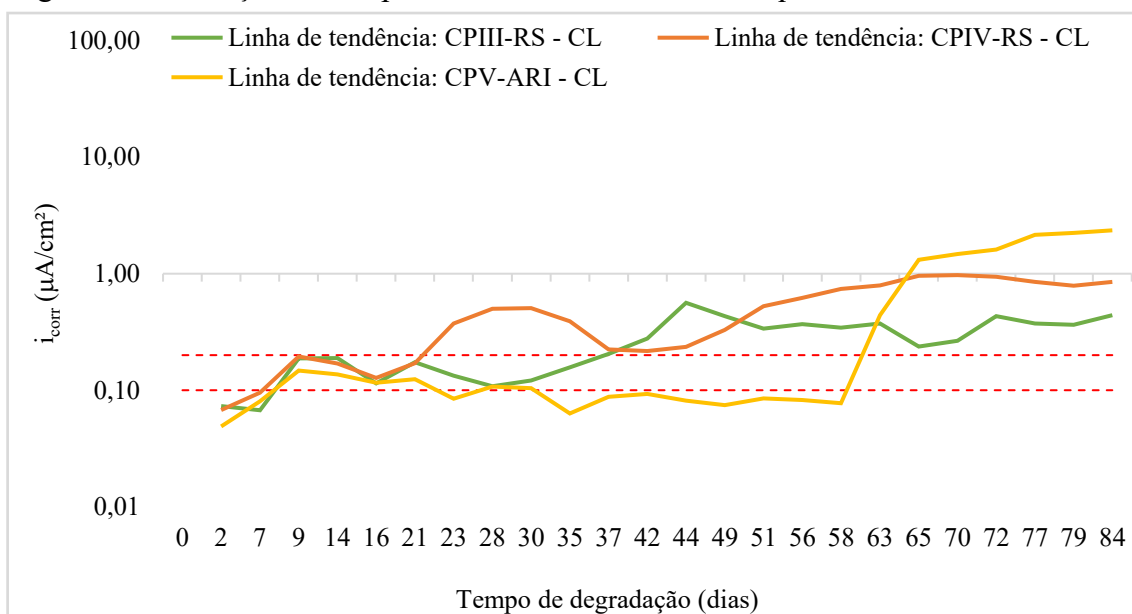


Fonte: Elaborado pela autora

4.2 Discussão dos resultados

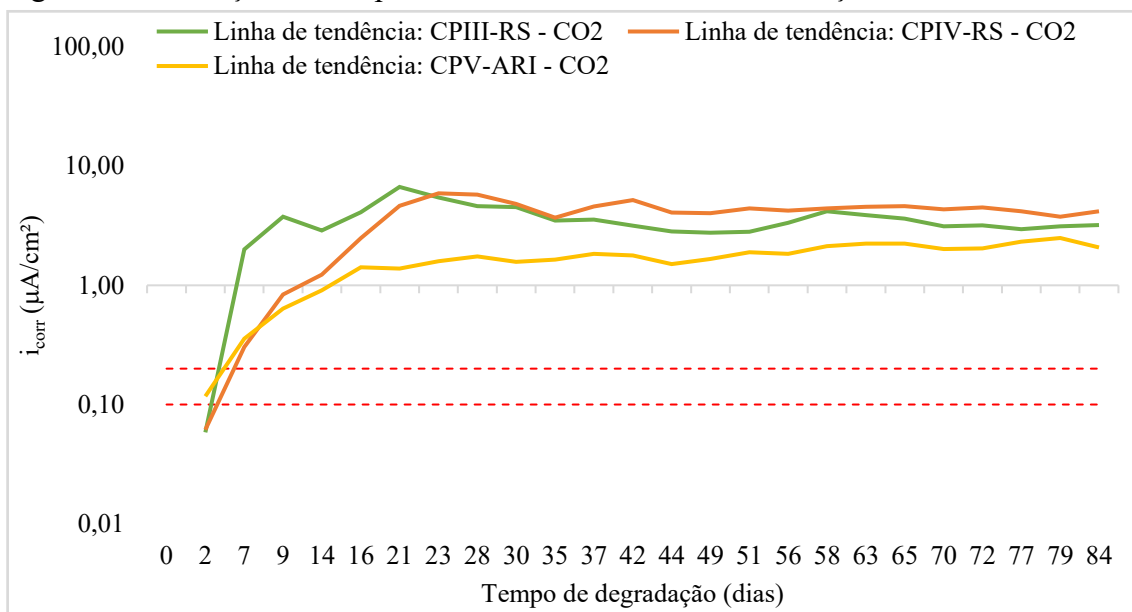
O tipo de cimento tem influência no nível de degradação provocado pelos ataques estudados. As Figuras 57 a 59 mostram a evolução da taxa de corrosão (i_{corr}), através de linhas de tendência, para as amostras produzidas com CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI, respectivamente, para ataque de cloretos, carbonatação e ataque conjunto, de forma a comparar como cada cimento se comporta frente ao tipo de degradação a que estão sujeitos. Nas Figuras, o limite da taxa de corrosão das barras de aço foi limitado por linhas vermelhas pontilhadas, na horizontal.

Figura 57 - Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos ao ataque de cloretos



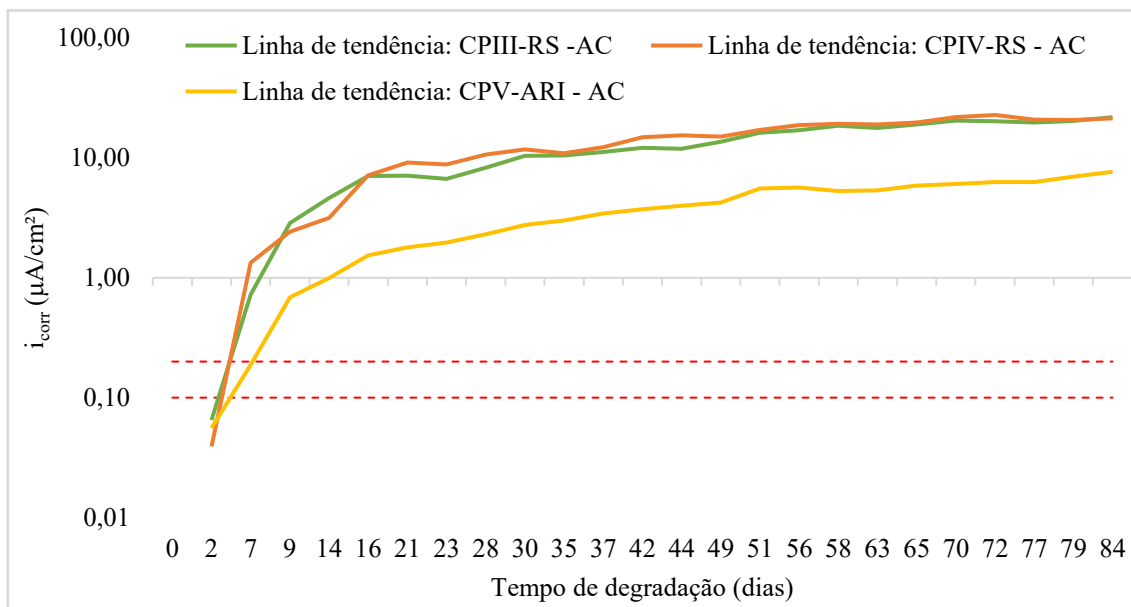
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 58 - Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos à carbonatação acelerada



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 59 - Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos ao ataque conjunto de carbonatação e cloretos



Fonte: Elaborado pela autora

Por meio dos dados das figuras apresentadas é possível analisar como as armaduras dos concretos produzidos com cada tipo de cimento se comportaram, em cada condição de deterioração separadamente, no que diz respeito a intensidade de corrosão. Ao se comparar o i_{corr} das barras submetidas ao ataque de cloretos (Figura 57), nota-se que as barras imersas em concreto de CPV-ARI apresentaram maiores taxas de corrosão nos ciclos finais, seguidas pelas armaduras dos concretos com CPIV-32-RS e CPIII-32-RS, em ordem decrescente.

A maior taxa de corrosão para as armaduras de concreto com CPV-ARI pode ser explicada pela maior profundidade de penetração de cloretos, com relação aos demais concretos produzidos, além do maior valor de carga passante, indicando uma penetrabilidade de íons mais expressiva do que os concretos com CPIV-32-RS e CPIII-32-RS.

As menores taxas de corrosão apresentadas nos últimos ciclos de deterioração, para as armaduras expostas ao ataque único de cloretos, nos CPs de CPIII-32-RS, comparativamente com os demais tipos de cimento, podem ser justificadas pela maior resistência ao ataque de cloretos devido ao menor valor de carga passante, classificando como de baixa penetração aos íons. Adicionalmente, foram observadas menores concentrações de cloretos na profundidade de 10mm em comparação às demais amostras, além de uma menor profundidade de penetração de cloretos após o 12º ciclo nas duas condições.

Salienta-se que embora as amostras do concreto de CPV-ARI tenham apresentado taxas de corrosão inferiores às demais armaduras até a despassivação, após isso desenvolveram

maiores taxas mais rapidamente e a partir do 63º dia, no 9º ciclo seco aproximadamente, ultrapassaram as barras dos demais concretos. Esse maior período para despassivação pode ser atribuído a características como menor índice de absorção e de vazios. Porém, o crescimento acelerado do i_{corr} após a despassivação pode estar relacionado a menor resistência ao ataque de cloretos no ensaio de determinação da penetrabilidade de cloretos, onde, essas amostras foram consideradas como de moderada penetrabilidade de íons. Verificou-se ainda, altos teores de cloretos ao final do 12º ciclo, além de grande profundidade de penetração de cloretos.

Conforme tratado no tópico 4.1.2, o i_{corr} das barras submetidas ao ataque de cloretos geralmente foi inferior ao das barras submetidas as demais condições de degradação estudadas, independentemente do tipo de cimento empregado. Isso pode ser corroborado pelas menores perdas de massa gravimétrica que ocorreram para as barras submetidas ao ataque único de cloretos. Nesta condição, a maior perda de massa gravimétrica ocorreu para as amostras com CPV-ARI, e a menor para as amostras com o CPIII-32-RS, o que confirma as maiores e menores taxas de corrosão apresentadas.

Na Figura 58 está apresentado a evolução do i_{corr} para todas as amostras submetidas à carbonatação acelerada, onde se percebe que, as armaduras em concreto produzido com CPIV-32-RS apresentaram maiores taxas de corrosão comparativamente aos demais tipos de cimento a partir do 36º dia. No entanto a diferença entre os valores de i_{corr} para as amostras de CPIII-32-RS foi pequena.

As barras imersas em concreto com CPV-ARI desenvolveram menores taxas de corrosão desde os ciclos iniciais. Essa redução no i_{corr} pode ser justificada tanto pela maior resistência mecânica, menor índice de vazios e absorção, quanto pela composição dos cimentos, pois, de acordo com Saillio, Baroghel-Bouny e Barberon (2014), o ingresso da carbonatação em ligantes com adições minerais é superior à de ligantes comuns, devido a menor disponibilidade de hidróxido de cálcio.

Para reforçar os resultados observados foi realizado o ensaio de profundidade de carbonatação, explanado no tópico 4.1.5.7. No referido ensaio, observou-se que as profundidades de carbonatação para os concretos de CPIII-32-RS e CPIV-32-RS foram próximas e superiores às profundidades apresentadas pelo concreto com CPV-ARI. Logo, o ataque por carbonatação única promoveu um nível de deterioração próximo para os concretos produzidos com CPIII-32-RS e CPIV-32-RS, salientando-se que o concreto com CPIV-32-RS apresentou propriedades de durabilidade inferiores.

A profundidade de carbonatação para o concreto de CPV-ARI foi inferior às apresentadas pelos demais concretos desde o início, o que se ressalta por ser o único concreto

em que a profundidade de carbonatação não havia ultrapassado o limite do cobrimento no 5º ciclo, corroborando com as menores taxas de corrosão observadas.

Os valores de perda de massa gravimétrica reforçam os resultados encontrados, uma vez que para o ataque único por carbonatação, a maior perda de massa gravimétrica ocorreu para as barras das amostras de CPIII-32-RS, por uma pequena diferença, seguidas pelas barras dos concretos com CPIV-32-RS, indicando que a degradação ocorreu de forma bastante similar para as armaduras inseridas nestes dois concretos. A menor perda de massa foi registrada para as amostras de CPV-ARI.

De acordo com a Figura 59, para o ataque conjunto, os maiores valores de i_{corr} foram exibidos pelas barras das amostras produzidas com CPIV-32-RS e CPIII-32-RS, com valores muito próximos, seguido pelas barras nos concretos com CPV-ARI. Nota-se que o concreto produzido com CPV-ARI proporcionou i_{corr} máximo inferior a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, enquanto as demais amostras atingiram valores próximos ou superiores a $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando uma maior resistência desse concreto ao ataque conjunto. Ao comparar os valores de perda de massa gravimétrica, observa-se que, as maiores perdas ocorreram para as barras inseridas nos concretos com CPIV-32-RS e CPIII-32-RS, tendo o concreto com CPV-ARI apresentado valores mais baixos, o que confirma o comportamento do gráfico de i_{corr} para o ataque sinérgico.

Conforme já estabelecido nos tópicos anteriores, o ataque conjunto entre carbonatação e cloretos influenciou no processo corrosivo de forma mais intensa que a carbonatação e ataque de cloretos individualmente, o que pode ser observado pelos maiores valores de i_{corr} , sendo confirmado pelas maiores perdas de massa gravimétricas. Este tipo de ataque possui uma melhor equivalência entre a perda de massa gravimétrica e eletroquímica.

Ressalta-se que para todas as condições de ataque existe coerência entre os valores do potencial de corrosão e da taxa de corrosão, uma vez que, um incremento de potencial no sentido mais negativo implica em um incremento da taxa de corrosão no sentido mais positivo. Essa coerência também é observada entre o i_{corr} e R_{ohm} , tendo em vista que, há um incremento da taxa de corrosão no sentido mais positivo, quando ocorre uma redução da resistência ôhmica, ou seja, as barras que apresentaram maiores valores de R_{ohm} obtiveram menores valores de i_{corr} , com exceção das barras imersas em concreto com CPV-ARI na condição de ataque por carbonatação única, como já estabelecido.

Comparando-se o efeito do ataque conjunto ao ataque de cloretos, nota-se que as profundidades de penetração de cloretos foram superiores para as amostras submetidas ao ataque sinérgico, indicando que a carbonatação influenciou na capacidade de ligação dos cloretos, como já estabelecido por alguns autores, como Liu *et al.* (2016) e Wang *et al.* (2017).

Em contrapartida, as amostras apresentaram maior frente de carbonatação quando submetidas a carbonatação individualmente comparada ao ataque conjunto. Provavelmente devido a um maior teor de umidade causado pelo ingresso de cloretos e espessura da película de água dentro dos poros, retardando a carbonatação (Kuosa *et al.*, 2014).

Assim, a análise do ataque sinérgico é mais complexa, sendo necessário identificar que efeito prevalece durante o processo de degradação. Por exemplo, nota-se que algumas amostras apresentaram bom comportamento frente a ação de cloretos e eficiência inferior frente à carbonatação e ao ataque conjunto, como aquelas compostas de CPIII-32-RS. Em contrapartida, as amostras produzidas com CPV-ARI exibiram comportamento inverso, sendo menos resistentes ao ataque de cloretos e mais resistentes à carbonatação, com menor grau de degradação quando submetido ao ataque conjunto. Esses resultados podem estar atribuídos à diversos fatores, dos quais, destacam-se: a porosidade, a absorção de água, o índice de vazios e a composição dos cimentos.

4.3 Resumo dos resultados

Fundamentado nos resultados discutidos nos tópicos anteriores, foi possível resumir os principais resultados, de forma comparativa, entre cada ação de deterioração, para os três concretos estudados, como visto no Quadro 6. Para facilitar o entendimento, foram adotados símbolos, onde um círculo vermelho grande representa um maior valor para a variável analisada, um círculo amarelo médio representa um valor intermediário e um círculo verde pequeno indica que, naquela condição de ataque, o valor medido foi menor. O símbolo “x” indica que aquela variável não foi analisada para a condição de ataque em questão. Salienta-se que as comparações são feitas entre as ações de deterioração, para cada tipo de cimento individualmente.

Analisando o Quadro 6, pode-se afirmar que a profundidade de penetração de cloretos foi superior para a condição de ataque conjunto em comparação ao ataque de cloretos para todos os tipos de cimentos estudados. Os valores de teor de cloretos, após o 12º ciclo, foram superiores para a condição de ataque conjunto em todos os tipos de cimento, com exceção do CPV-ARI, demonstrando uma maior agressividade do ataque conjunto em comparação ao ataque único de cloretos, provavelmente pelo efeito de liberação dos cloretos combinados, aumentando assim o teor de cloretos livres, devido à carbonatação das amostras. Com relação à profundidade de carbonatação, esta foi maior para a condição de ataque único por

carbonatação em comparação ao ataque conjunto, sendo este fato observado em todas as amostras.

Quadro 6 – Resumo dos resultados

| Variáveis mensuradas para cada traço | Traços | | | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|----|-----------------|-----------------|----|-----------------|-----------------|----|
| | CPIII-32-RS | | | CPIV-32-RS | | | CPV-ARI | | |
| | Cl ⁻ | CO ₂ | AC | Cl ⁻ | CO ₂ | AC | Cl ⁻ | CO ₂ | AC |
| Profundidade de penetração de cloretos após 12º ciclo | ● | ⊗ | ● | ● | ⊗ | ● | ● | ⊗ | ● |
| Teor de cloretos após o 12º ciclo | ● | ⊗ | ● | ● | ⊗ | ● | ● | ⊗ | ● |
| Profundidade de carbonatação após o 12º ciclo | ⊗ | ● | ● | ⊗ | ● | ● | ⊗ | ● | ● |
| Redução da resistência ôhmica | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Potencial de corrosão das armaduras | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Taxa de corrosão das armaduras | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Perda de massa gravimétrica | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

Fonte: Elaborado pela autora

As maiores variações de R_{ohm} , com relação a resistência inicial, ocorreram para as barras imersas em CPs sujeitos ao ataque conjunto de carbonatação e cloretos, para todos os tipos de cimento. Para a condição de ataque de cloretos nos CPs com CPV-ARI, a redução da R_{ohm} também foi significativa e muito próxima da condição de ataque conjunto. As amostras produzidas com CPV-ARI, na condição de ataque por carbonatação, apresentaram um comportamento diferente, uma vez que a R_{ohm} cresceu significativamente com o decorrer dos ciclos de deterioração. No que concerne o potencial de corrosão medido ao longo dos ciclos, para cada ação de deterioração, para todos os tipos de cimento analisados, o E_{corr} foi menos eletronegativo para a condição de ataque de cloretos. Analogamente, o E_{corr} foi mais eletronegativo para a condição de ataque conjunto, indicando que existe uma tendência de que o ataque sinérgico entre cloretos e carbonatação influenciou diretamente na intensidade do processo corrosivo. Isso é confirmado pelos maiores valores de i_{corr} apresentadas para a condição de ataque conjunto, comparativamente ao ataque por carbonatação e por cloretos, para as barras inseridas nos CPs de todos os tipos de cimento. Com relação à perda de massa gravimétrica, as maiores perdas ocorreram para a condição de ataque conjunto, em todas as

amostras, enquanto as menores perdas foram observadas para a condição de ataque por cloretos. Confirmando que o ataque conjunto entre carbonatação e cloretos, intensifica o processo corrosivo das armaduras em estruturas de concreto armado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões do trabalho estão descritas a seguir em função das avaliações realizadas, referentes a análise do efeito individual e sinérgico da carbonatação e do ataque de cloretos no fenômeno de corrosão das armaduras, em concreto armado produzido com três tipos de cimento distintos: CPIII-32-RS, CPIV-32-RS e CPV-ARI. Também serão feitas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

5.1 Conclusão

Através dos resultados apresentados na presente pesquisa, pode-se constatar algumas afirmações. Primeiramente, é notável que o efeito sinérgico entre as principais ações de deterioração relativas às armaduras, sendo estas, carbonatação e ataque de cloretos, tem implicações diretas sobre o fenômeno de corrosão, influenciando na velocidade de despassivação das barras e no crescimento da taxa de corrosão ao longo do tempo, comparativamente ao ataque de tais mecanismos individualmente.

As amostras sujeitas à degradação por ataque conjunto obtiveram um menor tempo de despassivação da armadura frente às demais condições de degradação. Salienta-se que embora o período para despassivação tenha ocorrido de forma igual ou próximo para as condições de ataque conjunto e carbonatação, o i_{corr} foi superior para as barras submetidas ao ataque sinérgico em todo o período de deterioração.

Adicionalmente, para todos os traços de concreto analisados, o E_{corr} foi mais eletronegativo para a condição de ataque sinérgico, comparativamente às condições de deterioração isoladas. Este fato é corroborado pelos maiores valores de i_{corr} observados nas armaduras submetidas a este tipo de ataque, bem como pela maior redução da R_{ohm} apresentada pelas amostras e pelas maiores perdas de massa gravimétrica, evidenciando o fato de que a sinergia entre os mecanismos de degradação foi mais nociva do que o ataque individual de cada agente agressivo.

No que concerne a caracterização dos concretos produzidos, os CPs com CPIII-32-RS e CPIV-32-RS apresentaram maiores valores de absorção de água e índice de vazios, indicando um melhor desempenho para o concreto de CPV-ARI, o qual obteve valores mais baixos nestes ensaios. Um resultado semelhante também foi obtido para a resistência à compressão, com os concretos de CPIII-32-RS e CPIV-32-RS atingindo a resistência esperada

de 20 MPa e o concreto de CPV-ARI chegando ao patamar de 25 MPa aos 28 dias, com este último concreto apresentando novamente melhores características frente aos demais.

No que diz respeito à penetrabilidade de cloretos, o concreto com CPV-ARI foi classificado como de penetrabilidade moderada, mostrando propriedades inferiores aos concretos com CPIV-32-RS e CPIII-32-RS, com este último apresentando um melhor desempenho, possibilitado pelas adições que geraram uma redução na difusibilidade dos íons cloretos.

Sob a perspectiva do ataque único de cloretos, os maiores teores de cloretos foram observados ao final do 12º ciclo para os concretos de CPIV-32-RS e CPV-ARI igualmente, com o concreto de CPIII-32-RS apresentando menores concentrações. Para a profundidade de penetração desses íons, maiores valores foram encontrados para os concretos produzidos com CPV-ARI e CPIV-32-RS, novamente muito próximos. Por sua vez, o concreto produzido com CPIII-32-RS apresentou menor profundidade de penetração para essa condição.

Ao se comparar o i_{corr} das armaduras, nota-se que aquelas imersas no concreto com CPV-ARI apresentaram maiores taxas de corrosão nos ciclos finais, seguidas pelas armaduras dos concretos com CPIV-32-RS e CPIII-32-RS, em ordem decrescente, confirmando a maior resistência do concreto de CPIII-32-RS ao ataque de cloretos. Estas afirmações são corroboradas pelos resultados da perda de massa gravimétrica, onde as barras imersas nos CPs com CPIII-32-RS tiveram os menores valores, sob a condição do ataque único de cloretos.

Na condição de deterioração por ataque sinérgico, os maiores teores de cloretos foram observados para os concretos produzidos com CPIV-32-RS. Adicionalmente, as maiores profundidades de penetração de cloretos foram observadas para as amostras com CPIV-32-RS, seguidas pelo CPV-ARI, com valores praticamente iguais.

As taxas de corrosão observadas nas armaduras submetidas ao ataque sinérgico foram superiores para as amostras em concreto de CPIV-32-RS e CPIII-32-RS. O concreto produzido com CPV-ARI proporcionou um i_{corr} máximo inferior a $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, enquanto as demais amostras atingiram valores próximos ou superiores a $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Ao se comparar os valores de perda de massa gravimétrica, as menores perdas ocorreram nas amostras com CPV-ARI, indicando uma maior resistência desse concreto também para o ataque conjunto.

Ressalta-se que a carbonatação teve efeito significativo sobre a profundidade de penetração de cloretos, pois, comparando-se o efeito do ataque conjunto ao ataque único de cloretos, nota-se que as profundidades de penetração de cloretos foram superiores para as amostras submetidas ao ataque sinérgico.

Com relação à profundidade de carbonatação, o concreto com CPV-ARI exibiu as menores profundidades, tanto para a condição de deterioração por ataque conjunto quanto por carbonatação única, de forma que os concretos com CPIII-32-RS e CPIV-32-RS apresentaram frentes de carbonatação muito próximas, mas sempre superiores às do CPV-ARI, fato este que pode ser explicado pela composição dos cimentos.

Indo de encontro com os resultados supracitados, o i_{corr} para as amostras submetidas à carbonatação única para as armaduras em concreto produzido com CPIV-32-RS foi superior a partir do 36º dia, em comparação aos demais tipos de concreto, no entanto a diferença entre os valores observados foi pequena para o CPIII-32-RS. As barras imersas em concreto com CPV-ARI desenvolveram menores taxas de corrosão desde os ciclos iniciais, enquanto as demais armaduras apresentaram valores de i_{corr} similares, indicando uma maior resistência ao ataque por carbonatação para o CPV-ARI. Isto pode ser confirmado pela menor perda de massa gravimétrica observada, para esta condição de degradação.

De modo geral, considerando-se os resultados eletroquímicos e de perda de massa gravimétrica, o concreto produzido com CPIII-32-RS apresentou melhor resistência à cloretos, porém obteve a menor eficiência frente ao ataque por carbonatação, juntamente com o concreto produzido com CPIV-32-RS. Em contrapartida, o concreto com CPV-ARI exibiu comportamento inverso, sendo menos resistente ao ataque de cloretos e obtendo a melhor resistência frente à carbonatação e ao ataque conjunto.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Estender o estudo para outros traços de concreto com resistência igual ou superior a 30MPa, tendo em vista que são as classes de concreto mais utilizadas;
- b) Utilizar outras técnicas eletroquímicas, como a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), para avaliação do processo corrosivo;
- c) Aplicar um maior número de ciclos de degradação, de forma a produzir uma área deteriorada compatível com a área utilizada no cálculo da perda de massa eletroquímica;
- d) Determinar o teor de cloretos em diversas profundidades para análise completa do perfil de penetração dos íons;
- e) Determinar, através de ensaio específico, os reais coeficientes de difusão para os diferentes tipos de concreto;
- f) Fazer uma previsão de vida útil para concretos usuais da cidade de Fortaleza submetidos ao ataque sinérgico entre carbonatação e cloretos.

REFERÊNCIAS

- AGRA, T.; LOBO, E.; MONTEIRO, E. Difusão de Íons Cloreto Em Cimentos de Escória de Alto-forno e Pozolânico. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, v. 2, nº 2, p. 122-127, 2017.
- AL-AMEERI, A. S.; RAFIQ, M. I.; TSILOULOU, O. Combined impact of carbonation and crack width on the Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Concrete Structures. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 115, 1 jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103819>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 876**: Standard Test Method for Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. United States, 2015.
- _____. **ASTM C 1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. United States, 2019.
- _____. **ASTM G-1/03**: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. United States, 2017.
- ANDRADE, C. Steel corrosion rates in concrete in contact to sea water. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 165, n. 10, mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107085>
- ANDRADE, C.; ALONSO, C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 37, n. 9, p. 623–643, nov. 2004.
- ANDRADE, J. J. DE O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região amazônica**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- _____. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **ABNT NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **ABNT NBR 9917: Agregados para concreto — Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis.** Rio de Janeiro, 2022.

_____. **ABNT NBR 14832: Cimento Portland e Clínquer — Determinação de cloreto pelo método do íon seletivo.** Rio de Janeiro, 2022.

_____. **ABNT NBR 15575 - 1. Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2024.

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

_____. **ABNT NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

_____. **ABNT NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIATION FOR MATERIALS PROTECTION AND PERFORMANCE - AMPP INTERNATIONAL. **International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study.** Houston, 2021.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos.** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMPOS, A. M. R. **Estudo da agressividade do ar atmosférico de Fortaleza/CE.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto - inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo: PINI, 1997.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. *In*: ISAIA, G. C. (ed.) **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011, cap. 24, vol 1, p. 849-885.

CHANG, H. Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 84, p. 1–9, 1 nov. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.011>

CHANG, H.; MU, S.; FENG, P. Influence of carbonation on “maximum phenomenon” in surface layer of specimens subjected to cyclic drying-wetting condition. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 103, p. 95–109, 1 jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.005>

CUI, H. *et al.* Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 93, p. 522–527, 25 jun. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.007>

DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

DE WEERDT, K. *et al.* Towards the understanding of chloride profiles in marine exposed concrete, impact of leaching and moisture content. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 120, p. 418–431, 1 set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.069>

ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2014.

GENG, J. *et al.* Effect of carbonation on release of bound chlorides in chloride-contaminated concrete. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 68, n. 7, p. 353–363, 1 abr. 2016. <http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.15.00234>

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Procedimento de ensaio de potencial de corrosão em corpos de prova de concreto armado: prática recomendada IBRACON**. São Paulo: IBRACON, 2021a.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Procedimento de ensaio de carbonatação acelerada e natural do concreto: prática recomendada IBRACON**. São Paulo: IBRACON, 2021b.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Procedimento de ensaios de difusão e migração de cloretos, visando a estimativa de VUP em concretos: prática recomendada IBRACON**. São Paulo: IBRACON, 2021c.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Guia para determinação do perfil de concentração e profundidade de penetração de cloretos: prática recomendada IBRACON**. São Paulo: IBRACON, 2021d.

JANG, J. G. *et al.* Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration. **Materials and Design**, [s. l.], v. 93, p. 160–167, 5 mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.074>

JIN, M. *et al.* Degradation of concrete with addition of mineral admixture due to free chloride ion penetration under the effect of carbonation. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 138, p. 42–53, 1 jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.004>

KOUŘIL, M.; NOVÁK, P.; BOJKO, M. Limitations of the linear polarization method to determine stainless steel corrosion rate in concrete environment. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 220–225, mar. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.007>

KUOSA, H. *et al.* Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 47, p. 32–40, mar. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.008>

LIU, J. *et al.* Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 112, p. 364–372, 1 nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.004>

LIU, J. *et al.* Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 95, p. 217–225, 1 maio 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.032>

LIU, Z. *et al.* Carbonation of blast furnace slag concrete at different CO₂ concentrations: Carbonation rate, phase assemblage, microstructure and thermodynamic modelling. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 169, 1 jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107161>

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. [s.l.] IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEI, K. *et al.* Study on electrochemical characteristics of reinforced concrete corrosion under the action of carbonation and chloride. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 17, 1 dez. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01351>

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: IFPB, 2017.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R. Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 223–248, dez. 2019.

MI, T. *et al.* The effect of carbonation on chloride redistribution and corrosion of steel reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 363, 11 jan. 2023.

MILLARD, S. G. *et al.* Environmental influences on linear polarisation corrosion rate measurement in reinforced concrete. **NTD&E International**, [s. l.], v. 34, p. 409–417, 2001.

MUTHULINGAM, S.; RAO, B. N. Consistent models for estimating chloride ingress parameters in fly ash concrete. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 3, p. 24–38, 25 jun. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2015.04.009>

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS - NACE INTERNATIONAL. **International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study**. Houston, 2016.

NEIVA, A. C.; COELHO, A. C.; LANDGRAF, F. J. G. **Química dos materiais aplicada às engenharias civil e ambiental**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2019.

NEVES, I. B. F. **Avaliação da carbonatação em argamassas de cimento com adições de cinza de casca de arroz amorfa e cristalina**. 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NGUYEN, Q. D.; CASTEL, A. Long-term durability of underground reinforced concrete pipes in natural chloride and carbonation environments. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 394, 29 ago. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132230>

OLIVEIRA, A. M. DE; CASCUDO, O. Effect of mineral additions incorporated in concrete on thermodynamic and kinetic parameters of chloride-induced reinforcement corrosion. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 192, p. 467–477, 20 dez. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.100>

OLIVEIRA, R. L. N.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; MEDEIROS JUNIOR, R. A. Effect of coarse aggregate size on corrosion of reinforced concrete exposed to carbonation and chloride ingress by electrochemical measurements. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 361, 26 dez. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129665>

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PINTAN, N. M. *et al.* Pathological manifestations and the study of corrosion present on bridges of the city of Recife. **EJGE**, Recife, v. 20, p. 11893-11907, jan. 2015.

PONTES, J.; REAL, S.; BOGAS, A. J. The rapid chloride migration test as a method to determine the chloride penetration resistance of concrete in marine environment. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 404, p. 133281, nov. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133281>

RAMEZANIANPOUR, A. A.; GHAHARI, S. A.; ESMAEILI, M. Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 58, p. 138–146, 15 maio 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.102>

RIBEIRO, D. V. *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto Armado: teoria, controle e métodos de análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RIBEIRO, D. V. *et al.* Effects of binders characteristics and concrete dosing parameters on the chloride diffusion coefficient. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 122, 1 set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104114>

RIBEIRO, D. V. *et al.* Proposal for classification of concrete quality based on accelerated carbonation tests. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 19, p. e02466, dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02466>

SAILLIO, M.; BAROGHEL-BOUNY, V.; BARBERON, F. Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder. **Construction and Building**

Materials, [s. l.], v. 68, p. 82–91, 15 out. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.049>

SANTOS, M. O. **Estudo de concretos com adição de nanosílica submetidos à ação combinada de cloretos e CO₂**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

SHEN, X. H. *et al.* Numerical study of carbonation and its effect on chloride binding in concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 104, 1 nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103402>

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto Desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TIWARI, A. K. *et al.* Influence of corrosion inhibitors on two different concrete systems under combined chloride and carbonated environment. **Structures**, [s. l.], v. 48, p. 717–735, 1 fev. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.093>

WANG, H. *et al.* Inhibition resistance and mechanism of migrating corrosion inhibitor on reinforced concrete under coupled carbonation and chloride attack. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 76, 1 out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107398>

WANG, Y. *et al.* Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 140, p. 173–183, 1 jun. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.121>

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2013.

XU, Z. *et al.* A review on the research progress of LDHs as corrosion inhibitors for reinforced concrete. **Journal of Building Engineering**, [s. l.] v. 70, 1 jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106303>

YE, H. *et al.* Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 112, p. 457–463, 1 jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.194>

YILDIRIM, H.; ILICA, T.; SENGUL, O. Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 1282–1288, mar. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.023>

ZHANG, D.; SHAO, Y. Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 123, p. 516–526, 1 out. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.041>

ZHANG, G. *et al.* Numerical simulation of electrochemical mechanism of steel rebar corrosion in concrete under natural climate with time-varying temperature and humidity. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 306, 1 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124873>

ZHANG, G. *et al.* Dynamic self-balanced electrochemical model for non-uniform corrosion of steel reinforcement in concrete under combined effects of heat-moisture-chlorine-oxygen. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 80, p. 108117, dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108117>

ZHAO, Y. X.; WANG, Y. Z.; DONG, J. F. Prediction of corrosion-induced concrete cracking under external loading and stirrup constraint. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 266, 10 jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121053>

ZHU, X. *et al.* Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 110, p. 369–380, 1 maio 2016a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.034>

ZHU, X. *et al.* Probabilistic analysis of reinforcement corrosion due to the combined action of carbonation and chloride ingress in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 124, p. 667–680, 15 out. 2016b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.120>

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA LIMPEZA DAS BARRAS DE AÇO CONFORME ASTM G-1/03

O procedimento de limpeza das barras foi utilizado com o objetivo de padronizar a condição inicial das barras, bem como ao final da pesquisa para retirada dos óxidos e posterior determinação de perda de massa gravimétrica. O procedimento de limpeza é mostrado nas figuras A1 a A6, conforme descrito a seguir:

- remoção da tinta anticorrosiva com removedor pastoso pronto para o uso, esse procedimento foi aplicado apenas na limpeza final (Figuras A1 e A2);
- imersão da barra em solução de ácido clorídrico 1:1 e 3,5 g/L de hexametenotetramina por 10 minutos para remoção dos óxidos (Figura A3);
- lavagem e escovação das barras em água corrente com escova de cerdas plásticas para remoção final dos óxidos (Figura A4);
- imersão das barras em acetona por 2 minutos para retirada de elementos gordurosos e facilitar a evaporação da água (Figura A5);
- secagem das barras em jato de ar quente (Figura A6).

Figura A1 – Imersão da barra em removedor de tinta



Figura A2 – Remoção da tinta



Figura A3 – Imersão em ácido clorídrico e hexametenotetramina



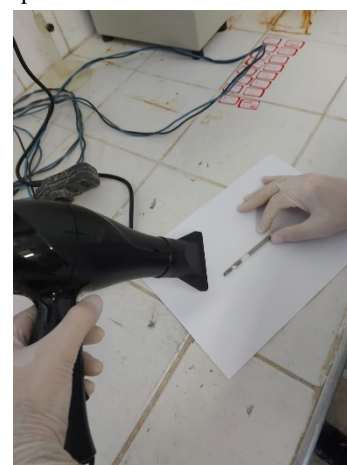
Figura A4 - Remoção dos óxidos com escova



Figura A5 – Imersão em acetona



Figura A6 – Secagem com ar quente



APÊNDICE B – TEMPERATURAS E UMIDADES MEDIDAS DURANTE O PERÍODO DE PRECONDICIONAMENTO

Tabela B1 – Temperatura e UR durante o período de condicionamento

| Data | Temperatura (°C) | UR (%) |
|------------|------------------|--------|
| 08/02/2023 | 20,3 | 54 |
| 09/02/2023 | 21,6 | 65 |
| 10/02/2023 | 21,9 | 65 |
| 11/02/2023 | SÁBADO | |
| 12/02/2023 | DOMINGO | |
| 13/02/2023 | 23 | 64 |
| 14/02/2023 | 23 | 62 |
| 15/02/2023 | 22,6 | 62 |
| 16/02/2023 | 23,5 | 66 |
| 17/02/2023 | 21,7 | 56 |
| 18/02/2023 | SÁBADO | |
| 19/02/2023 | DOMINGO | |
| 20/02/2023 | 22,1 | 57 |
| 21/01/2023 | 22,1 | 58 |
| 22/02/2023 | 22,9 | 58 |
| 23/02/2023 | 22,3 | 65 |
| 24/02/2023 | 22,6 | 65 |
| 25/02/2023 | SÁBADO | |
| 26/02/2023 | DOMINGO | |
| 27/02/2023 | 22,5 | 55 |
| 28/02/2023 | 22,7 | 62 |
| 01/03/2023 | 22,9 | 61 |
| 02/03/2023 | 23,3 | 60 |
| 03/03/2023 | 22,4 | 72 |
| 04/03/2023 | SÁBADO | |
| 05/03/2023 | DOMINGO | |
| 06/03/2023 | 21,3 | 52 |
| 07/03/2023 | 22,6 | 55 |
| 08/03/2023 | 21,9 | 51 |
| 09/03/2023 | 22,6 | 55 |
| 10/03/2023 | 22,6 | 51 |

APÊNDICE C – EVOLUÇÃO DO E_{corr} (mV) MÉDIO MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO

Os valores apresentados na tabela C1 abaixo refletem a média entre os valores medidos para 4 armaduras, desconsiderando-se os valores espúrios.

Tabela C1 - Evolução do E_{corr} (mV) médio

| CICLOS | CLORETOS | | | CARBONATAÇÃO | | | ATAQUE CONJUNTO | | |
|---------|----------------|---------------|------------|----------------|---------------|------------|-----------------|---------------|------------|
| | MF CPIII-32-RS | MF CPIV-32-RS | MF CPV-ARI | MF CPIII-32-RS | MF CPIV-32-RS | MF CPV-ARI | MF CPIII-32-RS | MF CPIV-32-RS | MF CPV-ARI |
| INICIAL | -153,00 | -233,00 | -187,50 | -232,50 | -199,00 | -172,00 | -212,25 | -179,00 | -182,00 |
| 1CSAT | -172,50 | -262,50 | -254,00 | -246,50 | -253,75 | -260,50 | -203,75 | -248,00 | -289,00 |
| 1CSECO | -183,25 | -321,33 | -333,67 | -439,50 | -367,33 | -313,25 | -482,50 | -497,00 | -311,00 |
| 2CSAT | -418,75 | -417,25 | -398,50 | -650,25 | -537,67 | -412,00 | -632,50 | -634,25 | -463,75 |
| 2CSECO | -167,50 | -231,75 | -308,50 | -392,00 | -437,67 | -372,00 | -557,00 | -569,00 | -398,25 |
| 3CSAT | -318,33 | -329,00 | -340,50 | -701,25 | -675,00 | -502,25 | -683,75 | -654,50 | -533,75 |
| 3CSECO | -401,33 | -398,25 | -287,50 | -349,67 | -495,00 | -392,50 | -583,00 | -592,25 | -489,25 |
| 4CSAT | -233,67 | -369,75 | -286,75 | -690,25 | -690,00 | -532,50 | -648,00 | -655,67 | -558,75 |
| 4CSECO | -341,50 | -430,00 | -381,00 | -352,33 | -471,67 | -410,00 | -598,50 | -596,50 | -496,25 |
| 5CSAT | -308,25 | -360,75 | -302,50 | -651,75 | -682,33 | -533,00 | -683,75 | -668,50 | -585,00 |
| 5CSECO | -275,75 | -383,00 | -243,00 | -311,25 | -520,75 | -437,50 | -606,75 | -598,50 | -505,00 |
| 6CSAT | -398,50 | -443,25 | -366,50 | -610,25 | -678,50 | -566,25 | -674,75 | -658,00 | -595,00 |
| 6CSECO | -308,50 | -355,50 | -283,67 | -351,33 | -506,33 | -396,25 | -602,00 | -593,75 | -504,33 |
| 7CSAT | -436,25 | -448,50 | -368,00 | -532,00 | -642,75 | -515,00 | -658,00 | -650,50 | -591,75 |
| 7CSECO | -299,00 | -388,75 | -250,67 | -351,00 | -544,50 | -410,75 | -613,67 | -585,00 | -512,50 |
| 8CSAT | -429,25 | -511,25 | -371,00 | -520,50 | -653,00 | -532,00 | -674,25 | -665,75 | -611,00 |
| 8CSECO | -263,75 | -481,00 | -229,33 | -337,75 | -492,00 | -391,25 | -613,67 | -588,00 | -509,50 |
| 9CSAT | -318,50 | -535,50 | -364,00 | -562,75 | -666,25 | -564,25 | -665,75 | -661,00 | -607,75 |
| 9CSECO | -370,50 | -487,25 | -413,50 | -352,33 | -519,25 | -370,25 | -610,33 | -581,75 | -500,75 |
| 10CSAT | -421,67 | -546,50 | -457,50 | -549,25 | -657,25 | -565,00 | -658,00 | -657,75 | -602,25 |
| 10CSECO | -383,67 | -487,75 | -397,75 | -357,25 | -530,33 | -361,00 | -592,50 | -581,75 | -503,00 |
| 11CSAT | -429,00 | -537,25 | -489,25 | -533,75 | -649,75 | -557,75 | -651,50 | -649,75 | -593,50 |
| 11CSECO | -328,75 | -406,50 | -500,00 | -403,00 | -465,75 | -367,75 | -582,75 | -567,00 | -495,75 |
| 12CSAT | -464,00 | -529,50 | -580,67 | -556,00 | -664,75 | -578,75 | -656,00 | -661,50 | -607,00 |
| 12CSECO | -395,50 | -458,50 | -486,00 | -411,00 | -513,50 | -398,00 | -606,67 | -579,50 | -513,75 |

APÊNDICE D – GRÁFICOS DE EVOLUÇÃO DO E_{corr} MÉDIO MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO

Figura D1 - Evolução do E_{corr} para os CPs submetidos ao ataque de cloretos

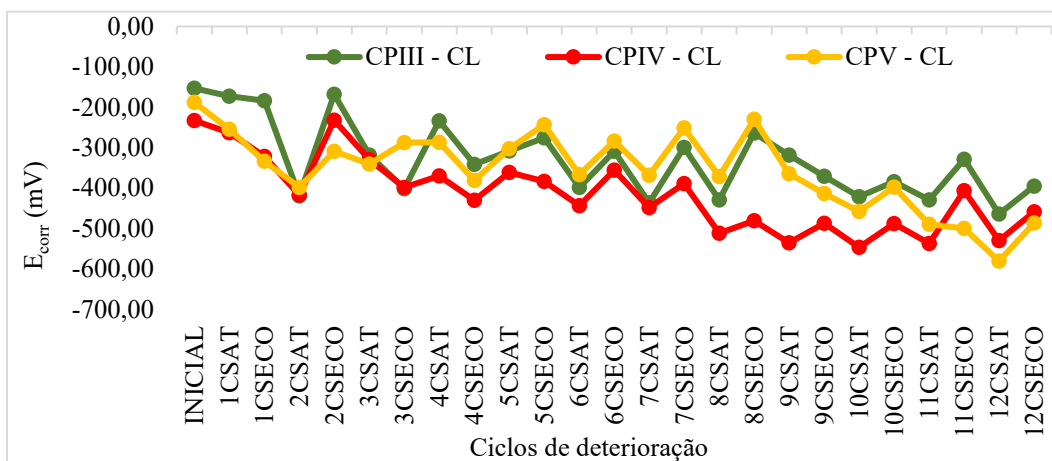


Figura D2 - Evolução do E_{corr} para os CPs submetidos à carbonatação acelerada

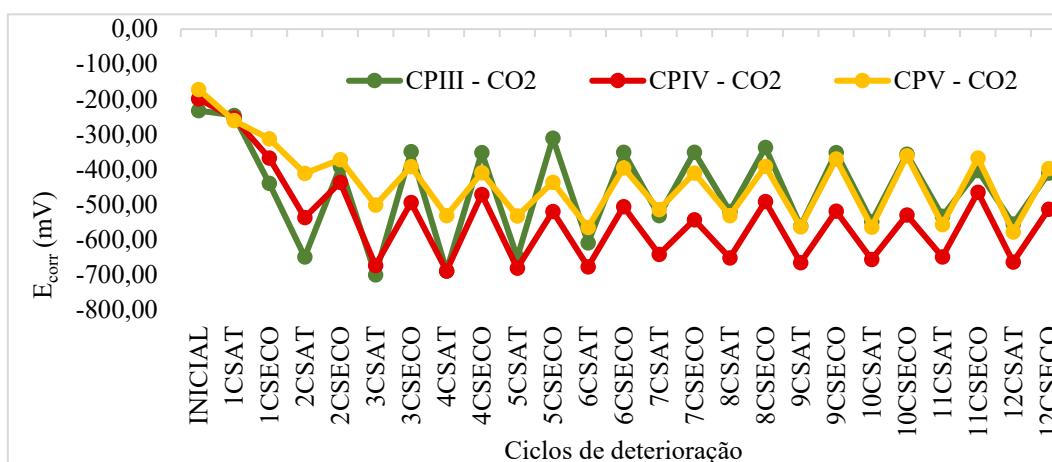
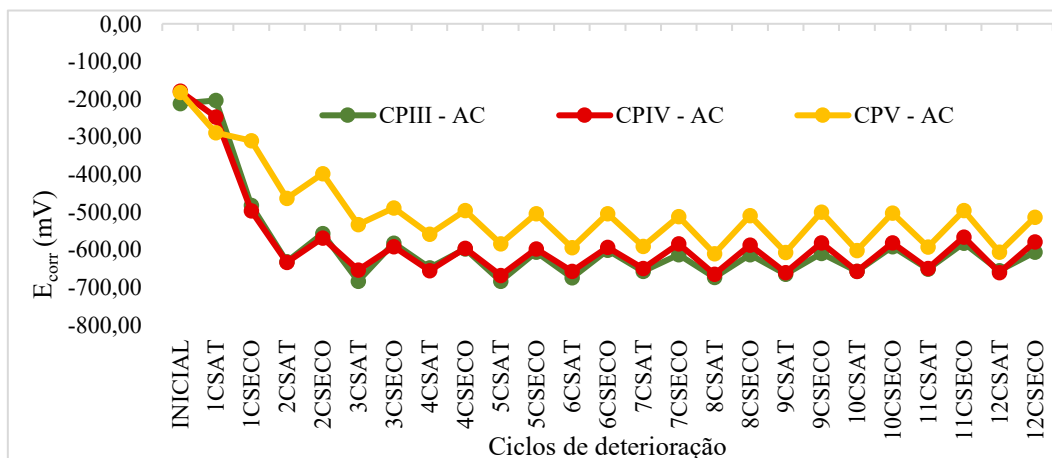


Figura D3 - Evolução do E_{corr} para os CPs submetidos ao ataque conjunto de carbonatação e ataque de cloretos



APÊNDICE E – EVOLUÇÃO DO i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) MÉDIO MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO

Os valores apresentados na tabela E1 abaixo refletem a média entre os valores medidos para 4 armaduras, desconsiderando-se os valores espúrios.

Tabela E1 - Evolução do i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) médio

| CICLO | CLORETOS | | | CARBONATAÇÃO | | | ATAQUE CONJUNTO | | |
|---------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|
| | MF CIII- 32-RS | MF CPIV- 32-RS | MF CPV- ARI | MF CIII- 32-RS | MF CPIV- 32-RS | MF CPV- ARI | MF CIII- 32-RS | MF CPIV- 32-RS | MF CPV- ARI |
| INICIAL | 0,076 | 0,049 | 0,020 | 0,059 | 0,036 | 0,040 | 0,068 | 0,020 | 0,027 |
| 1CSAT | 0,070 | 0,086 | 0,078 | 0,058 | 0,087 | 0,194 | 0,062 | 0,059 | 0,084 |
| 1CSECO | 0,065 | 0,105 | 0,083 | 3,959 | 0,521 | 0,518 | 1,384 | 2,612 | 0,291 |
| 2CSAT | 0,310 | 0,285 | 0,212 | 3,571 | 1,157 | 0,762 | 4,350 | 2,246 | 1,081 |
| 2CSECO | 0,068 | 0,053 | 0,061 | 2,180 | 1,304 | 1,055 | 4,873 | 4,072 | 0,913 |
| 3CSAT | 0,162 | 0,203 | 0,171 | 6,020 | 3,671 | 1,770 | 9,255 | 10,206 | 2,168 |
| 3CSECO | 0,186 | 0,139 | 0,078 | 7,357 | 5,600 | 0,986 | 4,998 | 8,035 | 1,413 |
| 4CSAT | 0,080 | 0,606 | 0,092 | 3,555 | 6,226 | 2,190 | 8,348 | 9,625 | 2,511 |
| 4CSECO | 0,137 | 0,393 | 0,124 | 5,699 | 5,303 | 1,298 | 8,229 | 11,669 | 2,097 |
| 5CSAT | 0,106 | 0,622 | 0,085 | 3,379 | 4,317 | 1,846 | 12,614 | 11,805 | 3,419 |
| 5CSECO | 0,208 | 0,161 | 0,042 | 3,617 | 3,059 | 1,448 | 8,306 | 10,059 | 2,578 |
| 6CSAT | 0,202 | 0,287 | 0,134 | 3,485 | 6,128 | 2,224 | 14,137 | 14,460 | 4,316 |
| 6CSECO | 0,355 | 0,148 | 0,052 | 2,852 | 4,230 | 1,342 | 10,128 | 15,311 | 3,129 |
| 7CSAT | 0,770 | 0,324 | 0,111 | 2,825 | 3,917 | 1,667 | 13,640 | 15,485 | 4,831 |
| 7CSECO | 0,096 | 0,336 | 0,038 | 2,685 | 4,133 | 1,655 | 13,713 | 14,657 | 3,635 |
| 8CSAT | 0,579 | 0,717 | 0,131 | 2,957 | 4,705 | 2,143 | 18,642 | 19,665 | 7,492 |
| 8CSECO | 0,159 | 0,523 | 0,034 | 3,754 | 3,778 | 1,523 | 15,351 | 17,943 | 3,851 |
| 9CSAT | 0,531 | 0,958 | 0,120 | 4,599 | 5,074 | 2,738 | 21,727 | 20,623 | 6,705 |
| 9CSECO | 0,216 | 0,632 | 0,762 | 3,177 | 4,024 | 1,749 | 13,807 | 17,375 | 4,002 |
| 10CSAT | 0,258 | 1,288 | 1,867 | 4,088 | 5,212 | 2,723 | 24,190 | 22,172 | 7,723 |
| 10CSECO | 0,274 | 0,657 | 1,076 | 2,167 | 3,476 | 1,315 | 16,778 | 21,756 | 4,414 |
| 11CSAT | 0,588 | 1,231 | 2,154 | 4,206 | 5,542 | 2,758 | 23,704 | 23,861 | 8,130 |
| 11CSECO | 0,159 | 0,470 | 2,143 | 1,694 | 2,808 | 1,885 | 15,650 | 17,939 | 4,446 |
| 12CSAT | 0,572 | 1,108 | 2,341 | 4,555 | 4,734 | 3,102 | 25,005 | 23,421 | 9,532 |
| 12CSECO | 0,309 | 0,597 | 2,371 | 1,836 | 3,613 | 1,046 | 18,686 | 19,433 | 5,782 |

APÊNDICE F – GRÁFICOS DE EVOLUÇÃO DO i_{corr} MÉDIO MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO

Figura F1 - Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos ao ataque de cloretos

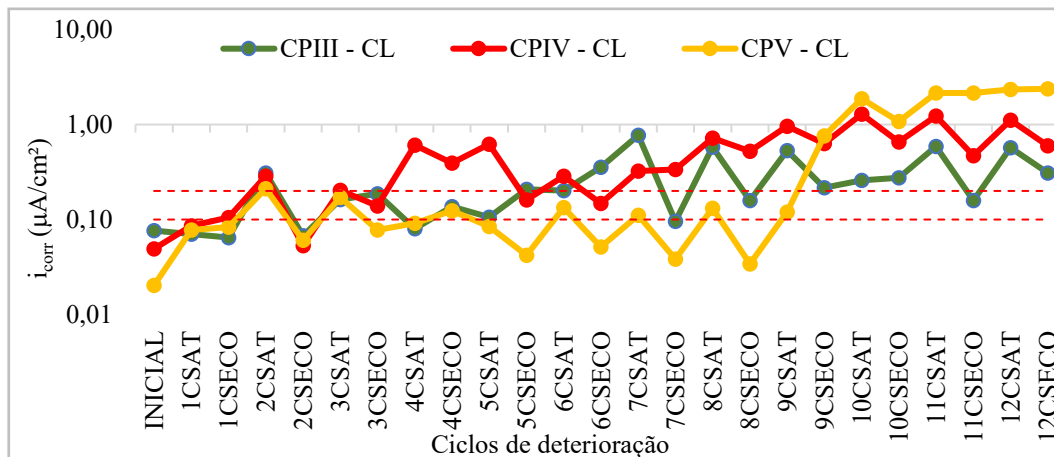


Figura F2 - Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos à carbonatação acelerada

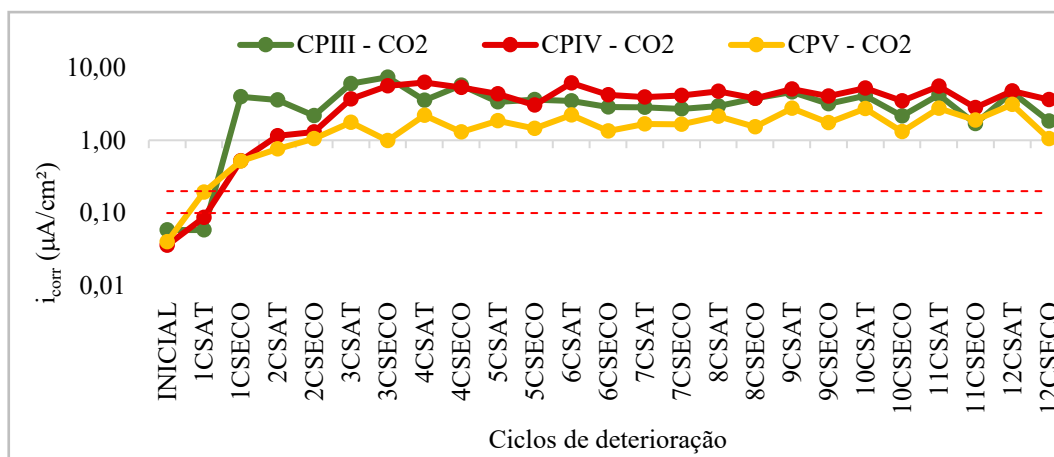
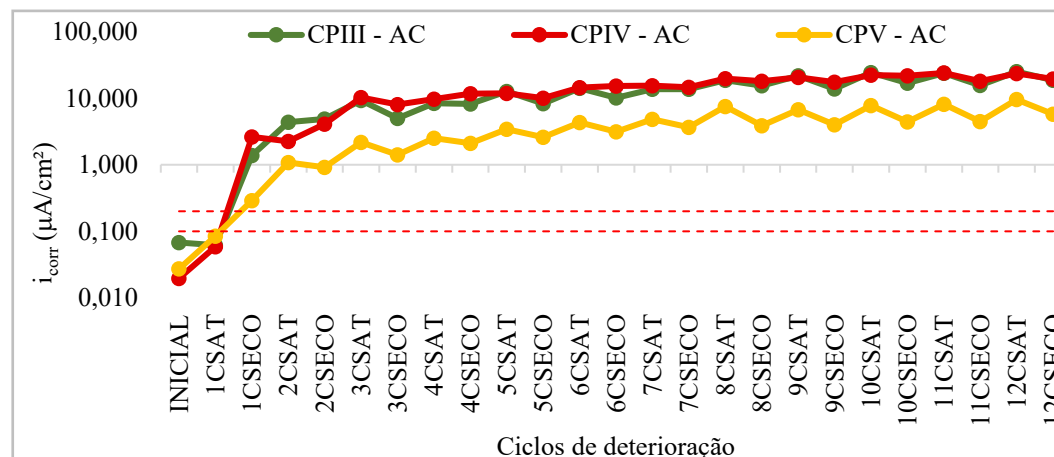


Figura F3 - Evolução do i_{corr} para os CPs submetidos ao ataque conjunto



APÊNDICE G – EVOLUÇÃO DA R_{ohm} (Ω) MÉDIA MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO

Os valores apresentados na tabela G1 abaixo refletem a média entre os valores medidos para 4 armaduras, desconsiderando-se os valores espúrios.

Tabela G1 - Evolução da R_{ohm} (Ω) média

| CICLOS | CLORETOS | | | CARBONATAÇÃO | | | ATAQUE CONJUNTO | | |
|----------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|
| | MF CPHI-32- RS | MF CPIV-32- RS | MF CPV- ARI | MF CPHI-32- RS | MF CPIV-32- RS | MF CPV- ARI | MF CPHI-32- RS | MF CPIV-32- RS | MF CPV- ARI |
| INICIAL | 5446,68 | 3584,65 | 962,05 | 5726,85 | 2359,75 | 870,88 | 5604,03 | 3037,93 | 935,55 |
| 1CSAT | 2495,67 | 531,10 | 287,10 | 3333,78 | 665,43 | 378,43 | 2876,05 | 430,28 | 299,38 |
| 1CSECO | 4343,03 | 1406,33 | 527,68 | 5437,30 | 2652,33 | 831,03 | 3962,68 | 1059,10 | 646,73 |
| 2CSAT | 3331,40 | 483,75 | 233,57 | 2692,10 | 841,07 | 297,23 | 1738,98 | 411,05 | 300,60 |
| 2CSECO | 4007,98 | 1298,75 | 405,48 | 4022,58 | 2864,43 | 742,10 | 2659,65 | 742,83 | 594,40 |
| 3CSAT | 3961,08 | 632,05 | 228,13 | 2456,63 | 1309,50 | 558,15 | 934,73 | 349,35 | 312,53 |
| 3CSECO | 4215,88 | 1321,60 | 439,95 | 4680,80 | 3300,53 | 1225,43 | 1609,07 | 494,53 | 560,80 |
| 4CSAT | 3581,20 | 782,95 | 230,13 | 1576,48 | 1275,70 | 597,05 | 879,40 | 359,50 | 286,63 |
| 4CSECO | 4682,93 | 1268,13 | 394,35 | 3376,38 | 2838,97 | 1370,93 | 967,23 | 424,17 | 499,28 |
| 5CSAT | 3466,78 | 752,50 | 195,08 | 1371,77 | 1045,40 | 902,23 | 500,83 | 235,90 | 276,17 |
| 5CSECO | 4688,83 | 1680,20 | 365,75 | 2302,50 | 1499,55 | 1482,73 | 613,30 | 279,80 | 461,05 |
| 6CSAT | 3766,03 | 949,53 | 228,38 | 1207,87 | 1253,83 | 1035,75 | 360,08 | 206,33 | 248,73 |
| 6CSECO | 4036,63 | 1834,57 | 392,68 | 1444,47 | 1518,13 | 1972,15 | 526,57 | 245,78 | 410,78 |
| 7CSAT | 3449,15 | 1043,25 | 247,68 | 1265,10 | 1141,73 | 1281,65 | 312,97 | 175,53 | 270,00 |
| 7CSECO | 4778,87 | 1748,95 | 481,70 | 1387,87 | 1388,43 | 2301,70 | 439,53 | 235,68 | 427,33 |
| 8CSAT | 4073,00 | 989,10 | 233,40 | 1186,28 | 882,75 | 1241,65 | 232,18 | 147,18 | 227,08 |
| 8CSECO | 5314,38 | 2033,83 | 402,40 | 1487,50 | 1495,18 | 2529,93 | 350,85 | 215,53 | 382,50 |
| 9CSAT | 3952,20 | 1049,20 | 210,90 | 1220,88 | 849,80 | 1431,33 | 193,73 | 128,85 | 197,03 |
| 9CSECO | 5569,63 | 1762,25 | 409,70 | 2246,40 | 1168,13 | 3200,73 | 302,75 | 202,63 | 387,27 |
| 10CSAT | 3712,35 | 978,53 | 192,88 | 1066,35 | 852,70 | 1261,73 | 157,70 | 106,35 | 202,05 |
| 10CSECO | 5586,03 | 1744,45 | 436,45 | 1988,03 | 1061,97 | 3010,15 | 280,83 | 155,63 | 369,98 |
| 11CSAT | 3989,98 | 1131,90 | 235,05 | 965,13 | 803,47 | 1234,75 | 162,88 | 98,18 | 207,28 |
| 11CSECO | 6383,20 | 2165,23 | 533,43 | 1402,17 | 1804,20 | 3214,87 | 316,08 | 181,55 | 407,15 |
| 12CSAT | 3565,83 | 1034,00 | 226,38 | 876,48 | 699,33 | 1085,15 | 125,70 | 94,28 | 183,20 |
| 12CSECO | 4779,93 | 1987,65 | 431,20 | 2104,45 | 1149,45 | 2615,43 | 214,53 | 145,10 | 313,53 |

APÊNDICE H – GRÁFICOS DE EVOLUÇÃO DA R_{ohm} MÉDIA MEDIDO DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO

Figura H1 - Evolução da R_{ohm} para os CPs submetidos ao ataque de cloretos

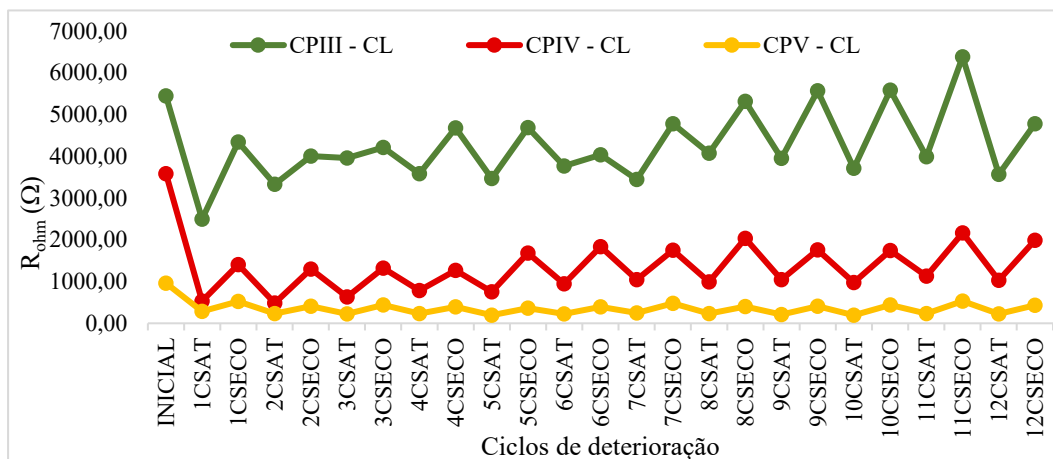


Figura H2 - Evolução do R_{ohm} para os CPs submetidos à carbonatação acelerada

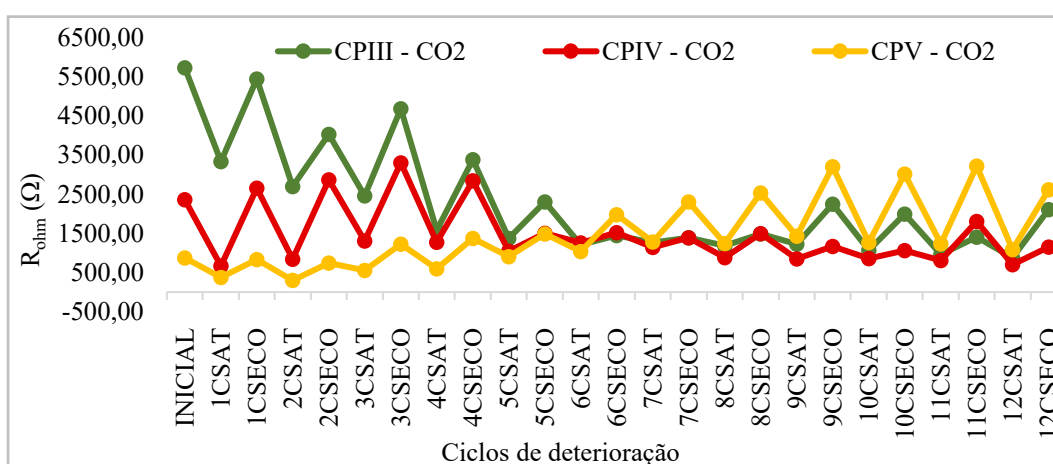
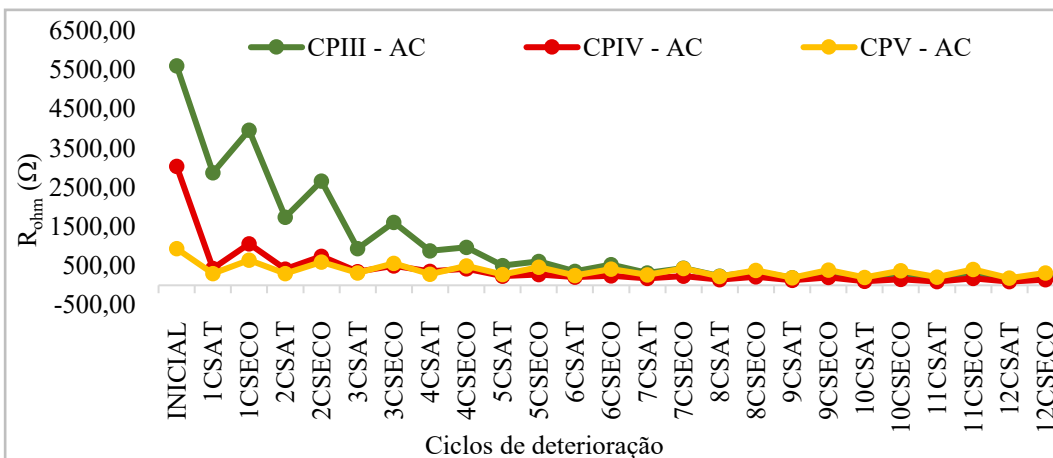


Figura H3 - Evolução do R_{ohm} para os CPs submetidos ao ataque conjunto de carbonatação e cloretos



APÊNDICE I – EVOLUÇÃO DA VM E DA UR DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO

Tabela II – Evolução da VM com relação a massa inicial ao longo dos ciclos

| CICLOS | CLORETOS | | | CARBONATAÇÃO | | | ATAQUE CONJUNTO | | |
|---------|-------------|------------|---------|--------------|------------|---------|-----------------|------------|---------|
| | CPIII-32-RS | CPIV-32-RS | CPV-ARI | CPIII-32-RS | CPIV-32-RS | CPV-ARI | CPIII-32-RS | CPIV-32-RS | CPV-ARI |
| 1CSECO | 0,56 | 1,34 | 0,83 | 0,70 | 1,55 | 1,07 | 0,85 | 1,77 | 1,20 |
| 2CSAT | 1,53 | 2,59 | 1,80 | 1,83 | 2,86 | 2,07 | 1,84 | 2,92 | 2,19 |
| 2CSECO | 0,75 | 1,58 | 1,13 | 0,70 | 1,55 | 1,21 | 0,97 | 1,92 | 1,49 |
| 3CSAT | 1,53 | 2,62 | 1,88 | 1,93 | 3,03 | 2,28 | 1,96 | 2,99 | 2,29 |
| 3CSECO | 0,81 | 1,73 | 1,19 | 0,66 | 1,58 | 1,30 | 1,08 | 1,98 | 1,61 |
| 4CSAT | 1,68 | 2,76 | 2,08 | 1,99 | 3,06 | 2,33 | 2,11 | 3,11 | 2,54 |
| 4CSECO | 0,82 | 1,80 | 1,33 | 0,69 | 1,64 | 1,42 | 1,22 | 2,16 | 1,81 |
| 5CSAT | 1,68 | 2,76 | 2,15 | 2,05 | 3,10 | 2,36 | 2,19 | 3,16 | 2,68 |
| 5CSECO | 0,83 | 1,76 | 1,33 | 0,69 | 1,69 | 1,42 | 1,22 | 2,18 | 1,84 |
| 6CSAT | 1,73 | 2,78 | 2,09 | 2,13 | 3,20 | 2,46 | 2,29 | 3,24 | 2,72 |
| 6CSECO | 0,85 | 1,78 | 1,25 | 0,65 | 1,60 | 1,35 | 1,18 | 2,04 | 1,80 |
| 7CSAT | 1,64 | 2,63 | 1,86 | 1,79 | 2,82 | 1,96 | 2,18 | 3,12 | 2,55 |
| 7CSECO | 0,79 | 1,64 | 1,05 | 0,64 | 1,56 | 1,34 | 1,27 | 2,13 | 1,85 |
| 8CSAT | 1,68 | 2,69 | 1,91 | 1,73 | 2,81 | 2,02 | 2,31 | 3,22 | 2,74 |
| 8CSECO | 0,80 | 1,73 | 1,16 | 0,51 | 1,44 | 1,25 | 1,20 | 2,05 | 1,82 |
| 9CSAT | 1,63 | 2,63 | 1,92 | 2,03 | 3,05 | 2,21 | 2,26 | 3,21 | 2,68 |
| 9CSECO | 0,84 | 1,76 | 1,19 | 0,46 | 1,38 | 1,27 | 1,20 | 1,99 | 1,80 |
| 10CSAT | 1,65 | 2,68 | 1,96 | 2,09 | 3,15 | 2,28 | 2,34 | 3,24 | 2,70 |
| 10CSECO | 0,84 | 1,69 | 1,12 | 0,46 | 1,30 | 1,28 | 1,20 | 2,05 | 1,85 |
| 11CSAT | 1,61 | 2,59 | 1,76 | 2,07 | 3,06 | 2,17 | 2,20 | 3,14 | 2,52 |
| 11CSECO | 0,72 | 1,62 | 1,02 | 0,49 | 1,40 | 1,29 | 1,18 | 2,00 | 1,83 |
| 12CSAT | 1,67 | 2,64 | 1,92 | 2,25 | 3,26 | 2,51 | 2,42 | 3,31 | 2,82 |
| 12CSECO | 0,83 | 1,70 | 1,14 | 0,57 | 1,46 | 1,45 | 1,38 | 2,11 | 2,03 |

Tabela I2 – Variação de UR após os ciclos de secagem

| CICLOS | CLORETOS | | | CARBONATAÇÃO | | | ATAQUE CONJUNTO | | |
|---------|-------------|------------|---------|--------------|------------|---------|-----------------|------------|---------|
| | CPIII-32-RS | CPIV-32-RS | CPV-ARI | CPIII-32-RS | CPIV-32-RS | CPV-ARI | CPIII-32-RS | CPIV-32-RS | CPV-ARI |
| INICIAL | 9,5 | 11,45 | 11,2 | 9,15 | 11,9 | 12,5 | 7,95 | 12 | 10,15 |
| 1CSECO | 23,25 | 25,7 | 25 | 14,6 | 15,5 | 15,8 | 22,2 | 27,9 | 22,45 |
| 2CSECO | 23,4 | 27,8 | 28,05 | 14,05 | 15 | 14,85 | 22,45 | 27,25 | 24,3 |
| 3CSECO | 23,1 | 30 | 27,5 | 14,5 | 16 | 16,25 | 24,2 | 30,2 | 26,5 |
| 4CSECO | 22,65 | 27,8 | 29,6 | 14,45 | 15,15 | 15,05 | 25,35 | 33 | 30,65 |
| 5CSECO | 23 | 25,75 | 29,4 | 14,35 | 15,05 | 14,5 | 24,3 | 32,45 | 28,75 |
| 6CSECO | 23,35 | 25,3 | 27,55 | 14,85 | 15,2 | 14,8 | 24,5 | 29,1 | 29,75 |
| 7CSECO | 22,75 | 24,1 | 25,25 | 14,65 | 14,45 | 14,25 | 23,3 | 28,7 | 23,4 |
| 8CSECO | 23,15 | 24,7 | 26,8 | 14,15 | 14,3 | 14,05 | 22,55 | 23,2 | 23,3 |
| 9CSECO | 23,35 | 26,2 | 27 | 14,3 | 14,3 | 14,5 | 22 | 22,4 | 23,25 |
| 10CSECO | 23,35 | 24,25 | 25,6 | 15,05 | 14,65 | 14,7 | 21,75 | 21,9 | 23,2 |
| 11CSECO | 21,35 | 23,35 | 23,3 | 14,4 | 14,35 | 14,4 | 22,35 | 22,75 | 23,65 |
| 12CSECO | 21,6 | 24 | 24,55 | 14,55 | 14,75 | 14,95 | 23,75 | 25 | 25,05 |

APÊNDICE J – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA VM E DA UR DURANTE OS CICLOS DE DETERIORAÇÃO

Figura J1 – Variação de massa para os CPs submetidos ao ataque de cloretos

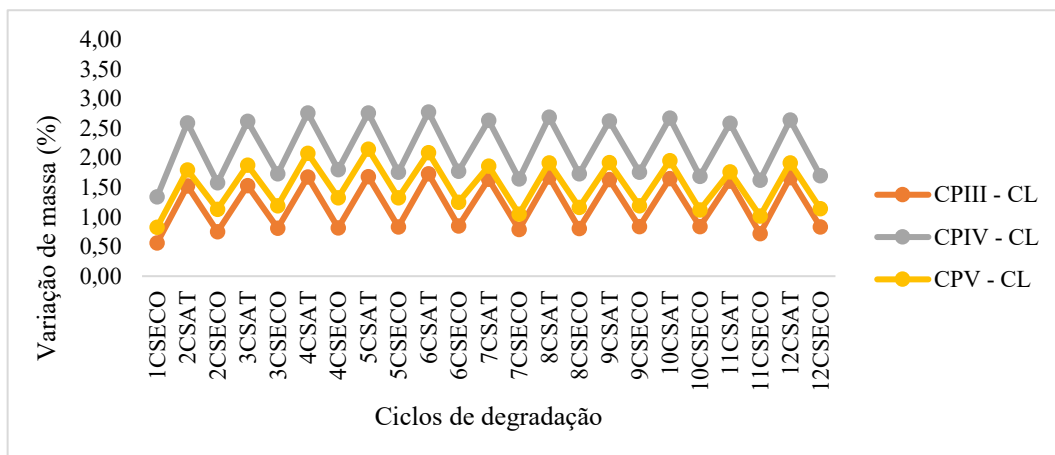


Figura J2 – Variação de massa para os CPs submetidos ao ataque conjunto

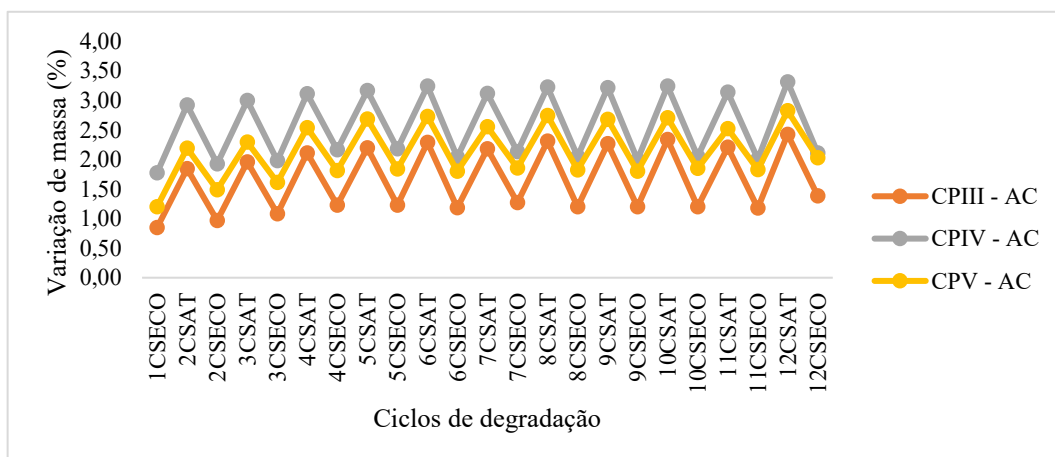


Figura J3 – Variação de massa para os CPs submetidos à carbonatação

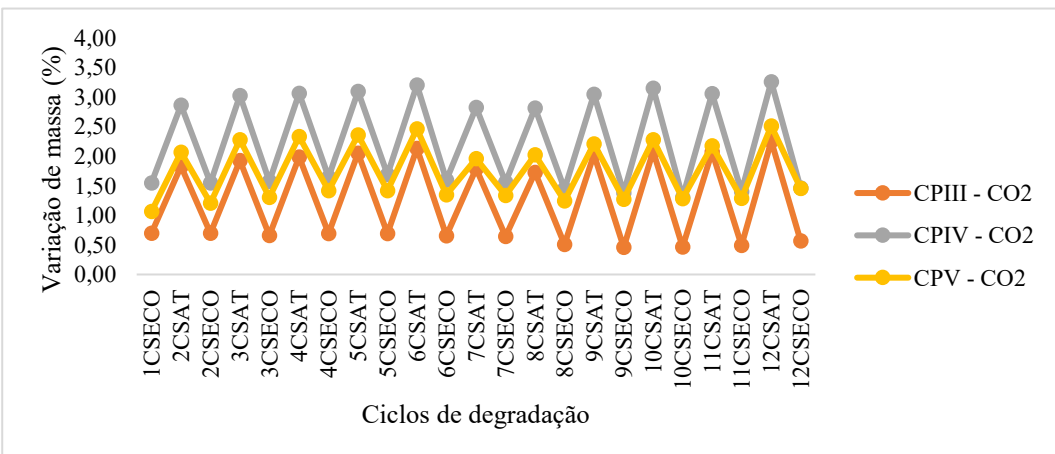


Figura J4 – UR para os CPs sujeitos ao ataque de cloretos

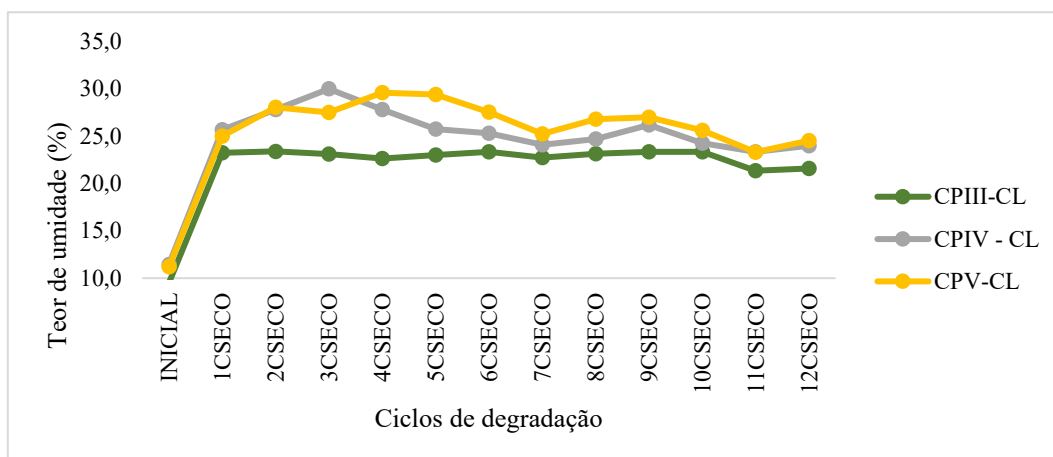


Figura J5 – UR para os CPs sujeitos à carbonatação

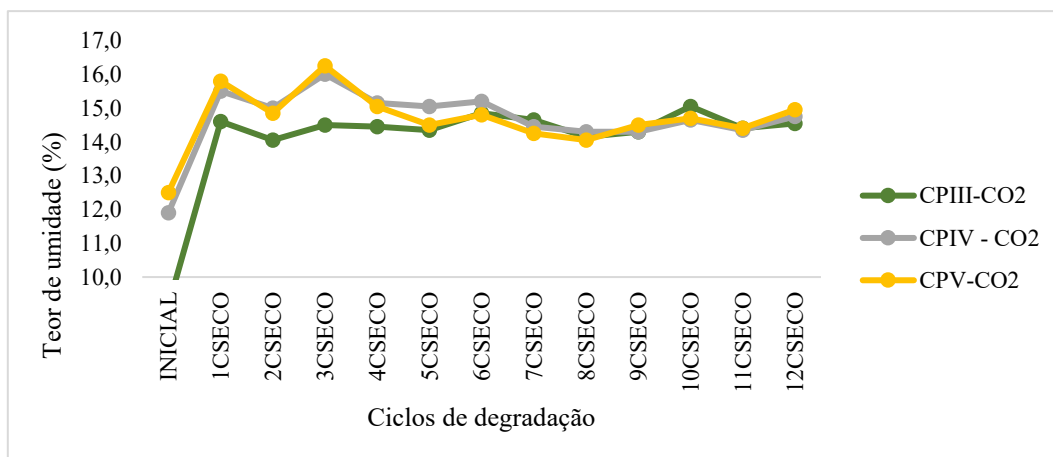
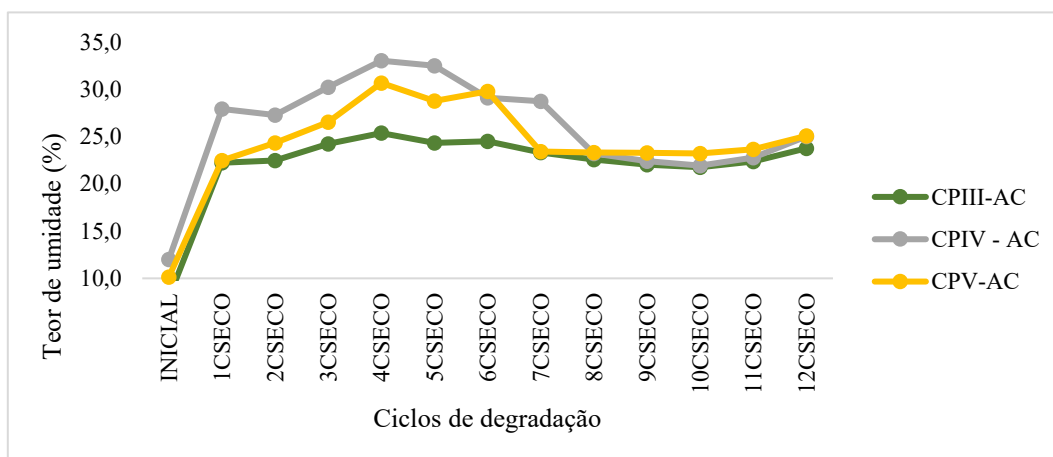


Figura J6 - UR para os CPs sujeitos ao ataque conjunto

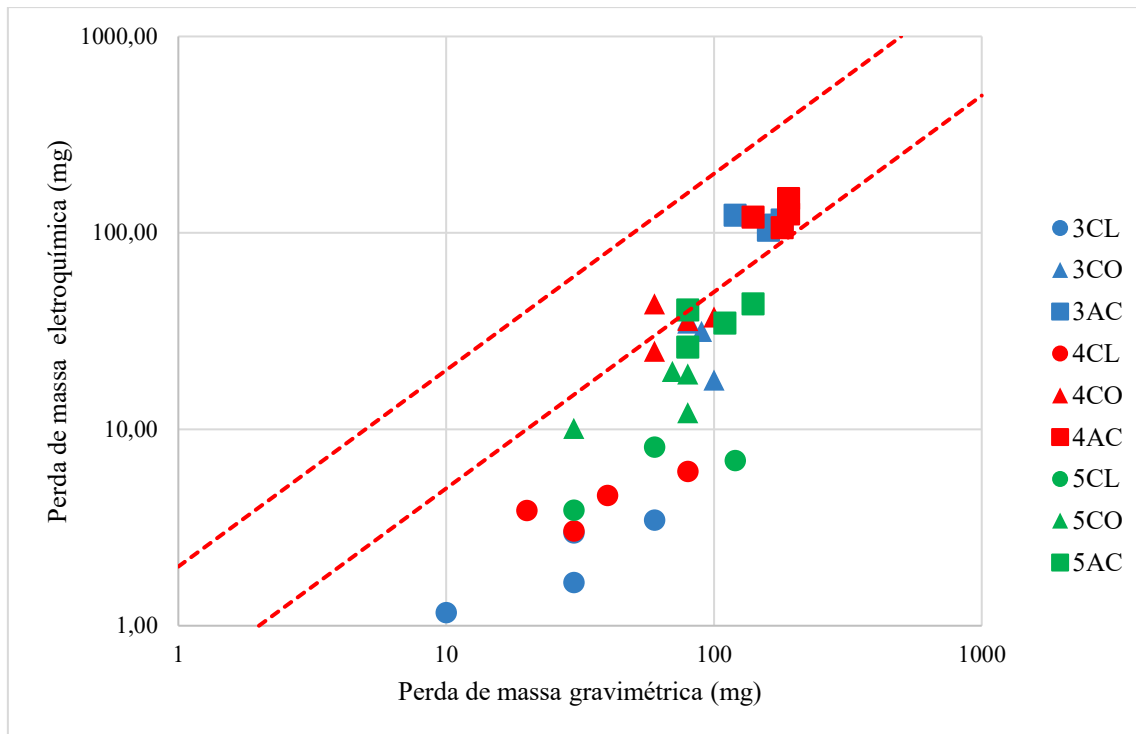


APÊNDICE K – PERDA DE MASSA GRAVIMÉTRICA DAS ARMADURAS

Tabela K1 – Perda de massa gravimétrica das armaduras

| Barra | Massa antes - barra limpa (g) | Massa depois - barra limpa (g) | Perda de massa gravimétrica (g) | Perda de massa gravimétrica média (mg) |
|-------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---|
| 3C11A | 14,46 | 14,4 | 0,06 | 32,50 |
| 3C11B | 13,99 | 13,96 | 0,03 | |
| 3C12A | 14,56 | 14,53 | 0,03 | |
| 3C12B | 14,21 | 14,20 | 0,01 | |
| 3CO1A | 13,86 | 13,76 | 0,10 | 87,50 |
| 3CO1B | 14,05 | 13,96 | 0,09 | |
| 3CO2A | 14,29 | 14,21 | 0,08 | |
| 3CO2B | 14,34 | 14,26 | 0,08 | |
| 3AC1A | 13,98 | 13,86 | 0,12 | 157,50 |
| 3AC1B | 14,16 | 13,99 | 0,17 | |
| 3AC2A | 13,89 | 13,73 | 0,16 | |
| 3AC2B | 14,46 | 14,28 | 0,18 | |
| 4C11A | 14,26 | 14,22 | 0,04 | 42,50 |
| 4C11B | 14,11 | 14,09 | 0,02 | |
| 4C12A | 14,14 | 14,11 | 0,03 | |
| 4C12B | 14,26 | 14,18 | 0,08 | |
| 4CO1A | 14,66 | 14,60 | 0,06 | 75,00 |
| 4CO1B | 13,84 | 13,76 | 0,08 | |
| 4CO2A | 13,92 | 13,82 | 0,10 | |
| 4CO2B | 13,83 | 13,77 | 0,06 | |
| 4AC1A | 14,12 | 13,93 | 0,19 | 175,00 |
| 4AC1B | 14,34 | 14,16 | 0,18 | |
| 4AC2A | 14,4 | 14,26 | 0,14 | |
| 4AC2B | 14,25 | 14,06 | 0,19 | |
| 5C11A | 14,29 | 14,26 | 0,03 | 55,00 |
| 5C11B | 14,25 | 14,19 | 0,06 | |
| 5C12A | 14,1 | 13,98 | 0,12 | |
| 5C12B | 13,97 | 13,96 | 0,01 | |
| 5CO1A | 13,9 | 13,87 | 0,03 | 65,00 |
| 5CO1B | 14,4 | 14,32 | 0,08 | |
| 5CO2A | 14,06 | 13,98 | 0,08 | |
| 5CO2B | 14,36 | 14,29 | 0,07 | |
| 5AC1A | 13,86 | 13,72 | 0,14 | 102,50 |
| 5AC1B | 14,18 | 14,10 | 0,08 | |
| 5AC2A | 14,20 | 14,09 | 0,11 | |
| 5AC2B | 14,07 | 13,99 | 0,08 | |

Figura K1 – Comparação entre a perda de massa gravimétrica e eletroquímica para cada armadura



APÊNCIDE L – PROFUNDIDADES DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Figura L1 – Profundidades de penetração de cloretos para as amostras 3CL1 e 3CL2



Figura L2 – Profundidades de penetração de cloretos para as amostras 3AC1 e 3AC2



Figura L3 – Profundidades de penetração de cloretos para as amostras 4CL1 e 4CL2



Figura L4 – Profundidades de penetração de cloretos para as amostras 4AC1 e 4AC2



Figura L5 – Profundidades de penetração de cloretos para as amostras 5CL1 e 5CL2



Figura L6 – Profundidades de penetração de cloretos para as amostras 5AC1 e 5AC2



APÊNDICE M – PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO

Figura M1 – Profundidades de carbonatação para a amostra 3CO1 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M2 – Profundidades de carbonatação para a amostra 3CO2 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M3 – Profundidades de carbonatação para a amostra 3AC1 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M4 – Profundidades de carbonatação para a amostra 3AC2 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M5 – Profundidades de carbonatação para a amostra 4CO1 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M6 – Profundidades de carbonatação para a amostra 4CO2 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M7 – Profundidades de carbonatação para a amostra 4AC1 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M8 – Profundidades de carbonatação para a amostra 4AC2 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M9 – Profundidades de carbonatação para a amostra 5CO1 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M10 – Profundidades de carbonatação para a amostra 5CO2 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M11 – Profundidades de carbonatação para a amostra 5AC1 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos



Figura M12 – Profundidades de carbonatação para a amostra 5AC2 ao final do 5º, 9º e 12º ciclos

