

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Robson Fernando de Carvalho**

**DIAGNÓSTICO DE CORROSÃO EM PILARES DE  
CONCRETO ARMADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA  
UTILIZANDO TRÊS MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO**

Porto Alegre  
Setembro 2023

**ROBSON FERNANDO DE CARVALHO**

**DIAGNÓSTICO DE CORROSÃO EM PILARES DE  
CONCRETO ARMADO: UMA ANÁLISE  
COMPARATIVA UTILIZANDO TRÊS MÉTODOS  
DE VERIFICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de  
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Lucas Alexandre Reginato**

Porto Alegre  
Setembro 2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Carvalho , Robson Fernando de  
DIAGNÓSTICO DE CORROSÃO EM PILARES DE CONCRETO  
ARMADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA UTILIZANDO TRÊS  
MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO / Robson Fernando de Carvalho  
. -- 2023.  
62 f.  
Orientador: Lucas Alexandre Reginato.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre,  
BR-RS, 2023.

1. Ensaaios não destrutivos. 2. Potencial de  
Corrosão. 3. Taxa de Corrosão. 4. Carbonatação. I.  
Reginato, Lucas Alexandre, orient. II. Título.

**ROBSON FERNANDO DE CARVALHO**

**DIAGNÓSTICO DE CORROSÃO EM PILARES DE  
CONCRETO ARMADO: UMA ANÁLISE COMPARATIVA  
UTILIZANDO TRÊS MÉTODOS DE VERIFICAÇÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, setembro de 2023

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Lucas Alexandre Reginato**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientador

**Prof<sup>a</sup> PhD Ângela Gaio Graeff**

PhD. pela University of Sheffield, SHEFFIELD, Inglaterra

**Prof<sup>a</sup> Dr. Vanessa Fátima Pasa Dutra**

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Elide Debastiani de Carvalho e Verli de Carvalho, por todo amor e ajuda que sempre deram, sem dúvidas, se consegui chegar ao final da graduação, é por conta de todo suporte que eles ofereceram.

Agradeço também a minha irmã, Rúbia Graciela de Carvalho, por sempre ser a voz da razão na minha vida, sempre me auxiliando e motivando a seguir em frente.

A meus amigos e colegas de graduação, que sempre estiveram juntos em tantas noites de estudo.

Ao meu orientador, Lucas Reginato, por se disponibilizar a me auxiliar durante todo o período em que esta pesquisa foi desenvolvida, sempre disposto a tirar todas as dúvidas.

A banca, por se disponibilizarem para avaliar este trabalho.

A UFRGS como um todo, por ser uma instituição que me acolheu de forma fantástica e proporcionou anos de incríveis na minha vida, sem dúvida, a minha maior conquista até o presente momento.

## RESUMO

Este estudo aborda três métodos, potencial de corrosão, taxa de corrosão e carbonatação, para o diagnóstico de corrosão das armaduras em pilares de concreto armado, pois se entende que essa manifestação patológica pode trazer grandes danos estrutura. A pesquisa foi conduzida no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em proximidade ao Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais. O objetivo principal foi diagnosticar as armaduras de três pilares distintos por meio de métodos não destrutivos, com o propósito de ampliar a compreensão sobre a importância de avaliar não apenas estruturas com sinais visíveis de corrosão, mas também aquelas que aparentemente estão em melhor estado de conservação e, normalmente, não apresentariam danos ao aço. A escolha desse tema se baseia na percepção de que a corrosão das armaduras é um dos fatores preponderantes na redução da vida útil das estruturas, resultando em deslocamentos da camada protetora devido ao inchaço provocado pela corrosão, assim como na perda de área da armadura, entre outros fatores adversos. Para realizar os ensaios, foi empregado o equipamento Gecor8 que permite, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma C 876 (ASTM) para ensaios com eletrodos de cobre/sulfato de cobre, obter os valores de potencial de corrosão e, utilizando o método da resistência à polarização os resultados de taxa de corrosão. Depois de coletar os valores individuais para cada um dos pilares, procedeu-se à análise comparativa dos resultados obtidos. A partir desse processo, constatou-se que não apenas os resultados eram, relativamente, próximos entre eles, mas também se chegou à conclusão de que é aconselhável conduzir testes não somente em estruturas com evidentes manifestações patológicas, mas também à aquelas adjacentes que podem estar sendo afetadas pelas mesmas influências do ambiente.

**Palavras-Chave:** Corrosão. Carbonatação. Potencial de Corrosão. Taxa de Corrosão.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.....	21
Figura 2 – Ensaio com aspersão de nitrato de prata.....	22
Figura 3 – Ensaio com eletrodo de $\text{CuSO}_4$ .....	24
Figura 4 – Ilustração do Campus do Vale e marcação da área dos ensaios.....	30
Figura 5 – Localização dos pilares no campus.....	31
Figura 6 – Pilar 1.....	32
Figura 7 – Pilar 2.....	33
Figura 8 – Pilar 3.....	34
Figura 9 – Pacômetro.....	36
Figura 10 – Pilares com posições das armaduras marcadas.....	37
Figura 11 – Armadura exposta.....	38
Figura 12 – Ensaio de Carbonatação.....	40
Figura 13 – Equipamento Gecor 8.....	41
Figura 14 – Distribuição dos pontos de ensaio.....	42
Figura 15 – Realização do ensaio.....	43
Figura 16 – Mapeamento dos valores de potencial de corrosão, distância em centímetros.....	47
Figura 17 – Comparação entre os resultados de potencial de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 1.....	48
Figura 18 – Comparação entre os resultados de potencial de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 2.....	49
Figura 19 – Comparação entre os resultados de potencial de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 3.....	50
Figura 20 – Mapeamento dos valores de taxa de corrosão, distância em centímetros.....	52
Figura 21 – Comparação entre os resultados de taxa de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 1.....	53

Figura 22 – Comparação entre os resultados de taxa de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 2.....	54
Figura 23 – Comparação entre os resultados de taxa de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 3.....	55



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de Potencial de corrosão e probabilidade de corrosão.....	23
Quadro 2 – Probabilidade de Corrosão em relação ao valor de Resistividade Elétrica do Concreto.....	24
Quadro 3 – Valores de Densidade de corrente e Grau de corrosão.....	26
Quadro 4 – Valores de Profundidade de Carbonatação.....	44
Quadro 5 – Valores de Potencial de Corrosão.....	45
Quadro 6 – Valores de Taxa de corrosão.....	47

## **LISTA DE SIGLAS**

ABENDI - Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AgNO<sub>3</sub> – Nitrato de Prata

ASTM – American Society for Testing and Materials

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

CuSO<sub>4</sub> - Sulfato de Cobre II

DDP – Diferença de Potencial

DIN - Deutsches Institut für Normung

LEME – Laboratório de ensaios e modelos estruturais

PH - Potencial hidrogeniônico

PPM – Partes por milhão

RILEM - International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_{corr}$  = corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$r$  = taxa de corrosão (mm/ano)

$\text{mA}$  = milésimo de ampère

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	14
1.2 OBJETIVO PRINCIPAL.....	15
1.3 DELIMITAÇÕES.....	15
1.4 LIMITAÇÕES .....	15
<b>2 CORROSÃO EM ESTRUTURA DE CONCRETO.....</b>	<b>17</b>
2.1 CORROSÃO: CONCEITOS GERAIS.....	17
2.2 CORROSÃO: ARMADURAS DE CONCRETO ARMADO.....	18
2.3 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE CORROSÃO.....	19
2.3.1 Ensaio colorimétrico para avaliação da corrosão em estruturas de concreto armado.....	20
2.3.1.1 Determinação da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto armado...	20
2.3.1.2 Determinação da presença de cloretos em estruturas de concreto armado.....	21
2.3.2 Potencial de corrosão.....	23
2.3.3 Resistividade elétrica.....	25
2.3.4 Taxa de corrosão.....	26
2.4 PESQUISAS RELACIONADAS.....	27
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
3.1 DETALHAMENTO DA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO.....	29
3.2 PREPARAÇÃO DOS PILARES.....	35
3.2.1 Localização das armaduras através da pacometria.....	35
3.2.2 Saturação dos pilares.....	37
3.2.3 Exposição da armadura.....	38
3.3 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.....	39
3.3.1 Carbonatação.....	39
3.3.2 Potencial de corrosão e taxa de corrosão.....	40
<b>4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
4.1 CARBONATAÇÃO.....	45
4.2 POTENCIAL DE CORROSÃO.....	46

4.3 TAXA DE CORROSÃO.....	51
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>56</b>
5.1 CONCLUSÃO.....	56
5.2 SUJESTÕES FUTURAS.....	57
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>60</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>61</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>62</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial, aborda-se a contextualização, a questão de pesquisa, os objetivos a serem alcançados e as delimitações do trabalho.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Durante muitos anos, a construção civil dedicou-se ao aprimoramento contínuo de seus métodos construtivos, explorando uma variedade de materiais e técnicas inovadoras. Foi a partir do final do século XIX e início do século XX que a utilização do concreto armado ganhou destaque global, emergindo como a principal escolha no setor da construção. Essa ascensão deve-se, principalmente, à sua natureza composta, que oferece uma notável combinação de resistência e versatilidade durante a execução de projetos.

Entretanto, apesar de ser uma composição de materiais altamente eficaz, é natural que algumas manifestações patológicas possam surgir ao longo do tempo, potencialmente reduzindo a vida útil da estrutura como um todo. Entre as várias questões que podem surgir, destaca-se a corrosão das armaduras, uma anomalia estrutural significativa. A corrosão das armaduras pode levar à perda da área efetiva do aço, resultando na redução da capacidade das armaduras em suportar as cargas. Além disso, esse processo corrosivo pode desencadear fissuras na estrutura devido à expansão das armaduras enferrujadas, agravando os problemas e afetando a integridade do concreto armado (MEIRA, 2017).

Assim, a detecção precoce da corrosão torna essencial a implementação de manutenções programadas, evitando intervenções mais extensas no tratamento da corrosão, como a remoção de seções de concreto comprometidas, tratamento das armaduras e, em alguns casos, reforço estrutural. Portanto, a identificação precoce da ocorrência de corrosão em estruturas de concreto armado assume importância crucial. Para atingir esse objetivo, é possível empregar técnicas diagnósticas especializadas, permitindo a vigilância proativa da condição das estruturas.

Entre as técnicas de diagnóstico, é importante destacar que, para este estudo em particular, foram selecionadas abordagens não destrutivas, seja parcial ou integralmente. Essas metodologias oferecem uma análise notavelmente mais segura das estruturas, eliminando a necessidade de destruir ou extrair partes da estrutura que poderiam comprometer sua integridade como um todo. Para atingir esse objetivo, foram considerados como possíveis métodos os ensaios de nitrato de prata, resistividade elétrica do concreto, carbonatação,

potencial de corrosão e taxa de corrosão. Importa ressaltar que, para a obtenção dos resultados finais, somente os valores provenientes dos últimos três ensaios mencionados foram empregados como referência. Essa escolha foi motivada pelas razões destacadas no próprio trabalho, visando garantir a precisão e a relevância dos dados analisados.

Com base nisso, o objetivo deste estudo foi conduzir um diagnóstico em relação à corrosão interna das armaduras em três pilares distintos, cada um apresentando características externas diferentes. Ao final, a análise teve como propósito a avaliação entre os resultados obtidos para ilustrar as variações entre essas estruturas em termos de corrosão.

## 1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

O principal propósito deste estudo é efetuar uma análise comparativa entre distintos ensaios destinados à avaliação da corrosão em pilares de concreto armado. Utilizando para isso a identificação das armaduras por meio da pacometria e os ensaios de carbonatação, potencial de corrosão e taxa de corrosão.

## 1.3 DELIMITAÇÕES

Esta pesquisa se delimita a ensaios de corrosão realizados em três diferentes pilares localizados no Campus do Vale, pertencente a Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este trabalho irá referenciar alguns métodos não destrutivos que podem ser utilizados para identificação de corrosão em armaduras de estruturas. Para análise dos resultados serão utilizados apenas os valores obtidos de carbonatação, potencial de corrosão e taxa de corrosão.

## 1.4 LIMITAÇÕES

Este trabalho não pode ser utilizado como resultado final para as três estruturas, pois os valores de corrosão se limitam apenas a uma das quatro faces de cada pilar escolhido, podendo existir variações de valores nas outras superfícies que não foram testadas. A escolha de apenas uma das faces de cada pilar aconteceu, principalmente, ao fato dos demais lados dos pilares escolhidos apresentarem tubos de queda ou objetos que impossibilitavam a realização dos testes. Além disso, o tempo necessário para a realização dos ensaios de todos pilares foi uma

limitação, já que seriam necessários vários outros dias, tendo como base o tempo levado para a realização de apenas 1 das faces de cada estrutura.



## 2 CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

### 2.1 CORROSÃO: CONCEITOS GERAIS

A corrosão é caracterizada como a degradação de um material, geralmente de natureza metálica, devido à influência química ou eletroquímica do entorno em que se encontra, podendo ou não ser vinculada a forças mecânicas. Esse processo deteriorante se origina a partir da interação físico-química entre o substrato e o seu meio operativo, resultando em modificações prejudiciais e indesejáveis, tais como desgaste, variações químicas ou alterações estruturais. (GENTIL, 2011).

Para Helene (1993), a corrosão é conceituada de maneira bastante semelhante à anteriormente exposta por Gentil, sendo descrita como a interação danosa entre um material e o seu entorno, decorrente de elementos físicos, químicos, eletroquímicos ou de sua conjugação. Adicionalmente, destaca-se que a maioria dos processos corrosivos de metais em meios aquosos pode exemplificar uma reação eletroquímica.

Segundo Gentil (2011) a corrosão é um processo intrínseco que ocorre de forma espontânea, provocando uma transformação contínua nos materiais metálicos. Esse fenômeno resulta na diminuição da sua durabilidade e desempenho, fazendo com que os metais não consigam cumprir os propósitos para os quais foram designados. Essa questão assume uma relevância fundamental na sociedade contemporânea, já que a utilização dos metais e suas ligas é indispensável.

Gentil (2011) destaca, ainda, que a corrosão, em sua maioria, é uma reação de superfície, o que sugere a possibilidade de controle por meio das propriedades do produto corrosivo resultante. O composto metálico formado tem a capacidade de agir como uma barreira protetora entre o metal e o meio corrosivo, resultando na redução da velocidade de corrosão. Essa dinâmica é frequentemente observada na interação entre metais e ambientes gasosos. No entanto, é importante ressaltar que, quando o produto de corrosão é removido, a velocidade de corrosão não necessariamente diminui ao longo do tempo. Esse cenário ocorre quando são formados produtos de corrosão solúveis ou quando esses produtos se acumulam em áreas intermediárias entre as regiões afetadas e não afetadas pelo meio corrosivo.

Além disso, também é citado por Helene (1993) que a respeito da deterioração do aço, existem dois processos de corrosão em ação: a corrosão eletroquímica, que desempenha um papel

significativo na corrosão das armaduras, e a oxidação direta. Estas estarão descritas nos itens a e b.

- a) A corrosão eletroquímica é um fenômeno complexo que ocorre devido à interação entre umidade, água ou soluções aquosas presentes na superfície das barras de aço ou no concreto circundante. Essas substâncias atuam como eletrólitos, criando pilhas ou células de corrosão. Nessas células, ocorre a dissolução do aço nas regiões chamadas anódicas, onde ocorre a corrosão propriamente dita. Por outro lado, nas regiões catódicas, o processo de corrosão é mínimo, causando uma assimetria na deterioração. Quando as barras de aço são afetadas pela corrosão devido à umidade ou temperatura ambiente, caracteriza-se como um processo corrosivo eletroquímico.
- b) No processo de oxidação direta, ocorre a interação direta entre os átomos de aço e as moléculas de oxigênio, levando à formação de uma camada contínua e homogênea de óxido de ferro. Essa reação pode ocorrer tanto com o oxigênio presente no ar quanto com íons presentes em soluções. É notável que a taxa de corrosão nesse tipo de processo é geralmente baixa em temperaturas normais, mas se torna mais significativa em temperaturas elevadas. Além disso, a corrosão se manifesta de forma uniforme, afetando de maneira igual toda a superfície do aço.

A corrosão eletroquímica assume um papel fundamental nas construções civis, especialmente nas estruturas de concreto armado, podendo levar a níveis significativos de deterioração. Nesse tipo de corrosão, ocorrem simultaneamente reações de oxidação e redução, acompanhadas pela circulação de íons através de um eletrólito (ANDRADE, 1988). Sua ocorrência pode acarretar consequências substanciais nas obras, demandando atenção especial para a preservação e manutenção dessas estruturas.

## 2.2 CORROSÃO: ARMADURAS DE CONCRETO ARMADO

Ao longo do tempo, a sociedade sempre estudou possíveis manifestações patológicas, entre elas, as condições que levam à corrosão do aço em estruturas de concreto armado. No entanto, é preocupante a presença significativa de corrosão em estruturas de concreto já existentes, muitas vezes, em projetos novos, resultando em reparos caros. Na maioria dos casos, isso ocorre

devido à falta de durabilidade adequada das estruturas ou à negligência na manutenção adequada. A corrosão da armadura embutida no concreto é a principal causa de falhas em estruturas (SWAMY, 2000).

É dito por Ribeiro (2014) que a corrosão é manifestada em armaduras, normalmente, por manchas superficiais causadas justamente pelo produto da corrosão e, comumente, acompanhadas por fissuras, destacamento do concreto da camada de cobrimento e reduzindo a secção resistente das armaduras.

De acordo com Figueiredo e Meira (2013) o aço que está presente no concreto armado possui ao mesmo tempo dois tipos de proteção. Uma delas sendo a própria proteção física devido ao fato do aço estar inserido na estrutura e protegido por uma camada de cobertura e, além disso, possui também uma proteção química conferido pelo alto PH do concreto, o qual promove uma camada protetora. Entretanto, Swamy (2000) comenta que mesmo com essa proteção, o aço estará sujeito a corrosão quando a estrutura de concreto armado estiver sobre o efeito de carbonatação, também chamada de corrosão generalizada irregular, ou corrosão puntiforme, que seria o nome dado para o ataque de cloretos nas armaduras.

Meira (2017) explica que a carbonatação, que ocorre no concreto, acaba desencadeando uma corrosão longa, deteriorando uma grande parte da superfície do aço. Swamy (2000) ainda comenta que nesse tipo de corrosão pode haver a diminuição da seção transversal e perda enorme de resistência. Meira (2017) diz que a corrosão por cloretos ou pites, está relacionada a uma ação localizada em relação a ruptura da camada protetora do metal. Além disso, ele ainda complementa dizendo que nos casos de estruturas protendidas pode ocorrer corrosão sob tensão, que aparece em casos onde as tensões e a ação eletroquímica favorecem o surgimento de fissuras na armadura.

## 2.3 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE CORROSÃO

De acordo com a ABENDI (2023), os ensaios não destrutivos (END) são um conjunto de técnicas e métodos utilizados para avaliar a integridade, a qualidade e as características de materiais, componentes e estruturas sem causar danos permanentes ou destruição às peças inspecionadas.

Segundo Neville (2016), ensaios destrutivos utilizavam, muitas vezes, corpos de prova curados em campo, juntamente com testemunhos, para realizar testes no concreto. Esses métodos eram considerados adequados para obter os resultados desejados. Entretanto, os mesmos necessitam

de planejamento prévio e, por causar danos a estrutura, foram criticados e, aos poucos, estão sendo abandonados.

Devido a isso, os ensaios não destrutivos apresentam um grande potencial para a manutenção preventiva e corretiva, permitindo a avaliação do comportamento dos materiais utilizados sem causar danos. Isso possibilita a repetição dos testes no mesmo local ou em locais próximos, com pouca ou nenhuma interferência na estrutura, o que viabiliza um monitoramento contínuo e o acompanhamento de variações ao longo do tempo. Essas características estão alinhadas com as novas necessidades e expectativas do setor da construção. (BARREIRA; FREITAS, 2004).

A utilização de ensaios não destrutivos traz consigo uma série de benefícios que se refletem em uma maior segurança e uma melhor programação, resultando em um avanço mais ágil e econômico. Em termos gerais, esses ensaios podem ser categorizados em dois grupos: aqueles que avaliam a resistência do concreto no local e aqueles que verificam outras características, como vazios, falhas, fissuras e deterioração. Essa abordagem permite uma análise abrangente do material, garantindo um maior controle de qualidade e auxiliando na tomada de decisões (NEVILLE, 2016).

### **2.3.1 Ensaios colorimétricos para avaliação da corrosão em estruturas de concreto armado.**

#### **2.3.1.1 Determinação da profundidade carbonatação em estruturas de concreto armado**

A carbonatação representa um procedimento no qual os elementos hidratados provenientes do cimento presentes na composição do concreto reagem com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) encontrado na atmosfera. Esse processo torna o aço utilizado para reforço mais propenso à corrosão. No contexto da carbonatação do concreto, as taxas de  $\text{CO}_2$  atuais são consideradas relativamente moderadas, situando-se em aproximadamente 390 partes por milhão (ppm) por volume na atmosfera. No entanto, tem-se percebido que em áreas urbanas, as concentrações locais de  $\text{CO}_2$  presentes nas amostras de ar podem apresentar valores ligeiramente superiores, alcançando até 700 ppm (DYER, 2015).

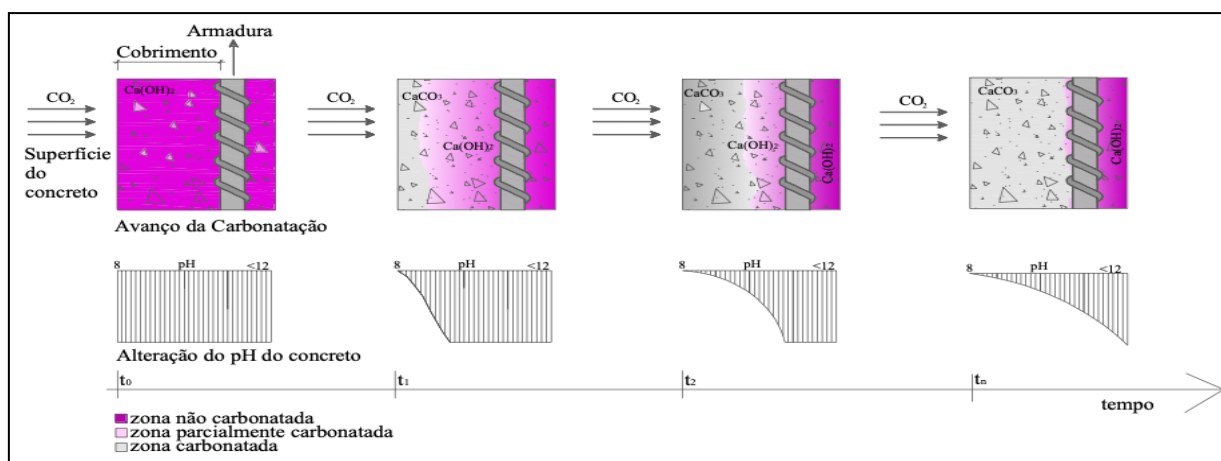
Para a realização do ensaio de profundidade de carbonatação pelo método da fenolftaleína em um concreto endurecido, é utilizada como base a EM 14630 (DIN, 2007). A norma descreve um procedimento que envolve a extração de amostras de concreto e a realização de análises laboratoriais para determinar a profundidade de carbonatação. O método é baseado na medição

do teor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) nas amostras e na determinação do pH utilizando uma solução.

Além do regulamento descrito anteriormente, a norma CPC-18 (RILEM, 1988 também descreve, de maneira semelhante, o procedimento a ser seguido. De acordo com o documento, os ensaios podem ser conduzidos tanto com amostras retiradas da estrutura e transportadas ao laboratório, quanto com espécimes em campo. No segundo caso, os critérios de precisão da medição geralmente são menos exigentes quando comparados aos espécimes de laboratório, entretanto, podem ser considerados para fins de estudo normalmente. Ademais, é dito pela norma que para a realização do teste em questão será necessária a utilização de uma mistura que pode ser de timolftaleína ou da própria fenolftaleína. Para este segundo caso, deve ser realizada uma junção de 1% do produto em álcool etílico 70%.

Conforme Moraes (2012), o ensaio envolve a realização de uma abertura em uma parte do pilar a ser analisado, seguida da aplicação direta da solução sobre o concreto exposto. Nesse procedimento, a área da estrutura que não sofreu perda de alcalinidade adquire uma coloração rosada, enquanto em áreas com pH abaixo de 8 a substância permanece incolor indicando a frente de carbonatação da estrutura investigada. A figura 1 demonstra como ocorre o avanço da penetração de dióxido de carbono ao longo de estruturas de concreto armado.

Figura 1: Representação do avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto no tempo.



Fonte: Possan, 2010

### 2.3.1.2 Determinação da presença de cloretos em estruturas de concreto armado

Conforme Figueiredo e Meira (2013), a corrosão induzida por íons cloreto surge quando essas partículas com carga positiva conseguem infiltrar-se nos poros da estrutura de concreto,

acompanhadas por água e oxigênio. Quando essas partículas entram em contato com a camada protetora da armadura, ocorrem corrosões localizadas nesse ponto específico. Todavia, esse processo não é simples, pois há uma ruptura na referida camada, mas logo em seguida ocorre sua regeneração. Assim, essa corrosão assume uma natureza dinâmica, em que os íons cloreto rompem a camada até o ponto em que a corrosão efetiva se desencadeia.

Também é ressaltado que, diferentemente da carbonatação, a corrosão provocada por cloretos concentra-se predominantemente em locais específicos, sendo também denominada corrosão por pites.

Segundo MEDEIROS et al. (2018) o método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata pode ser utilizado para a determinação da presença de cloretos livres presentes na estrutura de concreto armado. Esta análise serve para demarcar a profundidade em que se encontram esses íons e classificar se há uma presença próxima das armaduras.

MEDEIROS et al. (2018) também cita que o teste é consistido da aspersão do nitrato de prata diretamente na estrutura ou corpo de prova que será utilizado. O nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) é previamente diluído em água destilada, em proporções variando de 1% a 10%. Posteriormente, a solução é aplicada por pulverização sobre a superfície do concreto. Nos pontos onde são identificados cloretos livres, ocorre a formação de um precipitado de cloreto de prata em coloração branca, ao passo que em áreas onde a presença de cloretos é nula ou estão combinados, a formação de um precipitado de coloração marrom se manifesta. A figura 2 ilustra o resultado obtido após a aplicação do ensaio por aspersão.

Este mesmo autor ainda declara que a penetração dos cloretos normalmente não é uniforme, sendo recomendada a realização de sete medidas a cada 10 milímetros e, caso haja alguma interferência por parte dos agregados, deve-se optar pela mudança do local de análise.

Figura 2: Ensaio com aspersão de nitrato de prata



Fonte: MEDEIROS et al. (2018)

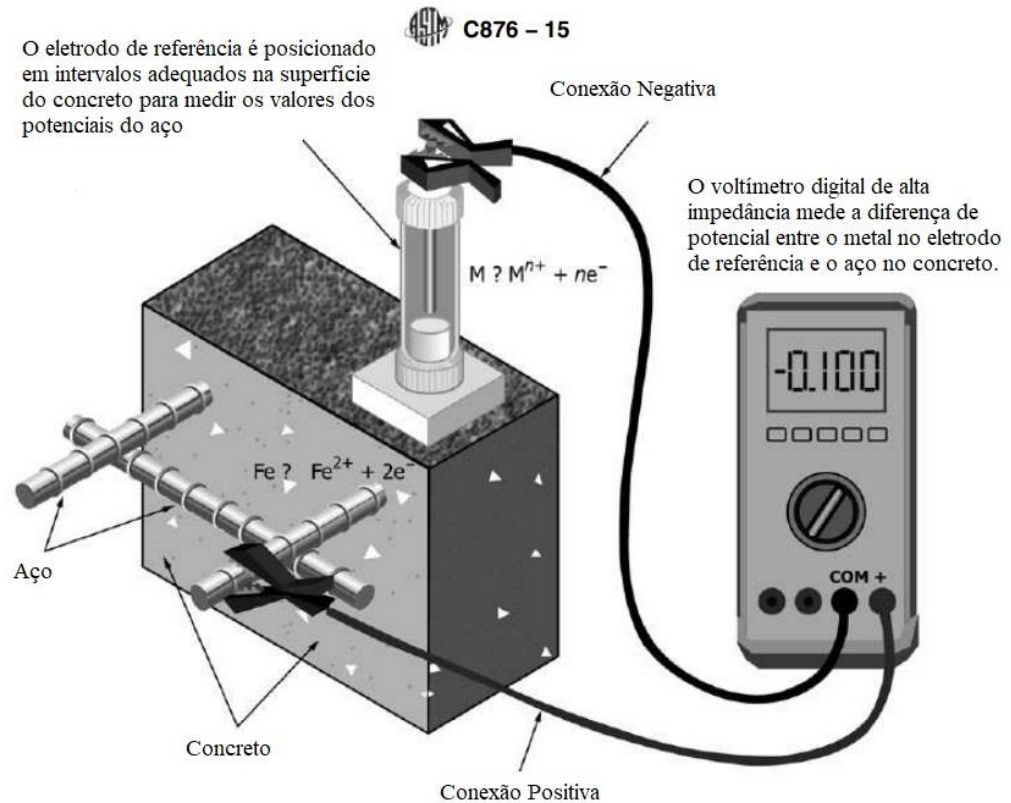
### 2.3.2 Potencial de corrosão

Conforme Helene (1993), o potencial de corrosão, igualmente denominado como potencial de eletrodo/eletroquímico, refere-se a um teste realizado de acordo com a norma C 876 (ASTM, 2015). Esse método emprega um eletrodo de referência, geralmente feito de cobre/sulfato de cobre, com o objetivo de mensurar a variação de potencial entre o sistema armadura-concreto e o sistema secundário nas áreas próximas ao local de aplicação do eletrodo de referência na superfície do concreto. Esta técnica trata-se de um método para analisar a probabilidade de a armadura estar ou não com corrosão.

De acordo com a norma C 876 (ASTM, 2015) os processos para a realização do ensaio podem ser descritos da seguinte maneira:

- a) Primeiramente deve ser realizado um preparo da base onde será realizada a medição da diferença de potenciais. Deve ser limpa a base do concreto onde será feita a medição e também deve ser exposto o aço que servirá como ponte para a conexão elétrica.
- b) Em seguida deve ser posicionado o eletrodo de referência na superfície do concreto, deixando próximo da armadura que será avaliada. Normalmente ele é feito de cobre/sulfato de cobre e está imerso em uma solução de  $\text{CuSO}_4$  (Sulfato de Cobre II). É necessário também que ele não seja colocado diretamente sobre o concreto e sim sobre uma esponja que deve estar umedecida.
- c) Em seguida, é conectado o eletrodo de referência no eletrodo de trabalho, barra de aço neste caso, por meio de um voltímetro e, assim, são realizadas as medidas de diferença de potencial.

A figura 3 apresenta como pode ser realizada essa conexão entre os eletrodos que são trabalhados.

Figura 3: Ensaio com eletrodo de  $\text{CuSO}_4$ 

Fonte: Adaptado ASTM C876 - 15

Segundo CASCUDO (1997) a técnica utilizada para a medição da diferença de potencial oferece dados qualitativos sobre o estado em que se encontra a armadura analisada. Dessa forma, pode ser averiguado se há presença ou não de formação de corrosão na armadura. Segundo a C 876 (ASTM, 2015), os dados obtidos podem ser avaliados e interpretados de acordo com o quadro a seguir.

Quadro 1: Valores de Potencial de corrosão e probabilidade de corrosão

POTENCIAL DE CORROSÃO	
Diferença de Potencial	Probabilidade de Corrosão
Maior que -200mV	Menor de 10%
Entre -200mV e -350mV	Incerta, 50%
Menor que -350mV	Maior que 90%

Fonte: Adaptado da norma ASTM C876-15



### 2.3.3 Resistividade elétrica

A resistividade é uma propriedade física que caracteriza a capacidade intrínseca de um material de resistir ao fluxo de corrente elétrica quando uma diferença de potencial (voltagem) é aplicada a ele. Em outras palavras, ela quantifica o quão difícil é para a eletricidade passar através de um material específico. A resistividade é uma característica fundamental de cada material e está relacionada à estrutura e à composição desse material (HALLIDAY e RESNICK, 1994).

De acordo com Helene (1993), a resistividade elétrica desempenha um papel fundamental no controle do fluxo de íons que se difundem no concreto através da umidade presente nos poros. Essa resistividade tende a diminuir à medida que a umidade aumenta. Além disso, é dito que a temperatura possui uma grande influência também sobre este fenômeno que acontece na estrutura.

Quando os poros do concreto estão totalmente saturados de água, a resistividade elétrica tende a ser muito baixa. No entanto, o oxigênio enfrenta dificuldade em alcançar a armadura, o que controla o processo de corrosão devido à restrição de acesso. Por outro lado, em casos de baixa umidade, a resistividade elétrica é muito maior, o que também dificulta a corrosão, mesmo quando o concreto está carbonatado. Entretanto, a velocidade máxima de corrosão ocorre em um ponto intermediário, onde o concreto precisa estar úmido, mas não saturado. Isso permite que o oxigênio alcance rapidamente a armadura, acelerando o processo de corrosão. (FIGUEIREDO e MEIRA, 2013).

Segundo as recomendações estabelecidas do TC 154 (RILEM, 2007) um dos métodos que podem ser utilizados para mensurar a resistividade elétrica de uma estrutura é utilizando um eletrodo externo, mais especificamente utilizando um disco metálico colocado na superfície do concreto e conectado à armadura. Com isso pode ser determinada a resistência entre o disco e a barra e conseqüentemente a resistividade elétrica. (DURAR, 1998 apud LENCIONI, 2011).

Conforme a CEB 192 (CEB, 1988) os valores retirados do teste de resistividade podem ser utilizados para demonstrar a probabilidade de corrosão na armadura da estrutura. Esta comparação pode ser encontrada segundo o Quadro 2 abaixo.

Quadro 2: Probabilidade de Corrosão em relação ao valor de Resistividade Elétrica do Concreto

RESISTIVIDADE ELÉTRICA	
Resistividade do concreto ( $\Omega.m$ )	Probabilidade de Corrosão
Maior que 200	Desprezível
Entre 100 e 200	Baixa
Entre 50 a 100	Alta
Menor que 50	Muito Alta

Fonte: Adaptado CEB 192, 1988

### 2.3.4 Taxa de corrosão

A taxa de corrosão de uma armadura dentro de uma estrutura de concreto armado, em determinado ambiente e temperatura, pode ser estimada através da umidade de equilíbrio do concreto, da resistividade elétrica ou mesmo da corrente de corrosão. Com isso, admitindo que esses valores sejam constantes ao longo do tempo, há como determinar a vida útil para essa estrutura até que ocorra uma manifestação patológica que afete gravemente a obra. (HELENE, 1993).

Conforme Helene (1993) relatou, a taxa de corrosão está intimamente ligada à corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) para a mesma área. No contexto das armaduras presentes em estruturas de concreto armado, as quais são feitas do mesmo material, ou seja, aço, a taxa de corrosão é unicamente determinada por essa corrente de corrosão e pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$r = 0,01161 * I_{corr}$$

Onde:

$r$  = taxa de corrosão (mm/ano)

$I_{corr}$  = corrente de corrosão ( $\mu A/cm^2$ )

Também é importante notar que, no caso de corrosões localizadas, como as corrosões do tipo pite (pites), não é recomendado utilizar o método descrito por Helene. Isso ocorre porque esse método é mais adequado para determinar a taxa de corrosão em casos de corrosões mais extensas e distribuídas ao longo da armadura. Essa abordagem permite uma melhor estimativa da vida útil da estrutura como um todo.

De acordo com a TC 154 (RILEM, 2007), pode-se determinar os valores admissíveis para taxa de corrosão utilizando o método da resistência à polarização. Esse método permite identificar dois parâmetros: a densidade de corrosão ( $I_{corr}$ ) e a velocidade de corrosão ( $V_{corr}$ ). Com isso, podemos obter os valores necessários para determinar se os riscos de corrosão são considerados altos ou não. É dito por Andrade et al. (2004) que valores de densidade de corrente obtidos através do método, abaixo de  $0,1 \mu A/cm^2$ , serão considerados desprezíveis, enquanto acima de  $1 \mu A/cm^2$ , alto risco de corrosão. No Quadro 2 é possível identificar alguns valores de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) diretamente relacionados a probabilidade de corrosão da armadura.

Quadro 3: Valores de Densidade de corrente e Grau de corrosão

TAXA DE CORROSÃO	
Densidade de corrente ( $I_{corr}$ ) ( $\mu A/cm^2$ )	Grau de corrosão
Menor que 0,1	Desprezível
Entre 0,1 e 0,5	Baixo
Entre 0,5 e 0,9	Médio
Maior que 0,9	Alto

Fonte: Adaptado de Andrade *et al.*, 2004

## 2.4 PESQUISAS RELACIONADAS

Lencioni (2011) realizou um trabalho com o objetivo de abordar a corrosão das armaduras em estruturas de concreto, investigando fatores que afetam a medição da resistividade elétrica superficial do material por meio do método de Wenner. O estudo quantitativo considerou aspectos como a presença da armadura, condições de exposição, cura do concreto e idade do material. Os resultados indicaram que uma distância mínima da armadura é necessária para evitar influência na condutividade do aço, e posicionamento perpendicular da sonda Wenner à armadura não a afeta. A formação de linhas de corrente requer distância mínima da borda do concreto, e a estabilização da resistividade elétrica ocorre após cerca de 120 dias sob cura submersa ou mais tempo sob condições laboratoriais.

Por sua vez, Torres (2010) produziu uma pesquisa com o objetivo de validar os testes de corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado, por meio de uma meta-análise das abordagens eletroquímicas empregadas em teses e dissertações no Brasil. O intuito foi tanto mapear como orientar futuras investigações na área de corrosão das armaduras em concreto no

país, revelando a predominância de estudos nas regiões Sudeste e Sul em contraste com a carência na região Norte. Através de análises estatísticas, concluiu-se que há uma ausência de diversas combinações de variáveis necessárias para estabelecer um modelo brasileiro confiável nesse contexto.

No estudo de Júnior (2013), foi investigada a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado, abordando causas, sintomas e impactos dessa degradação. A pesquisa destacou a importância de fatores controláveis no projeto, como cobrimento e especificações do concreto, bem como a necessidade de atenção durante a fase de construção. Em colaboração com o Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), foram executados ensaios abrangendo potencial de corrosão, análise de cloretos e profundidade carbonatada, resultando em uma compilação de dados abrangente sobre as principais causas da corrosão das armaduras. Os resultados da avaliação da profundidade carbonatada demonstraram o efeito da carbonatação e sua influência no processo corrosivo, enquanto a análise de cloretos indicou níveis insignificantes desses íons no concreto, excluindo sua contribuição para a corrosão. O ensaio de potencial de corrosão permitiu a identificação de regiões mais suscetíveis ao processo corrosivo dentro do concreto, possibilitando a determinação de sua extensão.

### 3 METODOLOGIA

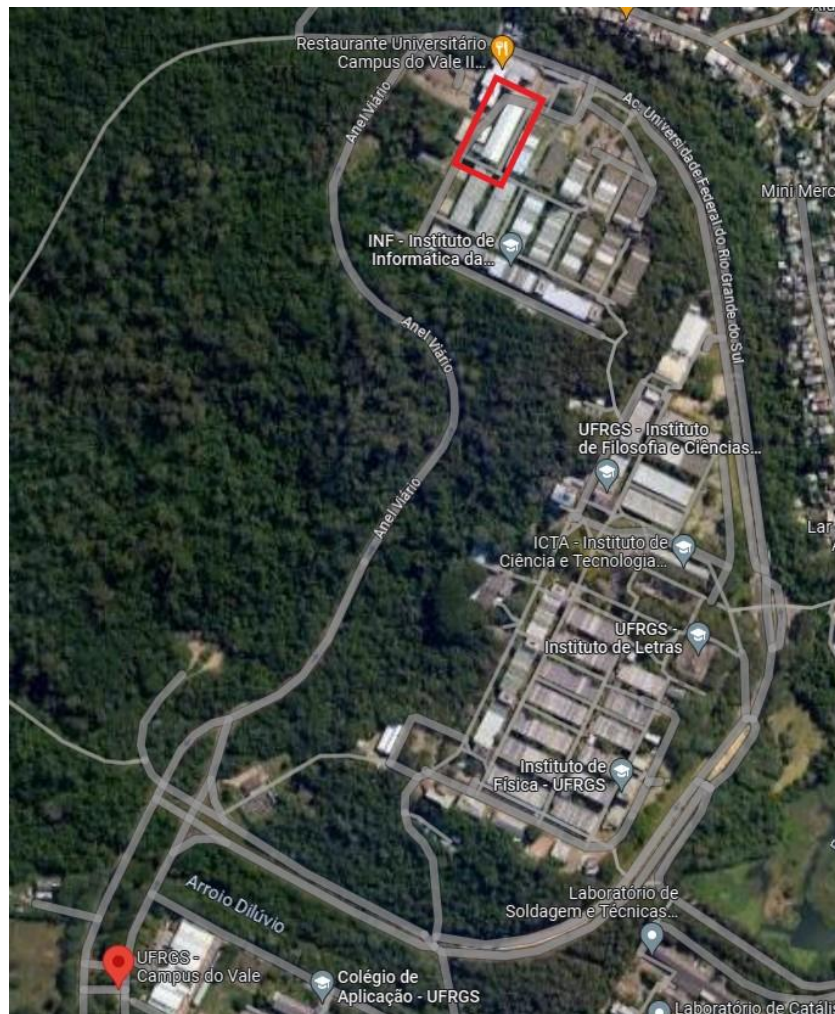
No capítulo dois deste trabalho, foi destacado que a corrosão tem um impacto significativo nas construções, causando problemas como ferrugem localizada (corrosão por pites) ou danos mais generalizados. Por isso, é muito importante estudar e usar métodos de testes para avaliar a segurança e a vida útil de estruturas de concreto armado.

Neste estudo, o objetivo é examinar uma face de três diferentes pilares. Para isso, essas estruturas foram selecionadas com base em sua aparência externa e na exposição ao ambiente em que estão localizados. Deseja-se comparar essas partes para compreender se a aparência externa pode ser um indicativo confiável para determinar se as armaduras estão corroídas, mesmo na ausência de sinais visíveis de umidade ou corrosão na superfície. Essa análise é fundamental para compreender se os mesmos podem apresentar problemas de corrosão ocultos, mesmo que aparentemente estejam em boa condição externa.

#### 3.1 DETALHAMENTO DA ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO

Após determinar qual seria o assunto abordado nesta pesquisa, foi necessário identificar quais seriam os elementos estruturais a serem estudados. Devido a isso, para obter uma maior facilidade em realizar os ensaios e também devido aos equipamentos que seriam utilizados estarem no laboratório da universidade, optou-se pela escolha de realizar os testes em estruturas de concreto localizadas na própria universidade, mais especificadamente, na UFRGS em seu campus do Vale, que está localizado na região Leste de Porto Alegre, na Avenida Bento Gonçalves, 9500 - Agronomia, próximo à divisa da cidade com Viamão, a figura 4 apresenta uma ilustração do campus e da região avaliada.

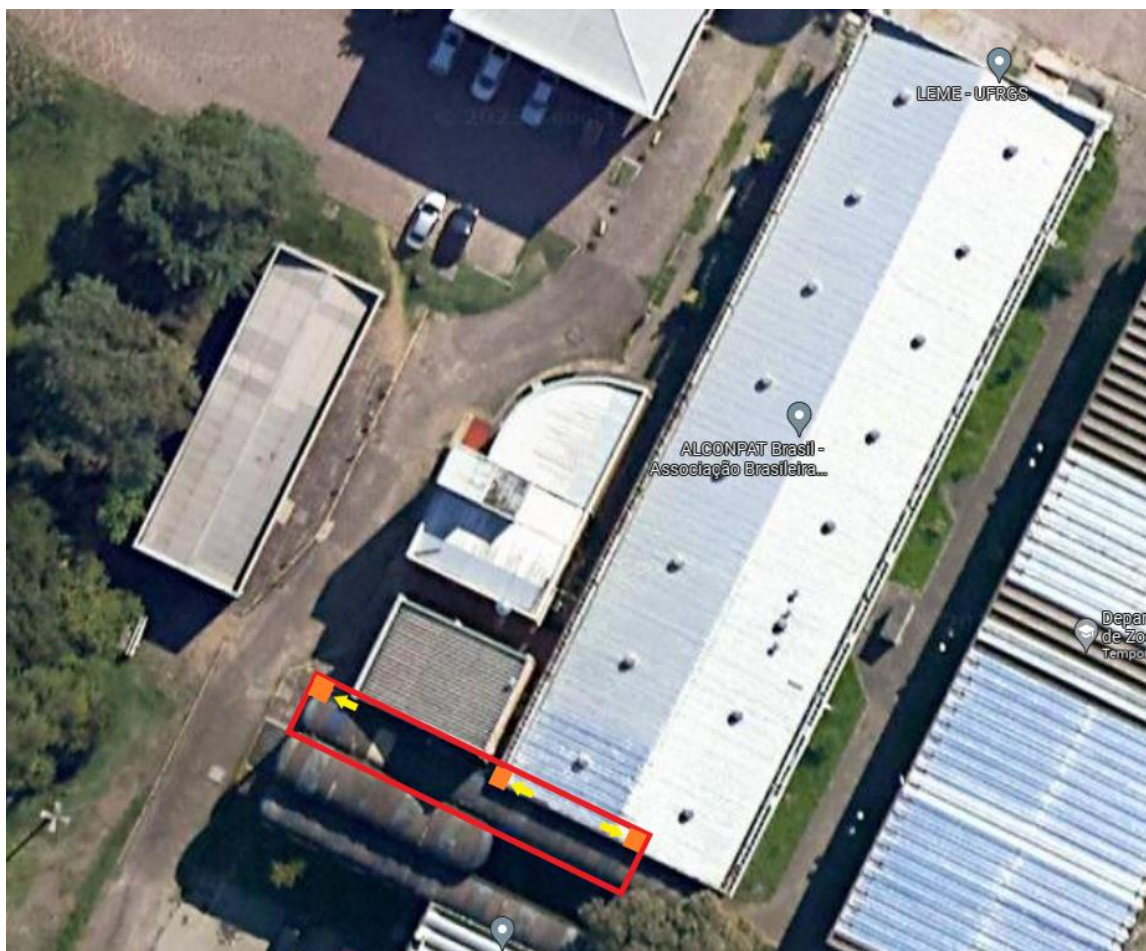
Figura 4- Ilustração do Campus do Vale e marcação da área dos ensaios



Fonte: Google Maps

Em seguida, a escolha da localização dos ensaios, foi determinado então que estes testes seriam realizados em alguns pilares que ficam próximos ao LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais). Definiu-se a avaliação em pilares de concreto armado devido à maior facilidade de acesso aos elementos, já que para fazer o mesmo em vigas o equipamento estaria limitado a altura de utilização e ao tempo necessário para o teste de cada ponto e, para lajes, seria necessário interromper o tráfego de pessoas, além de ser necessário realizar o ensaio em uma maior área, o que aumentaria o tempo dos testes. A figura 5 ilustra a área de testes em vermelho, com os pilares destacados em laranja, enquanto a seta amarela indica as faces que foram objeto de análise.

Figura 5: Localização dos pilares no campus



Fonte: Google Maps

Foram definidos para análise três pilares de concreto armado, analisando uma face de cada um dos elementos. Os pilares analisados foram escolhidos com base no aspecto visual que apresentavam, sendo o primeiro aparentando ter menos incidências visíveis de corrosão, o segundo apresentando um pouco mais de umidade aparente e o terceiro, demonstrando indícios iniciais de deslocamentos promovidos pela corrosão dos estribos, além de pequenos pontos de ferrugem a mostra. Também, foram adotados os seguintes critérios para a definição dos pilares. Os critérios utilizados para a escolha dos pilares foram:

- Possuir pelo menos uma das faces livres de quaisquer objetos que poderiam atrapalhar os ensaios como, por exemplo, tubos, eletrodutos, papéis colados etc.
- Estar com uma face livre, com possibilidade de realizar os ensaios sem dificuldade e interferência de corrimãos ou muros.

- Não estarem sendo utilizados para algum outro estudo, já que eles teriam que ser isolados e umidificados regularmente.
- Possuir uma diferença visível de umidade já existente entre os demais pilares escolhidos.

Com base nestes itens, foram então determinados quais seriam os pilares estudados, sendo eles numerados como pilar 1, 2 e 3.

A figura 6 demonstra o pilar número 1, além da face que foi escolhida para realização dos ensaios. É importante ressaltar que a escolha desse pilar se deu pelos critérios estabelecidos anteriormente e a seleção da face pela umidade aparente, pois a estrutura apresenta poucas alterações na sua coloração e, além disso, não demonstra nenhum tipo de fissura ou corrosão aparente.

Figura 6: Pilar 1



Fonte: Autor

Na figura 7 é possível observar o pilar 2 e, o aumento de umidade visível na face que foi escolhida em comparação ao pilar anterior. Esta estrutura também foi escolhida utilizando os



métodos anteriores. É relevante salientar também que mesmo tendo uma umidade aparente maior em comparação com o pilar número 1, a segunda estrutura, não possuía nenhum tipo de fissura ou corrosão visível, mesmo possuindo uma parte de sua armadura exposta e, posteriormente, preenchida com argamassa, como é possível identificar no canto inferior esquerdo da face.

Figura 7: Pilar 2



Fonte: Autor

Já na figura 8, é possível identificar que apesar da face onde foi realizado o ensaio não possuir mais umidade aparente que o pilar número 2, ela apresenta algumas fissuras e, além disso, em sua face posterior ao ensaio, é possível identificar um ponto de oxidação. Além disso, é importante destacar que este pilar sofre influência direta da chuva e do sol, que, como dito por

Figueiredo e Meira (2013), aumenta a velocidade de corrosão devida à facilidade de o oxigênio chegar até a armadura.

Figura 8: Pilar 3



Fonte: Autor

## 3.2 PREPARAÇÃO DOS PILARES

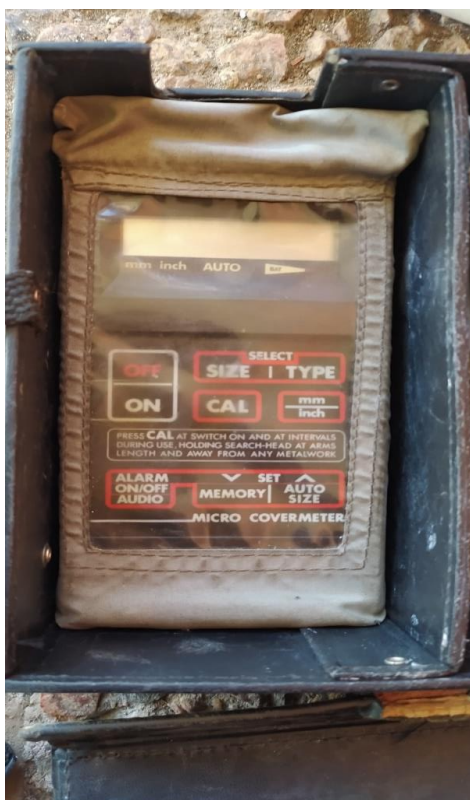
Antes da realização dos ensaios descritos nesta pesquisa, foram feitos preparativos minuciosos para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados com base nas normas descritas no capítulo dois deste trabalho. Essas etapas iniciais envolveram a marcação cuidadosa das armaduras e estribos, garantindo a identificação correta dos elementos estruturais durante todo o processo de teste. Além disso, os pilares foram devidamente umedecidos para criar condições consistentes ao longo dos experimentos. Uma parte da armadura também foi exposta para possibilitar uma conexão adequada com o aparelho de ensaio. Essas medidas foram fundamentais para o sucesso dos ensaios e serão detalhadas nos itens subsequentes.

### 3.2.1 Localização das armaduras através da pacometria

Segundo a C 876 (ASTM, 2015) e também TC 154 (RILEM, 2007), para a realização dos ensaios é necessário que o eletrodo que será utilizado seja posicionado logo acima do cobrimento da armadura que será estudada. Por essa razão, uma das primeiras ações foi identificar e marcar as armaduras nas superfícies dos pilares. Vale ressaltar que, para fazer o diagnóstico das armaduras nos pilares, foi crucial descobrir com precisão a localização dos estribos. Isso foi necessário para evitar qualquer tipo de erro durante a realização dos testes, pois se fosse realizada alguma medição sobre certos estribos, os resultados poderiam ser bem diferentes.

Para que fosse executada a marcação das armaduras foi utilizado o pacômetro demonstrado na figura 9.

Figura 9: Pacômetro



Fonte: Autor

Para realizar a identificação das armaduras, inicialmente é preciso que o aparelho tenha o sensor conectado e esteja devidamente calibrado. Em seguida, o detector foi colocado na posição vertical, para que, dessa forma, fossem feitas as leituras das armaduras principais. O pacômetro exibe em seu visor a profundidade, geralmente em milímetros, do cobrimento do pilar. Conforme o sensor se aproxima da armadura, esse valor diminui até atingir o ponto mais baixo e, em seguida, começa a aumentar novamente. Dessa maneira, é possível identificar a possível posição da armadura nessa área.

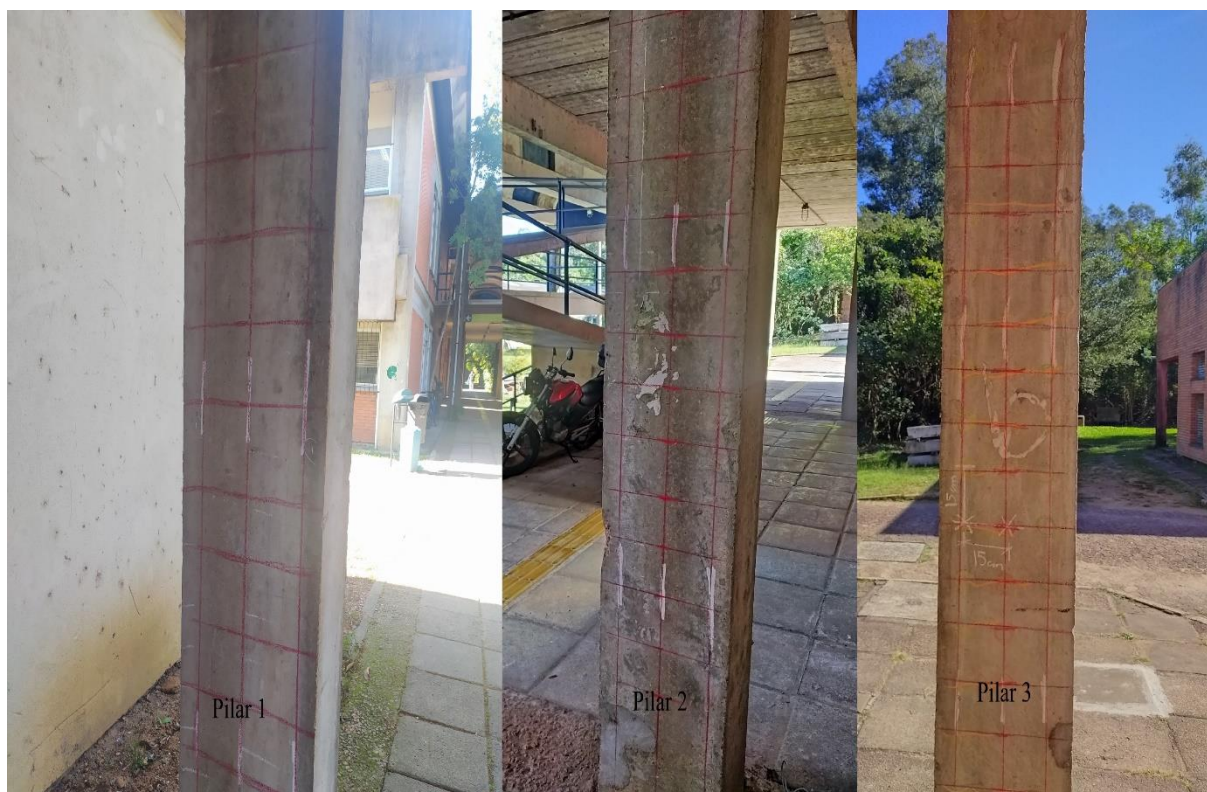
Com o objetivo de obter uma marcação o mais precisa possível, foram efetuadas várias medições para a mesma barra de armadura. Inicialmente, um registro era realizado a uma altura de cerca de 30 centímetros do chão, seguida por verificações subsequentes com um afastamento de aproximadamente 40 centímetros da anterior. Esse procedimento foi repetido até alcançar uma altura de, aproximadamente, 2 metros e 30 centímetros. Essa abordagem permitia criar linhas retas que marcavam a localização da armadura.

Para os estribos, o procedimento era um pouco distinto. Primeiramente, o sensor foi posicionado horizontalmente e, em seguida, era colocado sobre as marcações das barras. Dessa forma, era

possível determinar a distância entre cada estribo. Essa distância variou entre 14 a 16 centímetros.

Na figura 10 é demonstrado como que ficaram as marcações em cada um dos pilares.

Figura 10: Pilares com posições das armaduras identificadas



Fonte: Autor

### 3.2.2 Saturação dos pilares

Embora a norma C 876 (ASTM, 2015) não descreva o umedecimento das faces dos pilares como um procedimento obrigatório, optou-se por realiza-los. A umidificação prévia da superfície do concreto pode aprimorar o contato elétrico nos ensaios. O concreto é um material poroso e, em certas condições, a presença de poeira, sujeira ou resíduos na superfície pode criar uma camada isolante que dificulta o contato elétrico. O umedecimento da superfície ajuda a remover essas impurezas e a melhorar a condutividade elétrica, garantindo resultados mais representativos nos ensaios.

Para realizar esse procedimento, foram umedecidos os pilares a cada 3 horas durante uma semana antes dos ensaios. Como foi dito anteriormente, a intenção era apenas melhorar o contato elétrico e prevenir algumas imprecisões durante a realização dos testes.

### 3.2.3 Exposição da armadura

De acordo com as diretrizes da C 876 (ASTM, 2015), foi necessário expor uma pequena parte da armadura do pilar para permitir a conexão com o voltímetro ou o equipamento de ensaios que foi utilizado. Em vista disso, optou-se por quebrar uma porção inferior do pilar próxima a uma das armaduras das extremidades. Essa escolha foi feita de maneira aleatória para cada pilar e também foi utilizada para conduzir o teste de carbonatação.

Com esses equipamentos, inicialmente, procedia-se à remoção completa do concreto que cobria a armadura. Em seguida, realizava-se uma limpeza minuciosa utilizando lixas e escovas de aço para eliminar qualquer corrosão ou sujeira que a barra pudesse conter.

Na figura 11 é possível identificar como foi exposta a armadura antes dos ensaios.

Figura 11: Armadura exposta



Fonte: Autor

### 3.3 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

#### 3.3.1 Carbonatação

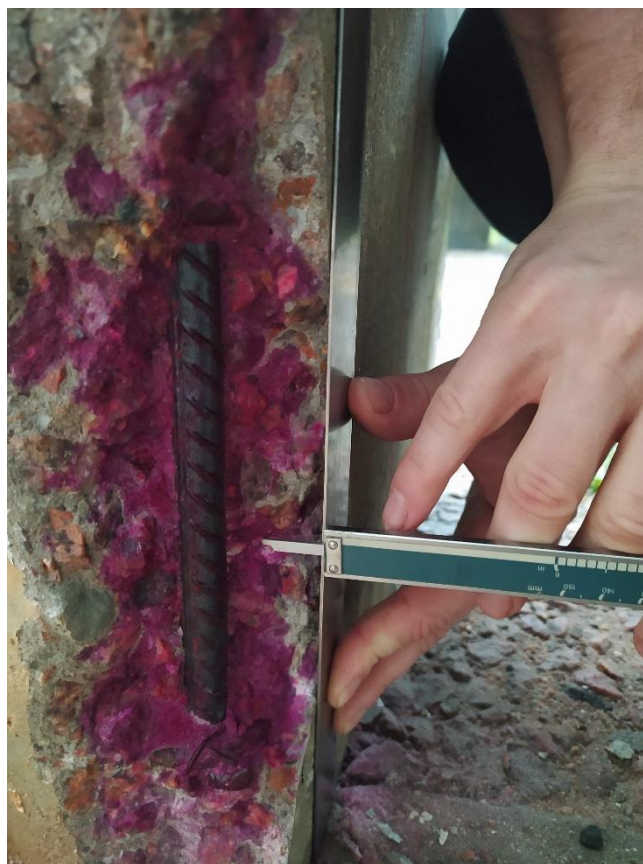
Essa pesquisa teve o interesse em analisar os níveis de carbonatação presentes em cada um dos pilares submetidos ao estudo. Vale ressaltar que, devido à localização específica dos pilares e às características do ambiente em que estão situados, optou-se por não realizar testes direcionados ao potencial ataque de cloretos, pois se entende que a ação do CO<sub>2</sub> impacta muito mais na corrosão das armaduras, por ficar próxima a um centro urbano.

Para realizar o ensaio foi levado em consideração os critérios descritos no capítulo 2.3.1.1 desta pesquisa, tanto para a elaboração da mistura que seria utilizada, neste caso a fenolftaleína, quanto para a execução do ensaio propriamente dito.

O ensaio foi conduzido na seção previamente exposta da armadura, destinada à avaliação do potencial de corrosão e taxa de corrosão. No entanto, a avaliação da carbonatação ocorreu logo após a quebra da estrutura. Nesse procedimento, uma solução contendo fenolftaleína foi pulverizada nos pilares, seguida de um intervalo de aproximadamente 1 minuto para permitir a visualização das áreas afetadas pela penetração de CO<sub>2</sub>. A figura 13 ilustra os resultados obtidos após a conclusão desse processo de análise.

É crucial salientar que medições foram realizadas em cada ponto, conforme representado na figura 12. No entanto, é importante reconhecer que esses dados coletados não refletem a carbonatação em toda a estrutura. Em locais específicos, a penetração de CO<sub>2</sub> pode variar em intensidade em relação ao que foi demonstrado no ensaio.

Figura 12: Ensaio de Carbonatação



Fonte: Autor

### 3.3.2 Potencial de corrosão e Taxa de corrosão

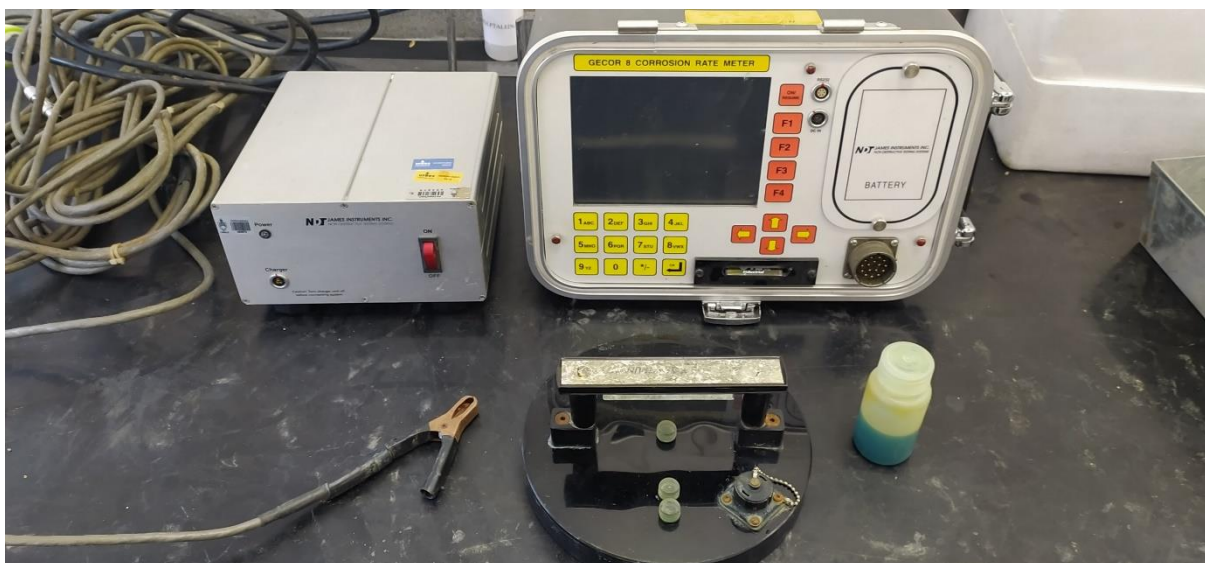
Nos itens anteriores deste capítulo foram demonstrados os motivos e preparativos dos pilares para a execução dos ensaios. Isto compreende desde a escolha, localização das armaduras e exposição de uma parte da barra.

A avaliação da estrutura foi realizada utilizando o equipamento Gecor 8, juntamente com um eletrodo de referência, que neste caso, como é aconselhado pela C 876 (ASTM, 2015), seja de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ . O equipamento foi utilizado de uma forma muito parecida como é demonstrado na figura 3, o polo negativo do equipamento foi conectado ao eletrodo de referência, enquanto o polo positivo foi conectado à barra de armadura.

Na figura 13 é possível identificar o equipamento Gecor 8, além do eletrodo de referência, peça com formato arredondado e, a solução de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .



Figura 13: Equipamento Gecor 8

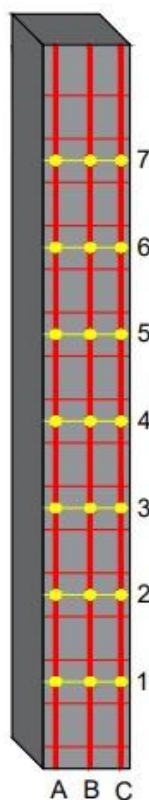


Fonte: Autor

Antes de realizar os ensaios com o equipamento Gecor8, foi necessário determinar os pontos específicos ao longo da face do pilar onde seriam colocados os eletrodos de referência. Conforme mencionado anteriormente, os testes foram planejados para ocorrer acima das armaduras que foram previamente demarcadas. No entanto, para evitar possíveis problemas durante o ensaio, também foram marcados os estribos, garantindo que os eletrodos não fossem acidentalmente colocados sobre eles.

Com esse objetivo em mente, as demarcações para os testes foram posicionadas a uma distância de 30 centímetros entre si, priorizando o espaço entre cada estribo. A figura 14 ilustra a distribuição dos pontos de ensaio ao longo da face dos pilares, assegurando uma abordagem cuidadosa e precisa durante todo o processo de ensaio.

Figura 114: Distribuição dos pontos de ensaio



Fonte: Autor

Após a definição dos pontos para os ensaios, deu-se início aos testes. Conforme mencionado anteriormente, o procedimento começou com a conexão dos polos positivo e negativo, seguido pelo posicionamento do eletrodo próximo ao concreto. Para garantir uma conexão sólida e resultados precisos, uma esponja levemente umedecida foi utilizada entre o pilar e o eletrodo, facilitando o contato entre as duas superfícies. Adicionalmente, o pilar foi umedecido novamente antes de iniciar os procedimentos. Com o eletrodo devidamente encostado no pilar, procedeu-se à configuração do equipamento Gecor 8.

Por se tratar de uma estrutura comum, não submersa ou excessivamente úmida, optou-se pela opção "Measurement in aerial structures" no equipamento. Nessa opção, foram fornecidas outras informações importantes que deveriam ser escolhidas, como as condições climáticas no dia do ensaio, o estado do pilar (seco ou úmido), a posição do eletrodo (vertical ou horizontal), área de contato do eletrodo com o pilar, entre outros detalhes.

Após as preparações necessárias, deu-se início ao ensaio propriamente dito. Durante esse processo, o eletrodo foi segurado na posição vertical, com seu centro acima da marcação da armadura. Antes de prosseguir, foi importante aguardar a leitura do aparelho para garantir que a posição do eletrodo e os demais componentes estavam corretos. Caso o equipamento não informasse nenhum tipo de erro, iniciava-se o procedimento de coleta de informações, que poderia levar entre 30 segundos e 2 minutos. Durante esse tempo, o aparelho permanecia em contato contínuo com o pilar.

Na figura 15 é possível identificar um exemplo de como foi realizado o ensaio.

*Figura 125: Realização do ensaio*



Fonte: Autor

Após a conclusão do procedimento mencionado anteriormente e a devida execução do teste, os dados obtidos eram exibidos na tela do aparelho. Esses dados incluíam a taxa de corrosão, o potencial de corrosão e a resistividade elétrica. Cada ponto demarcado na figura 15 foi

submetido a um levantamento e, alguns deles passaram por repetições dos ensaios para garantir a precisão dos valores obtidos. A realização de repetições foi uma medida importante para confirmar a consistência e a confiabilidade das informações obtidas ao longo do processo. Essa abordagem minuciosa proporcionou uma análise mais detalhada e segura da condição do aço.

## 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo analisar os resultados derivados das séries de ensaios empreendidos. Os dados abrangem aspectos como potencial de corrosão, taxa de corrosão e níveis de carbonatação, todos relacionados aos pilares analisados. É importante ressaltar que, como mencionado no capítulo anterior desta pesquisa, os ensaios realizados utilizando o equipamento Gecor 8 foram conduzidos em vários pontos distintos ao longo de cada pilar. No entanto, a avaliação dos resultados será feita com base na média dos valores de cada teste. Ainda assim, os resultados individuais de cada pilar estarão disponibilizados no apêndice A, B e C deste trabalho.

### 4.1 CARBONATAÇÃO

Os dados de carbonatação que foram obtidos através do ensaio podem ser utilizados para ter uma noção, tanto da profundidade em que se encontra, até se esse pode ser considerado um dos motivos para a corrosão existente. Entretanto, como já foi relatado neste trabalho, foi apenas utilizado um ponto, em cada pilar, para o teste de carbonatação. Isso implica que podem haver diferenças de profundidades de carbonatação ao longo dos pilares, sendo necessário realizar mais testes para um melhor entendimento. Este ensaio foi realizado apenas com o intuito de agregar mais informações a respeito de cada um dos pilares e os valores não devem ser utilizados como dado definitivo.

No quadro 4 é possível identificar os valores médios de profundidade de carbonatação que foram encontrados no local do ensaio. Além disso, os valores utilizados para o cálculo da média serão disponibilizados no Apêndice A,B e C.

Quadro 4: Valores de Profundidade de Carbonatação

<b>Profundidade de Carbonatação (mm)</b>			
	Média	Desvio	CVR
Pilar 1	14,175	2,52	17.77%
Pilar 2	2	1	50%
Pilar 3	12,205	2,68	21.96%

Fonte: Autor

Pode ser visto no quadro 4 que os valores médios de profundidade de carbonatação para os pilares 1 e 3 foram muito parecidos, praticamente idênticos. Entretanto, para o Pilar número dois, quando foi realizado o ensaio, ele apresentou valores extremamente pequenos, na ordem de 1 a 2 mm. Além disso, como foi dito anteriormente, nesses casos é aconselhado que seja realizado outros testes procurando identificar se esse resultado se aplica a outros pontos do pilar. Como nesta pesquisa o foco está no diagnóstico das armaduras e esse teste foi de caráter complementar, não foi realizada um novo ensaio.

#### 4.2 POTENCIAL DE CORROSÃO

Como foi comentado no capítulo 2.3.2 desta pesquisa, o potencial de corrosão é um dos métodos que pode ser utilizado para mensurar qual a probabilidade de a armadura estar corroída. Para isso, pode ser levado em conta como referência a norma C 876 (ASTM, 2015) que explica como o ensaio pode ser executado e, além disso, como os dados podem ser interpretados.

Para este trabalho foi utilizado o equipamento Gecor8 que realiza teste por meio do método do eletrodo externo e fornece os valores que estão representados no quadro 5.

Quadro 5: Valores de Potencial de Corrosão

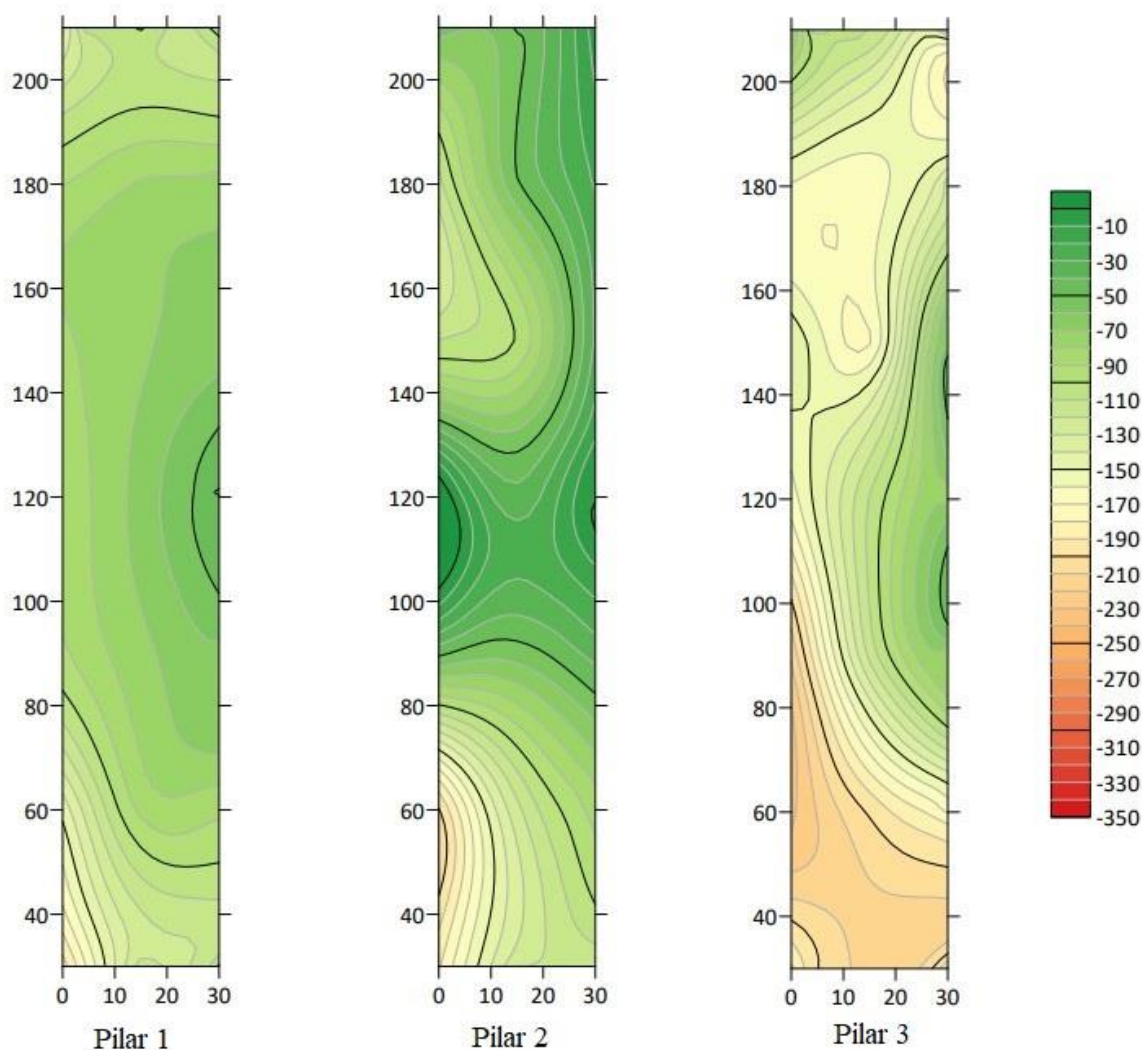
POTENCIAL DE CORROSÃO (ddp)				
	Média	Desvio	CVR	Probabilidade de corrosão
Pilar 1	-83,13	17,7265	21,30%	Menor de 10%
Pilar 2	-51,44	45,65	88,74%	Menor de 10%
Pilar 3	-149,47	43,47	29,08%	Menor de 10%

Fonte: Autor

Os três pilares foram categorizados com base na média dos valores de potencial de corrosão, seguindo a mesma norma mencionada anteriormente.

Conforme observado no quadro 5, de acordo com a classificação da norma C 876 (ASTM, 2015), nenhum dos três pilares apresentou um valor significativo em sua média, todos foram classificados com probabilidade de corrosão inferior a 10%. No entanto, é importante ressaltar que, ao contrário do que se esperava, o valor médio do potencial de corrosão do segundo pilar foi o mais alto entre os três. Ao mesmo tempo, o desvio padrão foi o mais elevado, indicando uma considerável variação entre os valores dos ensaios para este pilar. A figura 16 apresenta o mapeamento dos valores de potencial de corrosão ao longo das 3 estruturas.

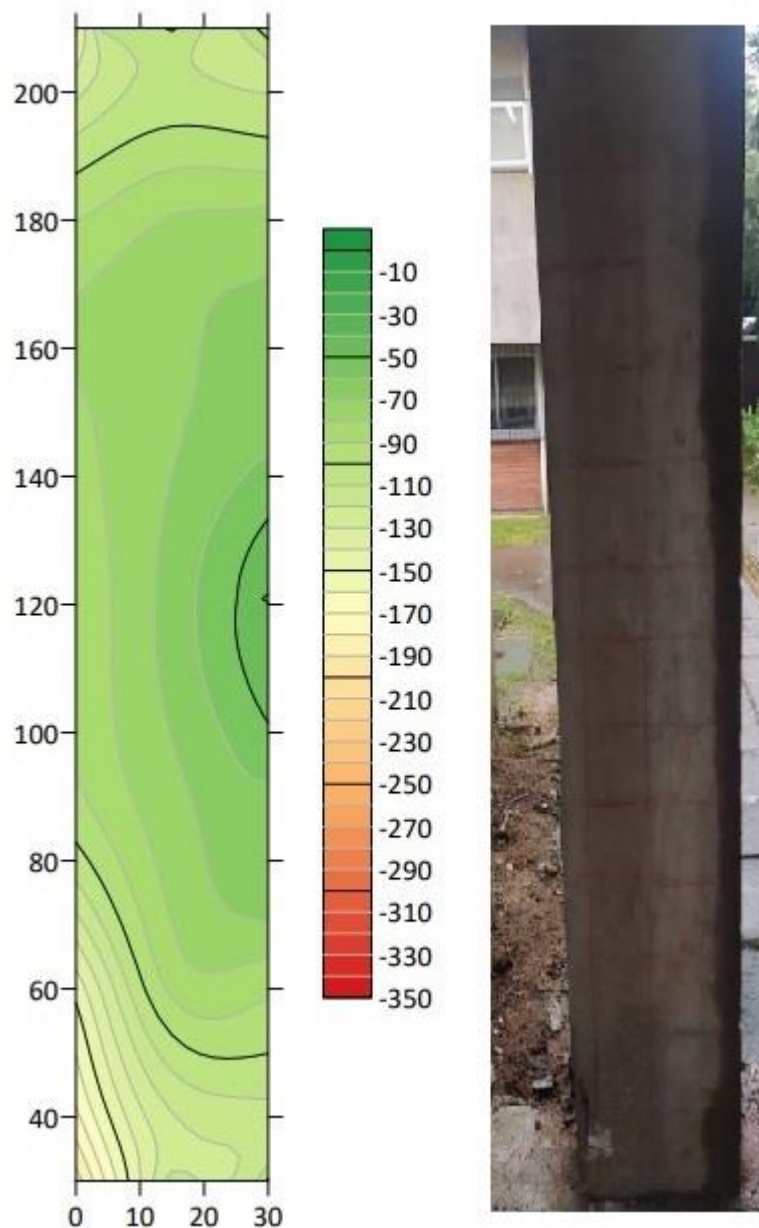
Figura 136: Mapeamento dos valores de potencial de corrosão, distância em centímetros.



Fonte: Autor

Avaliando o mapeamento dos pilares separadamente e, além disso, comparando com as fotografias dos ensaios, é possível executar uma análise comparativa das faces de cada estrutura. A figura 17 mostra o pilar 1 acompanhado das curvas de nível adjacentes. Isso revela que o ensaio de potencial de corrosão se apresentou de forma bastante uniforme em toda a superfície, sem variações significativas ao longo da sua estrutura. Esse resultado estava de acordo com as expectativas, uma vez que a coluna 1 não exhibe grandes flutuações de umidade ou evidências visíveis de problemas patológicos. Vale destacar que a parte direita do pilar parece mais escura devido à chuva que ocorreu no dia do ensaio, o que dá à superfície do pilar uma aparência úmida.

Figura 147: Comparação entre os resultados de potencial de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 1



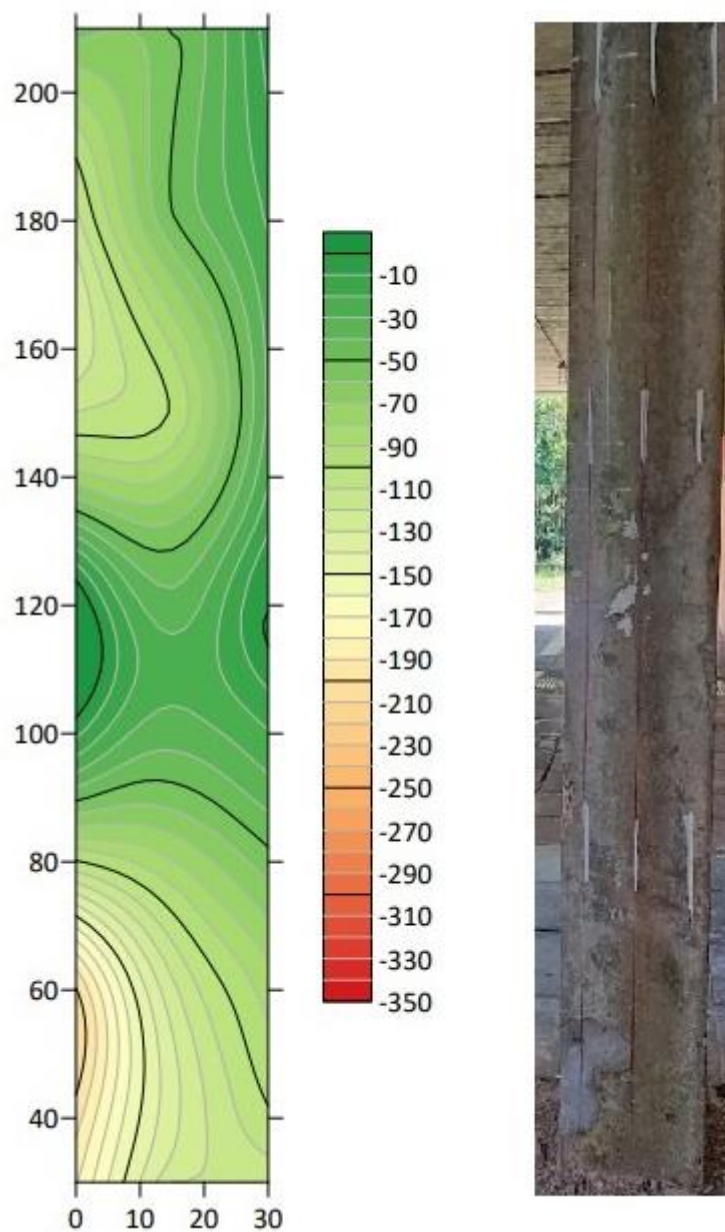
Fonte: Autor

Na figura 18, é apresentada uma comparação semelhante para o Pilar 2. Observa-se que nas proximidades da área onde houve o reparo com argamassa, na parte inferior esquerda, os valores do potencial de corrosão foram os mais baixos detectados em toda a estrutura, sugerindo um possível avanço ligeiramente maior do processo de corrosão nessa região da coluna em relação às demais. No entanto, de forma geral, mesmo com uma umidade aparente maior em



comparação com o pilar anterior, os resultados permaneceram consistentes ao longo de toda a estrutura.

Figura 158: Comparação entre os resultados de potencial de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 2

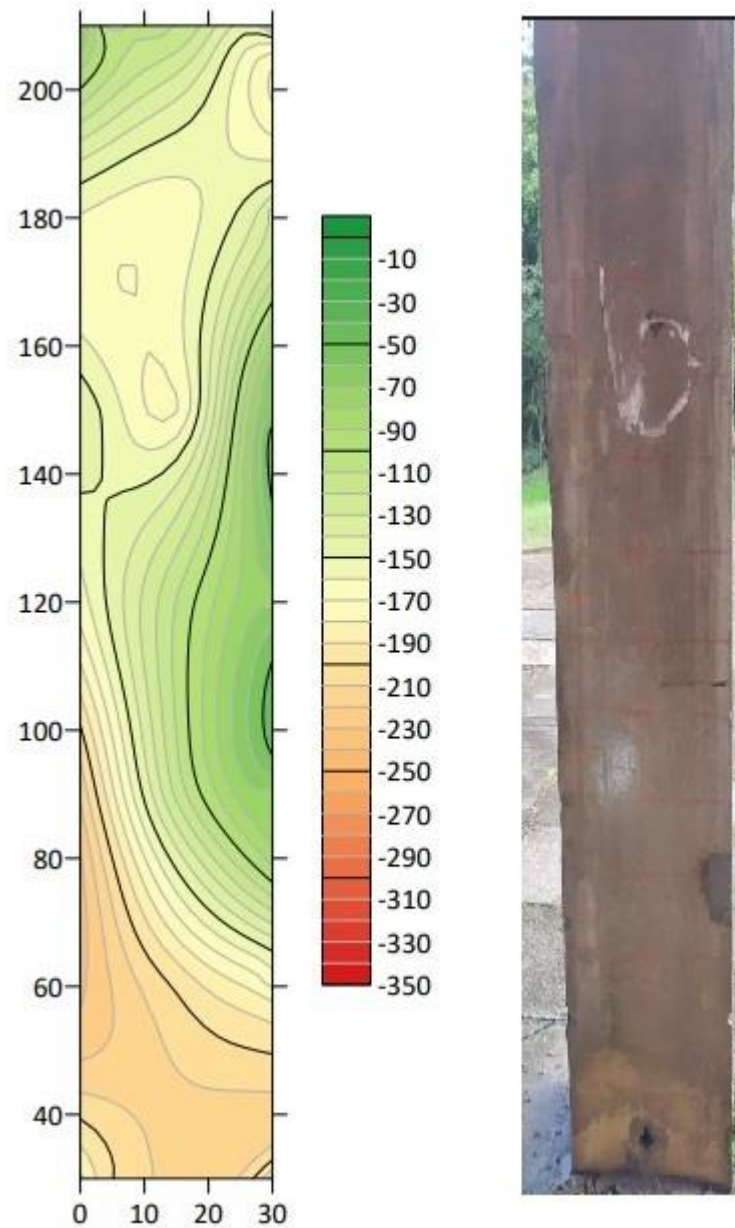


Fonte: Autor

Para o pilar número 3, na figura 19, também é apresentada essa comparação entre o mapeamento e a fotografia. Neste caso, é notável que os valores do potencial de corrosão foram mais baixos

próximos à base, possivelmente devido à presença de um pequeno ponto onde a armadura está exposta. Além disso, ao longo da estrutura, é possível perceber que os valores do potencial de corrosão permaneceram consistentemente abaixo de  $-100\text{mA}$ , indicando um avanço mais significativo no processo de corrosão em comparação com os pilares anteriores.

Figura 169: Comparação entre os resultados de potencial de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 3



Fonte: Autor

### 4.3 TAXA DE CORROSÃO

Para realizar o levantamento dos dados de taxa de corrosão, o equipamento utiliza o método de resistência à polarização, com isso, é possível determinar quais seriam os valores para a densidade de corrosão ( $I_{corr}$ ) e, com isso, como demonstrado no capítulo 2.3.4 desta pesquisa, é possível mensurar qual a probabilidade de corrosão das armaduras.

Para categorizar a corrosão das colunas com base na taxa de corrosão, foram empregadas as médias dos ensaios de cada uma delas, como representado no Quadro 6. Os valores de taxa de corrosão correspondentes a cada coluna podem ser consultados nos apêndices A, B e C deste documento.

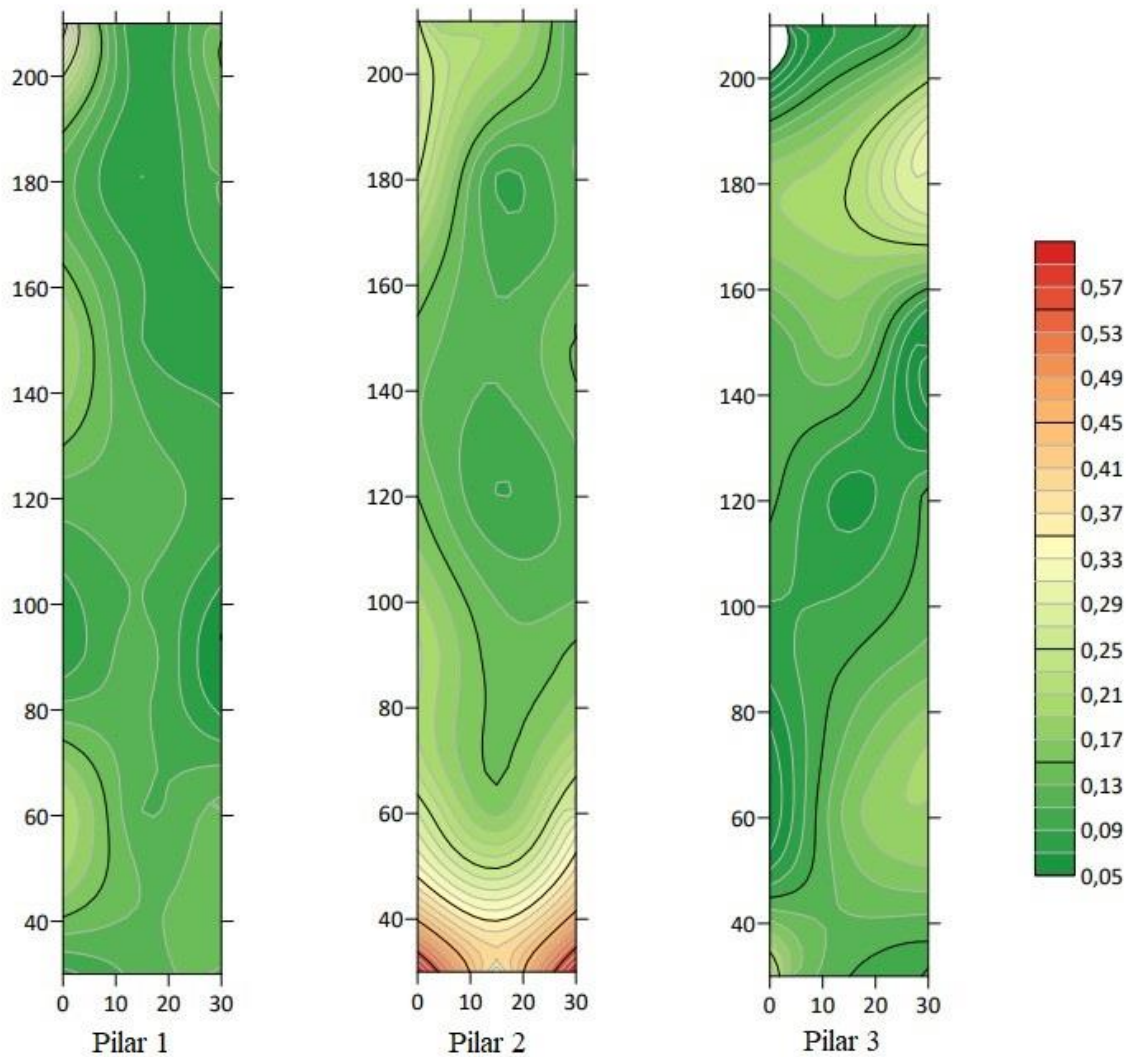
Quadro 6: Valores de Taxa de corrosão

TAXA DE CORROSÃO				
	Média	Desvio	CVR	Probabilidade de corrosão
Pilar 1	0,115	0,033	28,69%	Baixo
Pilar 2	0,15	0,064	42,66%	Baixo
Pilar 3	0,125	0,055	44,00%	Baixo

Fonte: Autor

Como pode ser visto no quadro 6, a média dos valores de taxa de corrosão foram muito parecidos para cada pilar, possuindo a mesma probabilidade de corrosão para todos, da mesma forma que aconteceu com o potencial de corrosão. Vale ressaltar que, ao contrário do ensaio de potencial de corrosão, neste caso a média do valor da taxa de corrosão foi igual dentre os três, com pequena diferença para o pilar número 2, que apresentou o valor mais alto. Mesmo que essa diferença não seja muito grande, é possível identificar que, para este caso, os três pilares, independentes de suas características externas, em média, se comportaram da mesma forma. Ainda assim, os valores do desvio padrão foram bem diferentes, demonstrando que apesar da média ser muito parecida, em alguns pontos há variação entre os valores, podendo possuir mais ou menos corrosão. A figura 20 apresenta o mapeamento dos valores de taxa de corrosão ao longo dos pilares analisados.

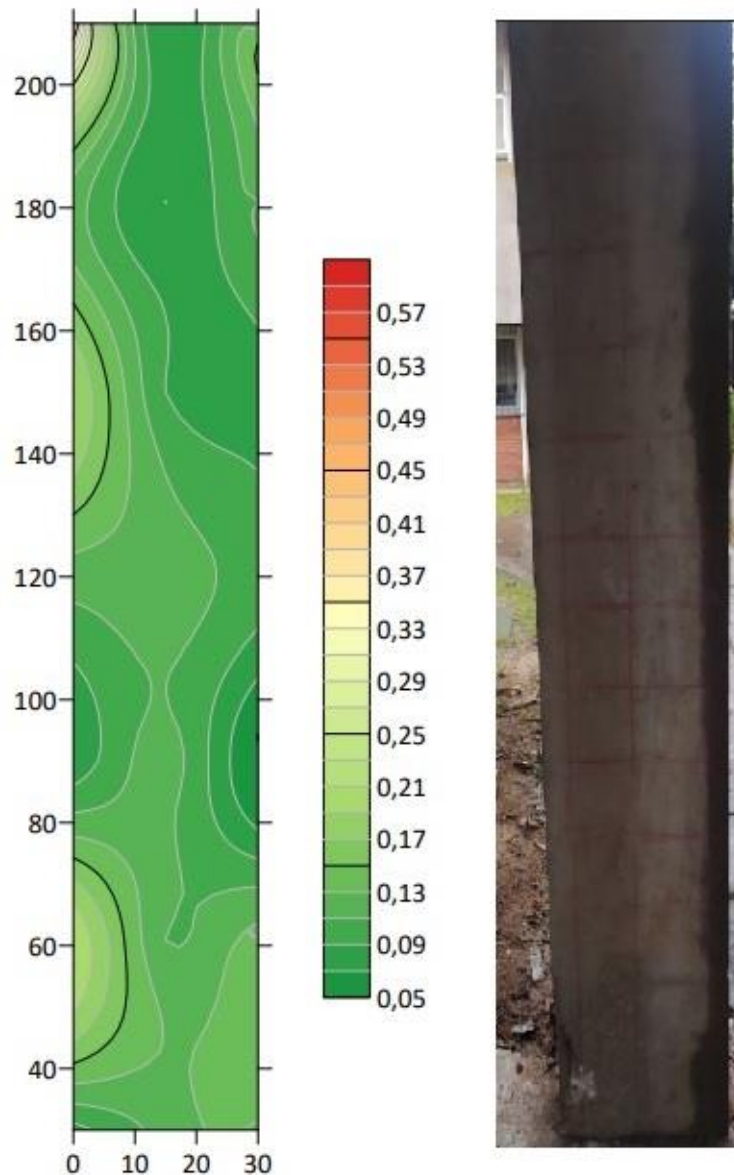
Figura 20: Mapeamento da taxa de corrosão, distancia em centímetros



Fonte: Autor

Para a taxa de corrosão, foi realizada uma comparação semelhante àquela feita anteriormente com os resultados do potencial de corrosão. Portanto, a figura 21 apresenta a relação entre os dados obtidos por meio do ensaio e a fotografia capturada no dia. No caso do pilar 1, os resultados dos valores de taxa de corrosão se assemelharam bastante aos do ensaio anterior, mantendo-se homogêneo ao longo da superfície analisada. Como mencionado anteriormente, isso provavelmente ocorre devido à ausência de elevadas umidades aparentes ou manifestações patológicas na coluna 1.

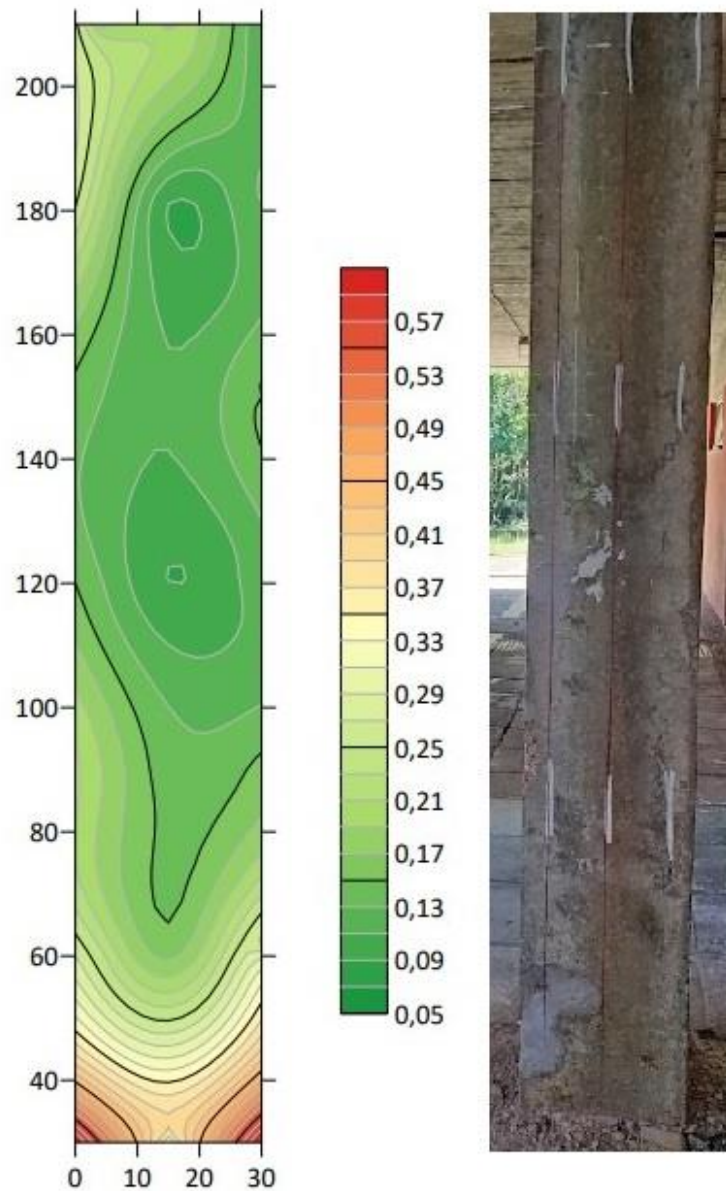
Figura 21: Comparação entre os resultados de taxa de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 1



Fonte: Autor

No caso do pilar número 2, conforme ilustrado na figura 22, foram registrados os valores mais elevados de taxa de corrosão entre as três superfícies analisadas. Isso sugere que a base desse pilar pode estar passando por um processo de corrosão ligeiramente mais avançado, como também indicado pelo ensaio de potencial de corrosão. Isso pode estar acontecendo devida a alta umidade do local e, além disso, ao reforço realizado com argamassa. Entretanto, de modo geral, os resultados de taxa de corrosão se mantiveram parecidos a partir de 60 centímetros do solo.

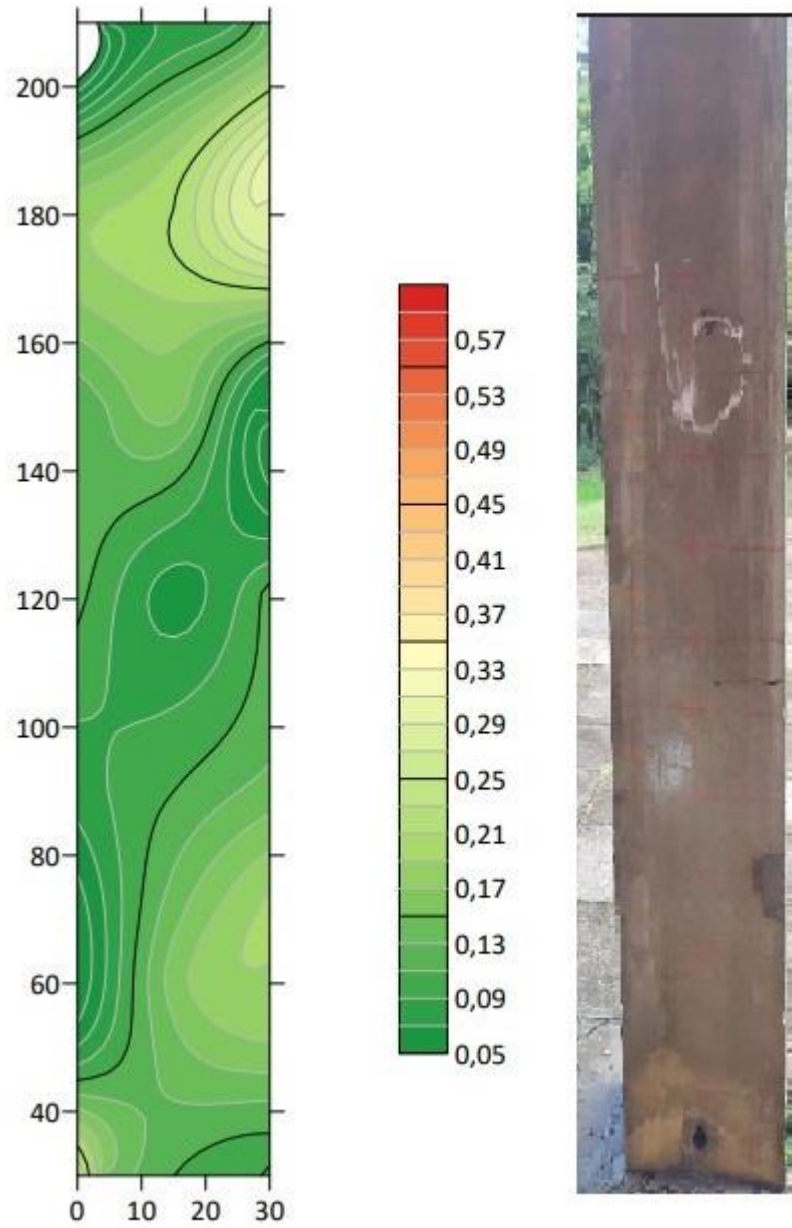
Figura 172: Comparação entre os resultados de taxa de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 2



Fonte: Autor

No caso do pilar número 3, como demonstra a figura 23, ao contrário do teste de potencial de corrosão, os valores de taxa de corrosão se mantiveram baixos e homogêneos ao longo da estrutura. Demonstrando que mesmo com os menores valores de potencial de corrosão estando próximo a base, a taxa de corrosão se manteve baixa. Isso pode ser explicado porque o ensaio de corrosão demonstra, com valores de diferença de potencial, quais seriam as probabilidades de corrosão daquela região, já a taxa de corrosão, a velocidade com que o metal está corroendo.

Figura 183: Comparação entre os resultados de taxa de corrosão e imagem no dia do ensaio para o pilar 3



Fonte: Autor

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo será realizada a conclusão a respeito da pesquisa que foi executada. Essa análise será formulada com base nos resultados dos ensaios produzidos, e será efetuado um comparativo com os objetivos definidos no início da pesquisa. Adicionalmente, serão apresentados potenciais sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÃO

A partir da análise dos dados obtidos através dos ensaios, foi possível identificar algumas informações que valem a pena serem citadas em relação aos pilares analisados. Inicialmente, constatou-se que os ensaios conduzidos oferecem uma boa alternativa para avaliar o estado atual das armaduras que compõem uma estrutura, neste caso, pilares. Pois, através desses testes, é viável detectar, não apenas a corrosão em pontos específicos, mas também avaliar o estado geral da estrutura. Isso elimina a necessidade de coletar amostras para análises laboratoriais, tornando possível realizar os ensaios de maneira conveniente no próprio local onde estão instaladas as armaduras.

Um dos objetivos do trabalho era realizar um comparativo entre os pilares que seriam estudados. Para isso, como já foi dito anteriormente, foram escolhidos pilares com diferentes características externas, mas de um mesmo ambiente, que seriam testados e avaliados perante a probabilidade de corrosão de cada um.

Após a realização dos ensaios e, ao contrário do que era esperado, concluiu-se que todos os pilares apresentaram, em média, valores muito parecidos e características muito semelhantes. Obviamente, o pilar que estava com manifestações patológicas mais visíveis, ou seja, o pilar 3, foi o que apresentou os valores mais altos de potencial de corrosão e taxa de corrosão. Entretanto, vale ressaltar que, de um modo geral, todos os pilares possuem probabilidade de corrosão de suas armaduras internas baixas. Isso mostra que, em caso de corrosão exposta em alguma estrutura, todo o conjunto deve ser avaliado para determinar se há a possibilidade de manifestações patológicas estarem acontecendo na parte interna, principalmente aquelas causadas por carbonatação ou por ação de cloretos livres. Afinal, a estrutura como um todo pode estar sujeita a ações do mesmo ambiente.



## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão desta pesquisa, alguns itens podem ser destacados para futuros trabalhos que terão como base o mesmo assunto:

- a) Aumento do escopo de ensaios que podem ser realizados para uma melhor confiabilidade dos resultados, por exemplo, utilizando valores de resistividade elétrica e identificação de cloretos livres por nitrato de prata, alternativas disponíveis para avaliação que foram citadas no trabalho, mas não utilizadas durante a pesquisa.
- b) Nesta pesquisa todos os pilares estudados possuíam a mesma idade, por isso, seria interessante avaliar estruturas que possuísem tempo de vida diferentes.
- c) Também é sugerido que fossem realizados ensaios com estruturas protegidas e outras não protegidas, comparando os resultados.
- d) Levantamento de custo para ensaios envolvendo métodos destrutivos e métodos não destrutivos.

## REFERÊNCIAS

- ABENDI - Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção.** Disponível em: <https://www.abendi.org.br/>. Acesso em 13 de setembro de 2023.
- ANDRADE, C. **Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras.** Madrid: CSIC/IETcc, 1988.
- ASTM C876-15, **Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. **Infrared thermography applications in the study of building hygrothermal behaviour.** CIB W40 Meeting, Caledonian University, Glasgow, 2004.
- CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas.** São Paulo: Pini, 1997.
- CPC-18 **Measurement of hardened concrete carbonation depth.** Materials and Structures 21, 453–455 (1988).
- DIN EN 14630 - **Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete, Structures - Test Methods - Determination of Carbonation Depth in Hardened Concrete by the Phenolphthalein Method.** Deutsches Institut für Normung. Berlin, 2007.
- DYER, Thomas. **Durabilidade do Concreto.** Rio de Janeiro. Ed Ciência Moderna. Rio de Janeiro. 2015.
- FIGUEIREDO, E.P.; MEIRA, G. Corrosão das armaduras de concreto, Boletín Técnico Alcomat internacional 6, 2013.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão. 6. ed.** Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. Fundamentos da física. Eletromagnetismo. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- HELENE, Paulo R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993
- JÚNIOR, C.M. **Deterioração de elementos de cobertura em concreto armado: diagnóstico com enfoque na corrosão de armaduras.** 2013. Trabalho de Conclusão de Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.
- LENCIONI, Julia Wippich. **Estudos sobre resistividade elétrica superficial em concreto: análise e quantificação de parâmetros intervenientes nos ensaios.** 2011. 262f. Tese de doutorado em Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos

MEDEIROS, M. H. F.; RÉUS, G. C.; PONTES, C. V., **Nitrato de prata como método colorimétrico para detecção da penetração de cloretos: análise crítica**. 3º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (3º SPPC), artigo 3SPPC1017, pp. 186 – 197, 2018. DOI: 10.4322/2526-7248.017

Meira, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção** / Gibson Rocha Meira. – João Pessoa : IFPB, 2017

MORAES, Ana Carolina Lamego. **Recorrência de patologias em processos de ataque via cloreto em concreto armado**. 2012. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman Cia Editora Ltda., 2016. 912 p.

POSSAN, Edna. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. 2010. Tese de doutorado (Doutorado em engenharia). Escola de Engenharia, Programa de pós-graduação em engenharia civil, UFRGS, Porto Alegre.

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

RILEM TC 154 – EMC: **Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete**, Vol. 40, abril, 2007.

SWAMY, R. N. **Corrosion of steel in concrete**. The Indian Concrete Journal. April, 2000.

TORRES, A.S. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma Meta-análise**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

## APÊNDICE A – Valores de ensaio do pilar 1

PILAR 1		
Diâmetro do aço	12,5	mm
Cobrimento Lado A	23,61	mm
Carbonatação Lado A		
Ponto 1	13,46	mm
Ponto 2	14,04	mm
Ponto 3	11,75	mm
Carbonatação Média Lado A	13,09	mm
Cobrimento Lado B	27,6	mm
Carbonatação Lado B		
Ponto 1	16,89	mm
Ponto 2	14,31	mm
Ponto 3	18,74	mm
Cobrimento Médio	25,605	mm

Valores medidos de Potencial de Corrosão e Taxa de Corrosão para o pilar 1, começando da esquerda para a direita descrevendo as barras como A, B e C		
	Taxa de Corrosão	Potencial de Corrosão
Barra A Ponto 1	-	-
Barra A Ponto 2	0,18	-125,56
Barra A Ponto 3	0,09	-85,2
Barra A Ponto 4	0,12	-81,27
Barra A Ponto 5	0,16	-78,25
Barra A Ponto 6	0,1	-87,76
Barra A Ponto 7	0,19	-106,38
Barra B Ponto 1	0,12	-113,43
Barra B Ponto 2	0,11	-86,29
Barra B Ponto 3	0,12	-73,19
Barra B Ponto 4	0,12	-66,08
Barra B Ponto 5	0,09	-71,5
Barra B Ponto 6	0,07	-80,14
Barra B Ponto 7	0,08	-97,94
Barra C Ponto 1	0,12	-97,81
Barra C Ponto 2	0,13	-84,99
Barra C Ponto 3	0,06	-63,98
Barra C Ponto 4	0,1	-51,62
Barra C Ponto 5	0,09	-66,69
Barra C Ponto 6	0,11	-76,52
Barra C Ponto 7	0,12	-87,89
Média	0,115	-83,13
Desvio	0,033150375	17,72655649

## APÊNDICE B – Valores de ensaio do pilar 2

PILAR 2				
Diâmetro do aço	12,5	mm	No caso do Pilar 2 foi realizado teste de carbonatação, porém o mesmo apresentou valores extremamente baixos, aproximadamente 2mm	
Cobrimento Lado A	24,82	mm		
Carbonatação Lado A				
Ponto 1				
Ponto 2				
Ponto 3				
Carbonatação Média Lado A				
Cobrimento Lado B	26,6	mm		
Carbonatação Lado B				
Ponto 1		mm		
Ponto 2		mm		
Ponto 3		mm		
Cobrimento Médio	25,71	mm		
Valores medidos de Potencial de Corrosão, Resistividade Elétrica e Taxa de Corrosão para o pilar 2, começando da esquerda para a direita descrevendo as barras como A, B e C				
	Taxa de Corrosão	Potencial de Corrosão		
Barra A Ponto 1	-			
Barra A Ponto 2	0,23	-173,06		
Barra A Ponto 3	0,19	-51,44		
Barra A Ponto 4	0,13	-9,5		
Barra A Ponto 5	0,13	-105,95		
Barra A Ponto 6	0,2	-91,4		
Barra A Ponto 7	0,18	-57,95		
Barra B Ponto 1	0,35	-119,73		
Barra B Ponto 2	0,16	-121,96		
Barra B Ponto 3	0,14	-55,35		
Barra B Ponto 4	0,09	-38,01		
Barra B Ponto 5	0,11	-99,01		
Barra B Ponto 6	0,09	-50,72		
Barra B Ponto 7	0,18	-47,92		
Barra C Ponto 1	-			
Barra C Ponto 2	0,27	-80,66		
Barra C Ponto 3	0,16	-37,97		
Barra C Ponto 4	0,13	-6,44		
Barra C Ponto 5	0,15	-28,73		
Barra C Ponto 6	0,13	-18,37		
Barra C Ponto 7	0,11	-4,92		
Média	0,15	-51,44		
Desvio	0,064495342	44,43511568		

### APÊNDICE C – Valores de ensaio do pilar 3

PILAR 3		
Diâmetro do aço	12,5	mm
Cobrimento Lado A	26,33	mm
Carbonatação Lado A		
Ponto 1	11,3	
Ponto 2	7,39	
Ponto 3	12,96	
Carbonatação Média Lado A	10,55	
Cobrimento Lado B	22,5	mm
Carbonatação Lado B		
Ponto 1	11,73	mm
Ponto 2	15,57	mm
Ponto 3	12,68	mm
Cobrimento Médio	24,415	mm

Valores medidos de Potencial de Corrosão e Taxa de Corrosão para o pilar 3, começando da esquerda para a direita descrevendo as barras como A, B e C		
	Taxa de Corrosão	Potencial de Corrosão
Barra A Ponto 1	0,15	-196,71
Barra A Ponto 2	0,07	-219,63
Barra A Ponto 3	0,09	-185,98
Barra A Ponto 4	0,1	-147,44
Barra A Ponto 5	0,13	-151,5
Barra A Ponto 6	0,19	-162,02
Barra A Ponto 7	0,05	-111,45
Barra B Ponto 1	-	-
Barra B Ponto 2	0,16	-197,17
Barra B Ponto 3	0,11	-117,43
Barra B Ponto 4	0,06	-110,5
Barra B Ponto 5	0,16	-170,86
Barra B Ponto 6	0,21	-164,97
Barra B Ponto 7	0,09	-110,71
Barra C Ponto 1	0,12	-174,04
Barra C Ponto 2	0,18	-163,04
Barra C Ponto 3	0,14	-78,38
Barra C Ponto 4	0,12	-77,99
Barra C Ponto 5	0,06	-64,24
Barra C Ponto 6	0,27	-126,18
Barra C Ponto 7	0,14	-120,85
Média	0,125	-149,47
Desvio	0,055724888	43,370574