

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil*

**MONITORAMENTO DE CORROSÃO POR POTENCIAL DE  
CIRCUITO ABERTO EM ARMADURAS EMBUTIDAS EM  
CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA**

**Thiago Alex Hemkemeier**

São Carlos - SP

2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil*

**MONITORAMENTO DE CORROSÃO POR POTENCIAL DE  
CIRCUITO ABERTO EM ARMADURAS EMBUTIDAS EM  
CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA**

**Thiago Alex Hemkemeier**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como um dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil

**Orientador:** Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos - SP

2021



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Thiago Alex Hemkemeier, realizada em 19/05/2021.

#### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Almir Sales (UFSCar)

Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro (EESC/USP)

Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga (UFSCar)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Dedico esta dissertação aos meus pais, Martinho Aloisio Hemkemeier e Solange Maria Hemkemeier que sempre incentivaram e forneceram suporte ao meu desenvolvimento educacional e profissional.

# Agradecimentos

A Deus por todas as bênçãos, força e proteção.

Aos meus pais, Martinho Aloisio Hemkemeier e Solange Maria Hemkemeier, por sempre estarem presentes e auxiliarem na busca por minhas conquistas.

Aos meus irmãos, Tharynn Alessandra Hemkemeier e Gustavo Alexandre Hemkemeier, meus melhores amigos, pela parceria nos momentos de descontração.

À minha noiva Patricia Trevisani Juchen, por seu incentivo, companheirismo e paciência. E por estar ao meu lado, unindo forças para enfrentarmos as dificuldades e ultrapassarmos todos os obstáculos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Almir Sales, pela amizade, por todos os ensinamentos, disponibilidade e compreensão. E por toda dedicação e orientação para conseguirmos concretizar um bom trabalho diante das dificuldades enfrentadas.

Ao técnico José Roberto, pela amizade e por todo apoio durante o desenvolvimento dos experimentos.

Às colegas Mariana Motta Rezende e Carla Signori Dal Ri pela amizade, auxílio no desenvolvimento dos ensaios laboratoriais e por toda contribuição intelectual.

Aos Professores membros da banca examinadora por todos os conselhos, sugestões e correções desde a qualificação até a defesa.

À Universidade Federal de São Carlos e aos Professores do PPGECiv pela contribuição com meu desenvolvimento profissional.

Aos responsáveis pelo Laboratório de Materiais e Componentes que forneceram toda estrutura para a realização dos ensaios laboratoriais.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecimentos à CAPES pelo suporte financeiro.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

*“Se você só estiver disposto a realizar o que é fácil, a vida será difícil. Mas se concordar em fazer o que é difícil, a vida será fácil.”*

(T. Harv Eker)

# Resumo

HEMKEMEIER, T. A. **Monitoramento de corrosão por potencial de circuito aberto em armaduras embutidas em corpos de prova de argamassa**. 2021. 125f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2021.

A corrosão é um dos principais problemas que afetam a vida útil das estruturas de concreto armado. Para reduzir esse problema é importante realizar manutenções periódicas nas edificações. Existem diversas técnicas de monitoramento da corrosão e uma das mais utilizadas é a técnica de potencial de circuito aberto (PCA). Porém, essa técnica possui parâmetros experimentais que podem influenciar seus resultados. Por exemplo, a utilização de ciclos de molhagem e secagem, a utilização de diferentes tipos de eletrodo de referência, e a imersão total e parcial na solução de cloreto de sódio (NaCl). Com isso, o presente estudo visou avaliar alguns parâmetros dessa técnica e analisar influência deles nos resultados, de modo a gerar informações ao meio técnico e científico sobre o comportamento das barras de aço diante de diferentes situações durante o ensaio de PCA. O principal intuito da pesquisa foi avaliar a técnica de PCA, porém foram utilizados diferentes traços, com a incorporação de resíduos em substituição parcial ao agregado miúdo, tendo como objetivo avaliar o desempenho desses traços diante da exposição aos cloretos e verificar se a técnica de PCA é aplicável a argamassas com a incorporação de resíduos. Os traços utilizados foram o convencional (REF), com a incorporação de lodo de estação de tratamento de água (LETA) e com a incorporação de areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC). Com o presente estudo, foi possível concluir que a melhor combinação para obter resultados de PCA mais rapidamente é com a realização de ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial dos corpos de prova na solução de NaCl. Concluiu-se também que a técnica de PCA é aplicável em matrizes cimentícias com a incorporação de resíduos. As argamassas com a incorporação de LETA e ACBC forneceram ambiente com maior proteção para as barras de aço em virtude de que apresentaram probabilidade de corrosão mais tardia se comparados aos corpos de prova de argamassa convencional.

**Palavras-chave:** técnica eletroquímica, corrosão, potencial de circuito aberto.

# Abstract

HEMKEMEIER, T. A. **Corrosion monitoring by open circuit potential in reinforcement embedded in mortar specimens.** 2021. 125f. Dissertation (Master degree). Federal University of São Carlos. São Carlos, 2021.

Corrosion is one of the main problems affecting the service life of reinforced concrete structures. To reduce this problem, it is critical to perform periodic maintenance on buildings. There are several corrosion monitoring techniques, and one of the most used is the open circuit potential technique (OCP). However, this technique has experimental parameters that can influence its results. For instance, the use of wetting and drying cycles, the use of different types of the reference electrode, and total and partial immersion in sodium chloride solution (NaCl). Thereby, this study aimed to evaluate some parameters of this technique and analyze their influence on the results, to generate information to the technical and scientific environment about the behavior of steel bars in different situations during the OCP test. The main purpose of the research was to evaluate the OCP technique, but different mixes design were used, with the incorporation of wastes to replace partially the aggregate, to evaluate the performance of these mixes design in exposure to chlorides and check if the OCP technique applies to mortars with the incorporation of wastes. The mixes design used were the normal (NOR), with the incorporation of water treatment plant sludge (WTPS), and with the incorporation of sugarcane bagasse ash sand (SBAS). With this study, it was possible to conclude that the best combination to obtain OCP results more quickly is with wetting and drying cycles and partial immersion of the specimens in the NaCl solution. It was also concluded that the OCP technique is applicable in cementitious matrices with the incorporation of wastes. Mortars with the incorporation of WTPS and SBAS provided an environment with higher protection for steel bars because they showed a later corrosion probability when compared to normal mortar specimens.

**Keywords:** electrochemical technique, corrosion, open circuit potential.



## Lista de figuras

Figura 1 - Representação esquemática do avanço da carbonatação .....	23
Figura 2 - Perfil típico de concentração de cloretos ao longo do revestimento .....	25
Figura 3 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982).....	28
Figura 4 – Representação de uma pilha eletroquímica no concreto armado .....	29
Figura 5 - Representação esquemática para medir o potencial de corrosão .....	32
Figura 6 - Etapas de coleta e preparação do LETA onde: a) LETA na estação; b) LETA antes da secagem; c) LETA após a secagem em estufa; e d) Moagem dos torrões de LETA .....	40
Figura 7 - Programa experimental.....	45
Figura 8 - Eletrodo de referência de calomelano saturado.....	48
Figura 9 - Procedimento de limpeza das barras de aço (a) início (b) final .....	51
Figura 10 - Célula eletroquímica montada (a) e medição dos potenciais (b) .....	52
Figura 11 - Molde para pintura das barras com fita isolante líquida .....	53
Figura 12 - Modelo com delimitações das áreas isoladas da barra (mm) .....	53
Figura 13 - Avaliação dos revestimentos .....	54
Figura 14 - Processo de mistura na argamassadeira.....	56
Figura 15 - Molde para corpo de prova prismático .....	56
Figura 16 - Posicionamento das barras de aço no corpo de prova (mm).....	57
Figura 17 - Procedimento de montagem do contato elétrico.....	58
Figura 18 - Medição de PCA utilizando multímetro de alta impedância .....	60
Figura 19 - Moldagem de corpos de prova cilíndricos.....	63
Figura 20 - Câmara de carbonatação com corpos de prova .....	64
Figura 21 - Rompimento dos CPs e aferição de profundidade de carbonatação .....	65
Figura 22 - Corpos de prova em estufa ( $50 \pm 5$ °C).....	67
Figura 23 – Corpos de prova após aplicação da solução de nitrato de prata.....	68

Figura 24 – Localização da ranhura da barra de aço analisada.....	71
Figura 25 - Microscopia para avaliação de limpeza (1000x): a) Material sem limpeza; b) Material após aplicação de acetona; c) Material após limpeza completa.....	72
Figura 26 - Extremidades da barra de aço (1000x) .....	73
Figura 27 - Comparação entre revestimentos das barras de aço: a) Totalmente exposta; b) Totalmente revestida (resina epóxi); c) Revestida parcialmente (resina epóxi); d) Revestida parcialmente (fita isolante líquida); e e) Revestida totalmente (fita isolante líquida) .....	74
Figura 28 - Comparação dos revestimentos das barras revestidos parcialmente: a) antes da remoção da fita isolante líquida; b) após a remoção da fita isolante líquida .....	75
Figura 29 - Comparação entre barra totalmente exposta e isolada (fita isolante) .....	76
Figura 30 - Contato elétrico antigo (a) e atual (b).....	78
Figura 31 - Isolamento preliminar (a) e isolamento utilizado (b).....	79
Figura 32 - Comparação entre resultados de ensaios com multímetro (a) e Arduino (b) .....	80
Figura 33 - Potenciais medidos durante o semiciclo de molhagem em REF (a), LETA (b) e ACBC (c).....	82
Figura 34 - Potenciais medidos com eletrodos de referência de ECS (a), Hg/HgO (b) e Hg/HgO convertidos para ECS com ECS (c) .....	85
Figura 35 - Resultados de potenciais ao longo da cura úmida dos CPs (REF).....	87
Figura 36 - Resultados dos ensaios de PCA com (a) e sem ciclos (b) de molhagem e secagem.....	90
Figura 37 - Ensaio de PCA com imersão parcial (a) e total (b) (com ciclos).....	92
Figura 38 - Resultados de PCA para REF, LETA e ACBC, considerando (a) imersão parcial e (b) imersão total dos corpos de prova.....	94
Figura 39 - Barras de aço após ensaio de PCA: a) após ensaio com ciclos; e b) após ensaio sem ciclos de molhagem e secagem.....	97
Figura 40 - Variação da massa dos corpos de prova no ensaio de PCA .....	98

Figura 41 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo (dias)	100
Figura 42 - Curvas de tendência de evolução da carbonatação .....	102
Figura 43 - Tipos de imersão logo após aplicação da solução indicadora .....	106
Figura 44 - Tendência de evolução da penetração de cloretos das argamassas sem ciclos e imersão total (a) e com ciclos e imersão parcial (b) .....	110

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Probabilidade de corrosão em função dos valores de PCA .....	33
Tabela 2 - Estudos que utilizaram as técnicas de PCA.....	35
Tabela 3 - Traço em massa estabelecido por Moretti (2018) e Souza (2006).....	44
Tabela 4 - Sequência de mistura da argamassa .....	55
Tabela 5 - Probabilidade de corrosão em função dos valores de PCA (Hg/HgO) .....	61
Tabela 6 - Probabilidade de corrosão em função dos valores de PCA (ECS) .....	62
Tabela 7 - Caracterização química do aço (%) .....	69
Tabela 8 - Potenciais aferidos das barras de aço .....	70
Tabela 9 - Intervalos de potenciais convertidos (eletrodos de ECS e Hg/HgO) .....	84
Tabela 10 - Profundidade de carbonatação das argamassas .....	101
Tabela 11 - Resultados de Valor-P, F e F críticos da ANOVA (Carbonatação) .....	103
Tabela 12 - Teste de Tukey para as médias das profundidades de carbonatação .	104
Tabela 13 - Penetração de cloretos nas argamassas (imersão total/sem ciclos)....	107
Tabela 14 - Penetração de cloretos nas argamassas (imersão parcial/com ciclos)	108
Tabela 15 - Resultados de Valor-P, F (Sem ciclos e imersão total) .....	111
Tabela 16 - Resultados de Valor-P, F (Com ciclos e imersão parcial) .....	111
Tabela 17 - Teste T. para penetração de cloretos (Sem ciclos/imersão total) .....	112
Tabela 18 - Teste T. para penetração de cloretos (Com ciclos/imersão parcial)....	113
Tabela 19 - Caracterização físico-química do LETA que utilizado na pesquisa .....	121
Tabela 20 - Massa específica e parâmetros da granulometria da ACBC .....	122
Tabela 21 - Composição química da ACBC utilizada na pesquisa.....	122
Tabela 22 - Características físicas das areias finas utilizadas na pesquisa .....	123
Tabela 23 - Características físicas e químicas do CP V ARI utilizado na pesquisa	124
Tabela 24 - Distribuição granulométrica das areias utilizadas na pesquisa .....	125

## Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>ABNT</b>	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ACBC</b>	-	Areia da cinza de bagaço de cana-de-açúcar
<b>ACm</b>	-	Avanço de cloretos médio
<b>AgCl</b>	-	Cloreto de prata
<b>Ard</b>	-	Arduino
<b>ASTM</b>	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>c/c</b>	-	Com ciclo de molhagem e secagem
<b>C<sub>3</sub>A</b>	-	Aluminato tricálcico
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	-	Hidróxido de cálcio
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	-	Carbonato de cálcio
<b>Cl<sup>-</sup></b>	-	Íons cloreto
<b>CO<sub>2</sub></b>	-	Dióxido de carbono
<b>CP</b>	-	Corpo de prova
<b>CP V ARI</b>	-	Cimento de alta resistência inicial
<b>CuSO<sub>4</sub></b>	-	Sulfato de cobre
<b>CV</b>	-	Coeficiente de variação
<b>ECS</b>	-	Eletrodo de calomelano saturado
<b>EPH</b>	-	Eletrodo de hidrogênio padrão
<b>ER</b>	-	Eletrodo de referência
<b>H<sub>2</sub>S</b>	-	Sulfeto de hidrogênio
<b>HCl</b>	-	Ácido clorídrico
<b>HgO</b>	-	Óxido de mercúrio
<b>IP</b>	-	Imersão parcial da amostra em solução
<b>IT</b>	-	Imersão total da amostra em solução

<b>KCl</b>	- Cloreto de potássio
<b>KOH</b>	- Hidróxido de potássio
<b>LETA</b>	- Lodo de estação de tratamento de água
<b>Mul</b>	- Multímetro de alta impedância
<b>NaCl</b>	- Cloreto de sódio
<b>NOR</b>	- <i>Normal</i>
<b>PCA</b>	- Potencial de circuito aberto
<b>PCm</b>	- Profundidade de carbonatação média
<b>pH</b>	- Potencial de hidrogênio
<b>REF</b>	- Referência
<b>SBAS</b>	- <i>Sugarcane bagasse ash sand</i>
<b>s/c</b>	- Sem ciclo de molhagem e secagem
<b>SO<sub>2</sub></b>	- Dióxido de enxofre
<b>WTPS</b>	- <i>Water treatment plant sludge</i>

# Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>18</b>
1.1.1. Objetivo geral .....	18
1.1.2. Objetivos específicos.....	19
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 Estrutura da dissertação.....</b>	<b>20</b>
<b>2. Corrosão do aço em concreto .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Mecanismos de deterioração das armaduras .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 A corrosão do aço .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3 Processo eletroquímico de corrosão.....</b>	<b>28</b>
<b>3. Técnica de potencial de circuito aberto.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Pesquisas que utilizaram a técnica de PCA .....</b>	<b>34</b>
<b>4. Resíduos incorporados às argamassas .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1 Lodo de estação de tratamento de água - LETA.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Areia de cinza do bagaço de cana de açúcar - ACBC .....</b>	<b>41</b>
<b>5. Programa Experimental .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Materiais .....</b>	<b>46</b>
5.1.1. Aço CA-60 .....	47
5.1.2. Eletrodos de Referência .....	47
5.1.3. Soluções.....	49
<b>5.2 Potencial de corrosão .....</b>	<b>49</b>
5.2.1. Preparação das barras de aço .....	50
5.2.2. Moldagem dos corpos de prova .....	55
5.2.3. Potencial de circuito aberto .....	57
<b>5.3 Ensaio acelerado de carbonatação .....</b>	<b>63</b>

5.4 Ensaio de Penetração de Cloretos .....	66
<b>6. Resultados e discussão .....</b>	<b>69</b>
6.1 Caracterização química do aço .....	69
6.2 Testes preliminares para a técnica de PCA.....	70
6.2.1. Validação das barras de aço .....	70
6.2.2. Avaliação da limpeza das barras de aço .....	71
6.2.3. Revestimento das barras de aço.....	74
6.2.4. Ensaio Preliminar de PCA .....	76
6.3 Multímetro de alta impedância x Arduino.....	79
6.4 Eletrodo de Calomelano Saturado x Eletrodo de Hg/HgO .....	84
6.5 Cura úmida .....	87
6.6 Ciclos de molhagem e secagem.....	89
6.7 Imersão total x Imersão parcial das amostras em NaCl .....	91
6.8 Comparação de diferentes traços (REF, LETA e ACBC) .....	93
6.8.1. Profundidade de Carbonatação nas Argamassas .....	100
6.8.2. Penetração de Cloretos nas Argamassas .....	105
<b>7. Conclusões.....</b>	<b>114</b>
<b>8. Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>116</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>117</b>
<b>Anexo .....</b>	<b>121</b>



# 1. Introdução

A vida útil mínima de projeto de estruturas de concreto armado é de 50 anos de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013). O concreto presente nas estruturas de concreto armado é de natureza alcalina com um pH entre 12 e 13 e, com isso, proporciona um ambiente favorável para o surgimento de uma camada de óxidos que protege as armaduras embutidas no concreto (CHO *et al.*, 2016). Esta camada é denominada camada de passivação e é responsável por fornecer proteção superficial para as barras de aço. Porém, na atmosfera existem agentes que afetam a durabilidade dessas estruturas, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e os cloretos. Esses agentes são responsáveis pela degradação da camada de passivação que protege o aço.

A combinação entre o  $\text{CO}_2$  e a umidade origina a carbonatação, a qual é responsável pela deterioração do concreto armado por desestabilizar a camada de passivação do aço. Esse fenômeno faz com que ocorra a redução do pH da solução nos poros do concreto. Já os cloretos, estão presentes principalmente em ambientes marinhos, e quando estão na forma de íons livres, são os principais agentes responsáveis pela despassivação do aço e início do processo de corrosão por *píte*. Se a carbonatação atingir o concreto em contato com o aço, ou se os íons cloreto alcançarem a armadura em um valor crítico, ambos somados à presença de água e oxigênio, inicia-se o processo de corrosão.

A principal corrosão que afeta as edificações é a aquosa ou eletroquímica. Esse processo acontece quando existe uma diferença de potencial na superfície do metal, formando regiões anódicas e catódicas, ligadas por meio de um eletrólito. A corrosão eletroquímica pode ser generalizada, ao longo do comprimento, ou localizada, isto é, em uma área específica da barra. A corrosão localizada é a mais perigosa, porém ambas podem causar graves problemas às edificações.

Para que problemas relacionados à corrosão em estruturas de concreto armado sejam reduzidos, são necessárias manutenções periódicas nas edificações, visando o combate e a prevenção desse processo de degradação do aço. Existem diversas técnicas de monitoramento da corrosão, e uma das mais utilizadas é a técnica de

potencial de circuito aberto (PCA). Essa técnica pode fornecer informações preliminares importantes sobre a probabilidade de ocorrência da corrosão, para que possam ser realizadas outras técnicas para averiguar o problema quantitativamente, e complementar as informações fornecidas pela técnica de PCA. Por isso, é importante que técnicas de avaliação da corrosão sejam utilizadas em conjunto, pois algumas só fornecem informações qualitativas quanto ao estado desse fenômeno, e isso faz com que seus resultados possam ser inconclusivos se comparados as técnicas quantitativas.

A norma que padroniza a técnica de PCA é a *ASTM C876 - 15: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete* (ASTM, 2015). Essa técnica traz parâmetros que podem ser diversificados, influenciando em seus resultados.

Nesse contexto, o presente estudo visou avaliar parâmetros da técnica de potencial de circuito aberto, a fim de fornecer informações ao meio técnico e científico sobre qual a influência desses parâmetros nos resultados dos ensaios de PCA. Além disso, também teve como intuito, avaliar se a técnica é aplicável a barras de aço embutidas em diferentes traços, com a incorporação de resíduos.

## **1.1 Objetivos**

Foi estabelecido um objetivo geral para a pesquisa e para que esse objetivo fosse alcançado também foram elaborados objetivos específicos, os quais auxiliaram na obtenção de resultados que apresentaram a influência dos parâmetros estudados da técnica de PCA.

### **1.1.1. Objetivo geral**

O objetivo geral do presente trabalho foi analisar a influência de parâmetros da técnica de potencial de circuito aberto (PCA) no monitoramento de corrosão em armaduras embutidas em corpos de prova de argamassa. Para que o objetivo geral fosse concretizado, foram elaborados os objetivos específicos apresentados a seguir.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Comparar sistemas de leitura Arduino e multímetro de alta impedância;
- Comparar a utilização de diferentes tipos de eletrodos de referência na técnica de PCA;
- Analisar o comportamento dos potenciais durante a cura úmida dos corpos de prova;
- Avaliar a influência de ciclos de molhagem e secagem;
- Investigar a técnica no que tange: imersão total e parcial da amostra;
- Fornecer melhorias para os procedimentos da técnica de PCA;
- Comparar o comportamento dos potenciais de barras de aço embutidas em corpos de prova com traço convencional (REF) e com a incorporação dos resíduos (LETA e ACBC) pela técnica de PCA;
- Averiguar a profundidade de carbonatação em corpos de prova de traço convencional e com a incorporação dos resíduos (LETA e ACBC);
- Investigar a penetração de cloretos em corpos de prova de traço convencional e com a incorporação de resíduos (LETA e ACBC).

### **1.2 Justificativa**

Para garantir a segurança das edificações e evitar problemas graves relacionados a corrosão do aço em concreto armado é necessário realizar manutenções periódicas. E, para que essas manutenções sejam eficientes, é importante que seja realizado um monitoramento da corrosão, pois este é um dos principais problemas que afetam a vida útil das edificações. Além disso, por meio de técnicas de monitoramento da corrosão pode ser avaliado o comportamento do aço embutido em concreto/argamassa com adição de diferentes materiais a fim de verificar se estes melhoram o desempenho do corpo de prova frente à ação de agentes agressivos que desencadeiam a corrosão.

Uma das técnicas mais utilizadas para monitorar a corrosão é a técnica de potencial de circuito aberto (RIBEIRO; CUNHA, 2018). O método de medição do potencial de circuito aberto é empregado como uma ferramenta eletroquímica que auxilia no monitoramento da corrosão das armaduras de estruturas de concreto armado. Existem diversos parâmetros preconizados por essa norma que podem variar, e podem influenciar nos resultados da técnica, tais como: ciclo de molhagem e secagem, tipos de eletrodos de referência e imersão total ou parcial da amostra na solução. Esse leque de possibilidades permite ao pesquisador ou investigador optar pelo procedimento mais acessível ou com maior disponibilidade, porém algumas escolhas podem acarretar em um ensaio mais demorado ou até mesmo impreciso.

Portanto, visando fornecer informações para o meio técnico e científico, relacionadas à influência desses parâmetros nos resultados, a técnica de PCA foi analisada em diversas situações, variando-se os parâmetros e comparando os resultados.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Além da breve introdução, objetivos e justificativa apresentados no capítulo 1, o trabalho possui mais nove capítulos conforme apresentado a seguir.

No capítulo 2 foi elaborada uma revisão de literatura sobre a corrosão do aço em concreto armado, tratando-se dos mecanismos de deterioração das armaduras e do processo eletroquímico que envolve a corrosão.

Já no capítulo 3, foi tratado sobre a técnica de monitoramento do processo de corrosão por potencial de circuito aberto, realizando uma breve explanação sobre a sua utilização e finalidade, e apresentando alguns estudos que fizeram uso dessa técnica.

No capítulo 4, foram apresentados os resíduos incorporados aos corpos de prova substituindo, em parte, o agregado miúdo dos traços utilizados nesta pesquisa, lodo de estação de tratamento de água e areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

O capítulo 5 tratou de explicar o programa experimental seguido nesse estudo, apresentando os materiais e os métodos utilizados para a sua realização, bem como detalhou cada ensaio executado ao longo do estudo.

Após o programa experimental apresentado, no capítulo 6, foram apresentados os resultados e a discussão de cada etapa do estudo.

Em seguida, no capítulo 7, foram apresentadas as conclusões e contribuições do presente estudo, elencando os resultados mais importantes para o meio técnico e científico.

Já no capítulo 8, foram apresentadas as sugestões para trabalhos futuros relacionadas ao tema abordado nesta pesquisa.

Por fim, foram apresentadas as referências bibliográficas seguidas dos anexos que contém dados que auxiliaram no desenvolvimento do presente estudo.

## 2. Corrosão do aço em concreto

Este capítulo apresenta um breve estudo sobre mecanismos de deterioração das armaduras em concreto, corrosão do aço e o processo eletroquímico que a envolve.

### 2.1 Mecanismos de deterioração das armaduras

Um dos principais problemas que afetam a vida útil das estruturas de concreto armado são os agentes agressivos presentes no ambiente. Além disso, a vida útil mínima de projeto de estruturas de concreto armado é de 50 anos (ABNT, 2013). No entanto, durante sua construção, se não forem bem executadas, podem não apresentar proteção adequada contra ataques agressivos às armaduras, provenientes do meio ambiente. Além disso, são necessárias manutenções periódicas nas edificações a fim de garantir sua segurança e para isto é necessário utilizar técnicas de inspeção e monitoramento para avaliar a corrosão das armaduras (SONG; SARASWATHY, 2007).

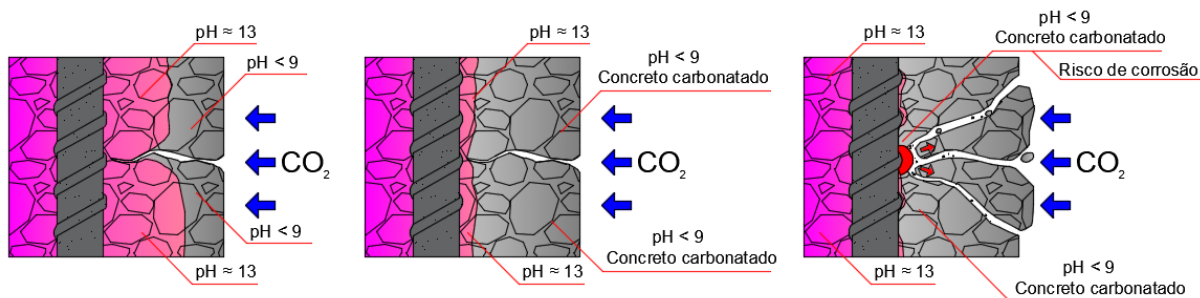
Os principais agentes encontrados na atmosfera responsáveis pela degradação da camada que protege o aço (filme passivo) são: o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e os cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) (CASCUDO, 1997). Esses agentes podem gerar problemas graves às estruturas de concreto armado. O gás carbônico e o monóxido de carbono estão presentes na atmosfera e são gerados pela queima de gasolina, óleo e carvão, combustíveis fósseis (RIBEIRO, 2018). A combinação entre o gás carbônico e a umidade origina a carbonatação, mas que pode ser evitada com a cura adequada durante o processo de execução das estruturas.

A estrutura do concreto proporciona um ambiente de alcalinidade elevada por conta da alta concentração de hidróxidos, responsáveis pela elevação do pH da solução contida nos poros da pasta de cimento. Esse pH pode ser alterado pela ação de fatores externos como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e gases ácidos como o  $\text{SO}_2$  e o  $\text{H}_2\text{S}$  (ISAIA, 2011).

A carbonatação é um mecanismo de deterioração responsável pela diminuição do pH da solução nos poros do concreto. À medida que a frente de carbonatação

avança no concreto, ao entrar em contato com a armadura, pode ocasionar a despassivação do aço e conseqüentemente torná-lo suscetível ao início do processo de corrosão. Na Figura 1 está representado o avanço da carbonatação até o contato com a armadura.

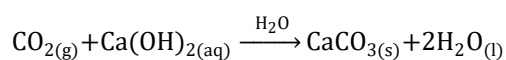
**Figura 1 - Representação esquemática do avanço da carbonatação**



Fonte: Autor (2021)

A coloração em tons rosas representa o ensaio colorimétrico realizado com fenolftaleína para detecção de profundidade de carbonatação. Esse ensaio detecta o avanço da carbonatação em função da coloração resultante, após a aspensão da solução indicadora. Essa solução faz com que a diferença de pH fique destacada, diferenciando a região menos alcalina da mais alcalina. Com isso, a região sem contato com a carbonatação se destaca na coloração vermelho carmim, enquanto a região com pH menos alcalino permanece incolor, representando a profundidade que a carbonatação alcançou.

A corrosão oriunda da carbonatação é classificada como corrosão generalizada, ou seja, ao longo do comprimento da barra, diferente da corrosão localizada (CASCUDO, 1997). Esse fenômeno consiste em realizar a transformação de íons alcalinos como cátions do sódio, potássio e cálcio, em sais de carbonatos dos mesmos elementos por meio da ação do dióxido de carbono presente na atmosfera (ISAIA, 2011). A reação de carbonatação se resume pela Equação 1 (HELENE, 1993).



**Eq. 1**

Por meio desta equação, percebe-se que o hidróxido de cálcio (portlandita), em contato com a água, reage com o dióxido de carbono que ingressa do meio para o concreto, resultando na formação de água e carbonato de cálcio.

A carbonatação ocorre de forma lenta e está associada à ação do  $\text{CO}_2$ , pois a hidratação crescente do cimento e os produtos da carbonatação ( $\text{CaCO}_3$ ) preenchem os poros da superfície do concreto dificultando o ingresso de  $\text{CO}_2$  na estrutura (ISAIA, 2011). Portanto, a carbonatação pode ser benéfica por impedir o ingresso de  $\text{CO}_2$ , dificultando novas reações de carbonatação (HELENE, 1993).

Já os cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) estão presentes em ambientes com alta concentração de sais, principalmente em ambientes marinhos, salmouras industriais e regiões de invernos rigorosos e países frios, onde utilizam-se sais de degelo. Também podem ser misturados ao concreto como aceleradores de pega e endurecimento ou ainda por meio de contaminação da água de amassamento e dos agregados utilizados (CASCUDO, 1997).

Da mesma forma que a diminuição da alcalinidade do concreto rompe a camada passivadora do aço, os íons cloreto em grandes quantidades também causam esse fenômeno, tornando o material vulnerável ao processo corrosivo. O cloreto pode se apresentar de três maneiras distintas no concreto: ligado quimicamente ao aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), formando cloroaluminato de cálcio ou sal de Friedel ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), adsorvido na superfície dos poros, e na forma de íons livres. Sua presença só se torna nociva quando está livre na forma de íons cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), que são os principais agentes agressivos responsáveis pela corrosão do aço em concreto (CASCUDO, 1997).

Além disso, grandes quantidades de cloreto fazem com que o concreto retenha mais umidade, diminuindo a resistividade do concreto e, conseqüentemente, aumentando o risco de corrosão da armadura (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A corrosão proporcionada pelos íons cloreto é classificada como corrosão localizada, e, portanto, é mais perigosa do que a corrosão generalizada, por atingir locais específicos da armadura (CASCUDO, 1997).

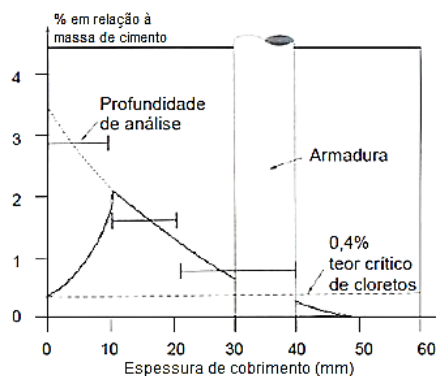
O transporte de cloretos para o interior do concreto ocorre em função dos poros presentes na estrutura do material. Com os poros interconectados e ligados a



armadura, facilita-se a ação dos agentes agressivos na estrutura. Na maioria dos casos o transporte de cloretos no concreto ocorre por absorção capilar e a difusão iônica (CASCUDO, 2000). A primeira geralmente ocorre na superfície do material, por molhagem e secagem decorrente de intempéries e depende da interconexão entre os poros. Esse mecanismo age logo após o contato do líquido com o material e em poucas horas pode penetrar vários milímetros. Porém, ele depende da viscosidade do líquido, sendo mais difícil a penetração quanto maior a viscosidade. Já a difusão iônica acontece em meio aquoso, no interior do concreto, por conta de gradientes de concentração iônica. Esses gradientes podem acontecer entre o meio externo e interno, ou dentro do concreto e fazem com que os íons se movimentem buscando se reorganizar para alcançar o equilíbrio (CASCUDO, 1997).

Esses mecanismos de penetração dependem de fatores para agirem, como o tipo de acesso ao concreto (se ocorre antes ou depois de endurecido), do tipo de cimento empregado e suas adições, da relação água/cimento, do estado de carbonatação do concreto, das condições de produção e cura do concreto, da umidade ambiental que define a saturação do material e da quantidade de cimento por metro cúbico de concreto (ISAIA, 2011). Cascudo (1997) apresentou um perfil típico da concentração de cloretos ao longo do cobrimento em um concreto contaminado por soluções de cloretos, conforme a Figura 2.

**Figura 2 - Perfil típico de concentração de cloretos ao longo do cobrimento**



Fonte: Cascudo (1997)

A parte inicial da curva corresponde à camada superficial do concreto e é onde age o mecanismo de absorção. Essa curva cresce até atingir um limite máximo. No

início da curva encontra-se a superfície do concreto, neste ponto a concentração é pequena por conta da ação de lixiviação que as águas pluviais promovem, carreando as soluções com cloretos. Após o limite máximo de concentração, já na zona de difusão, ocorre a diminuição da concentração, pois quanto mais profundo menor a concentração de contaminantes externos.

## **2.2 A corrosão do aço**

A deterioração dos materiais acontece por meio de processos físico-químicos em função do contato entre o material e o meio ambiente. Esse contato é ocasionado pela característica do material e também pelo mecanismo de transporte dos agentes agressivos presentes na atmosfera.

Com relação ao concreto, existem diversas características que influenciam na durabilidade da estrutura, pois afetam o comportamento do material frente a ação de agentes agressivos, como a relação água/cimento, a resistência à compressão e a camada de cobrimento. Quanto maior a relação água/cimento, maior a quantidade de poros formados e com isso maior a probabilidade de penetração de agentes agressivos ao concreto. Normalmente uma alta resistência à compressão do concreto está associada a uma maior vida útil do elemento, porém, também deve ser levado em consideração a agressividade do meio ambiente em que a estrutura se encontra.

A alcalinidade do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) presente no concreto, com pH próximo de 13 auxilia na formação da camada de passivação do aço, a qual promove proteção a superfície do metal. No entanto, se a carbonatação atingir o concreto em contato com o aço, ou se os íons cloreto alcançarem a armadura, e ambos somados à presença de água e oxigênio, inicia-se o processo de corrosão. A película protetora do aço é perdida quando o pH é menor que 11,0, e o efeito gerado pela carbonatação, faz com que o pH da solução atinja valores de aproximadamente 9,0 (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Nas armaduras em concreto, o processo de corrosão pode ser identificado quando surgem manchas superficiais em coloração alaranjada na superfície do material (HELENE, 2018). Esse processo também pode originar fissuras, destacamento do concreto de cobrimento, redução da seção das armaduras,

diminuição da aderência das armaduras, prejudicando esteticamente, além de comprometer a resistência e, conseqüentemente, a vida útil da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

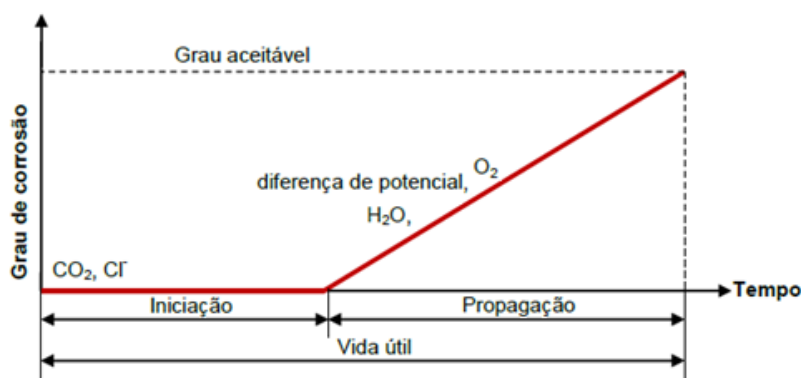
A corrosão é um mecanismo decorrente de ações químicas ou eletroquímicas do meio ambiente e que tem como consequência a redução de massa. Esse processo faz com que o metal retorne ao seu estado natural, como era encontrado na natureza, na forma de óxidos.

Existem dois tipos de corrosão, a seca ou corrosão química que ocorre em altas temperaturas e acontece pela reação gás metal, formadora de uma camada de óxidos (SOUSA, 2018). Este fenômeno não é de grande importância para estudos relacionados a estruturas de concreto armado e na área da construção civil. Já o segundo tipo de corrosão, a aquosa ou corrosão eletroquímica, é de suma importância no setor da construção, pois esta pode ocasionar problemas graves às edificações (CASCUDO, 1997).

O processo corrosivo das armaduras em concreto armado normalmente ocorre na presença de dois metais distintos em contato elétrico, juntamente com umidade e oxigênio. Porém, esse processo pode acontecer no aço isolado, pois o mesmo possui diferenças de potencial em sua superfície, com isso formam-se regiões anódicas e catódicas ligadas por meio do eletrólito (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Tuutti (1982), citado por Cascudo (1997), propôs o modelo de corrosão que expõe o processo de corrosão, desde sua iniciação até a propagação. Esse modelo retrata o grau de corrosão em função da vida útil da estrutura e está apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Modelo de vida útil proposto por Tuutti (1982)



Fonte: Adaptado de Cascudo (1997)

Com base na Figura 3 apresentada, nota-se que a fase de iniciação acontece da execução da estrutura até a despassivação da armadura pelos agentes externos. Já a fase de propagação, ocorre desde o início do processo corrosivo até o momento em que esse processo atinge um grau inaceitável.

### 2.3 Processo eletroquímico de corrosão

O processo eletroquímico que ocorre na corrosão é ocasionado pela ação de um agente oxidante, como por exemplo o oxigênio e o hidrogênio. Quando esses agentes entram em contato com o metal, eles recebem elétrons, resultando na reação de redução. Nesta reação ocorre a transferência de elétrons do ânodo para o cátodo por meio do metal. Sendo assim, o metal atua na reação como um eletrodo. Ao passo que o metal sofre a oxidação, ele perde elétrons e se torna um cátion, dissolvendo e se separando da estrutura metálica.

As reações que ocorrem durante o processo de corrosão eletroquímica podem ser anódicas ou catódicas. A reação anódica envolve a oxidação do Fe, enquanto a catódica envolve a redução do oxigênio em meio alcalino, tendo em vista que o pH do concreto possui essa alcalinidade. Portanto, as reações anódicas são reações de oxidação e as catódicas de redução. As Equações 2 e 3 apresentam as reações de oxidação e de redução que ocorrem no processo de corrosão eletroquímica (SOUSA, 2018).

Reação anódica ou de oxidação:

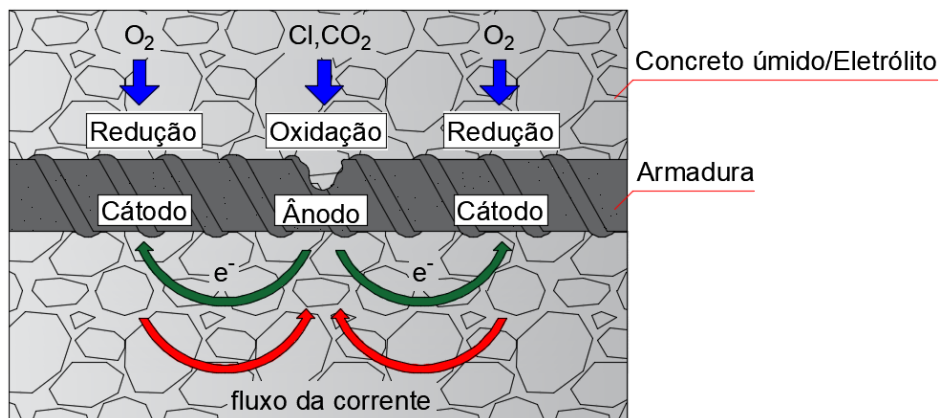


Reação catódica ou de redução:



Com a presença de regiões anódicas e catódicas ocorre a formação de uma pilha eletroquímica, conforme a Figura 4.

**Figura 4 – Representação de uma pilha eletroquímica no concreto armado**



Fonte: Autor (2021)

Assim, em metais ocorre a formação de muitas pilhas eletroquímicas, pois a superfície metálica possui grande quantidade de regiões anódicas e catódicas, resultantes da heterogeneidade do material (SOUSA, 2018). Portanto, para ocorrer a corrosão eletroquímica é preciso existir uma diferença de potencial no material, oxigênio e umidade. Não existe corrosão em concreto seco (NEVILLE; BROOKS, 2013).

### 3. Técnica de potencial de circuito aberto

Após a superação da barreira de proteção físico-química formada pelo concreto e denominada resistividade elétrica, os agentes agressivos agem de forma efetiva no processo de despassivação da armadura e em seguida no início do processo de corrosão. Com isso, é muito importante que seja realizado um monitoramento do processo corrosivo, objetivando manter sua ocorrência controlada.

Não há um consenso sobre qual é o método que avalia com mais precisão os níveis de corrosão em estruturas de concreto armado (SONG; SARASWATHY, 2007). No entanto, uma das técnicas mais utilizadas para o monitoramento do processo de corrosão é a técnica de potencial de circuito aberto (RIBEIRO; CUNHA, 2018).

A técnica de potencial de circuito aberto é utilizada para monitorar o processo de corrosão em armaduras de aço embutidas em concreto. Além de ser uma técnica não destrutiva, ela necessita de simples aparato experimental e, por isso, é muito utilizada tanto no laboratório como no campo (RIBEIRO; CUNHA, 2018).

Na construção civil, o potencial de circuito aberto é a técnica eletroquímica mais utilizada para monitorar o processo de corrosão e é padronizada pela *ASTM C876 - 15: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete* (ASTM, 2015). Apesar de ser bastante utilizada, seus resultados dependem de diversos fatores, como do material utilizado, condições de serviço, tipo de cimento e suas características, entre outros fatores (KOGA; ALBERT; NOGUEIRA, 2018). Isso faz com que seja necessária a utilização de outras técnicas em conjunto para validação do estudo, reduzindo incertezas com relação a correlação entre os valores de potencial e a ocorrência da corrosão.

Além disso, essa técnica é meramente qualitativa, informando apenas a probabilidade da corrosão estar ocorrendo, sem fornecer informações quantitativas (CASCUDO, 1997). Assim, por meio dela não é possível avaliar quanto está corroendo, apenas o momento em que o processo corrosivo da armadura se inicia com base em probabilidades. Além das limitações com relação a resultados quantitativos, Ribeiro e Cunha (2018) apresentam outros condicionantes, com base na *ASTM C876 – 15*.

A técnica não deve ser aplicada em concretos:

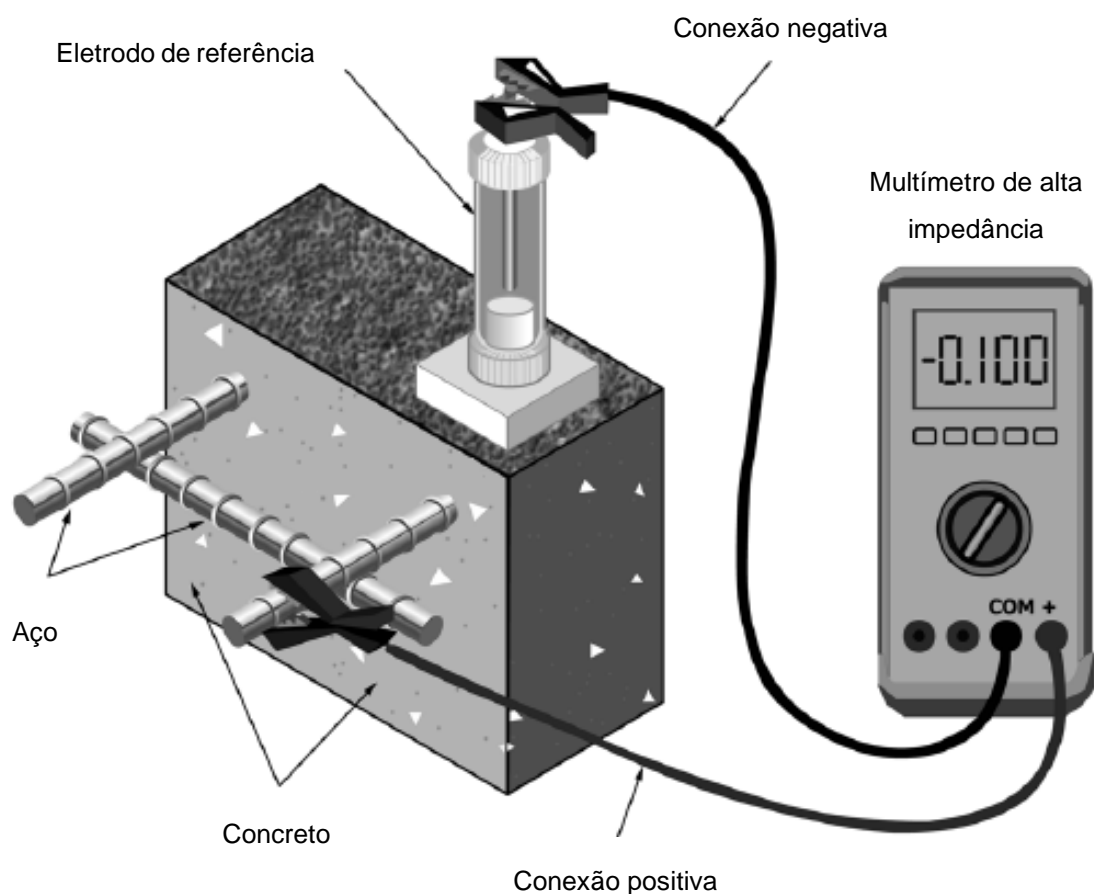
- Revestidos com pinturas;
- Contaminados com íons cloreto; e
- Completamente carbonatados.

Ainda, a técnica não pode ser aplicada em concretos muito secos e não deve ser aplicada em zonas sujeitas a correntes fracas (RIBEIRO; CUNHA, 2018). Para viabilizar a medição do potencial de corrosão é necessário formar uma pilha eletroquímica. Além disso, Ribeiro e Cunha (2018) também apresentam o conjunto de elementos e suas definições, necessários para a formação de uma pilha eletroquímica:

- Ânodo: eletrodo de trabalho (barra de aço) em que ocorre a reação de oxidação (corrosão).
- Eletrólito: líquido presente nos poros do concreto, que serve como condutor e contém íons que transportam a corrente do ânodo para o cátodo.
- Cátodo: eletrodo de trabalho (barra de aço) em que ocorrem reações de redução.
- Circuito Metálico: ligação entre o ânodo e o cátodo, por onde os elétrons transitam do ânodo para o cátodo.

O esquema observado na Figura 5, apresentado pela *ASTM C876 – 15*, ilustra a realização da técnica de PCA. A técnica consiste em conectar um eletrodo de trabalho, que é a barra embutida no corpo de prova, ao polo positivo de um voltímetro de alta impedância e ligar o polo negativo ao eletrodo de referência. Uma esponja saturada com solução de alta condutividade é alocada na superfície do corpo de prova de argamassa/concreto em que a barra de aço está embutida, a fim de conectá-lo ao eletrodo de referência.

**Figura 5 - Representação esquemática para medir o potencial de corrosão**



Fonte: adaptado de ASTM (2015)

Os resultados da técnica são obtidos medindo a diferença de potencial entre o eletrólito (aço/concreto) e o eletrodo de referência. Ocorre a passagem de corrente das regiões anódicas para as catódicas e o eletrodo de referência possui a capacidade de identificar a presença dessas linhas de corrente. Os potenciais são medidos utilizando um voltímetro e são mais negativos onde estão transitando essas linhas de corrente se comparados aos locais da armadura sem corrosão. Assim, quanto mais negativos os potenciais encontrados durante as medições, maior a probabilidade da corrosão estar ocorrendo (CASCUDO, 1997). Porém, para cada eletrodo de referência utilizado durante as medições, existem diferentes intervalos de potenciais que auxiliam na identificação da ocorrência ou não da corrosão.



Existem diversos tipos de eletrodos de referência que podem ser utilizados para a realização da técnica de PCA, como de hidrogênio (EPH – eletrodo padrão de hidrogênio), de calomelano saturado (ECS, Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> em solução KCl saturado), prata/cloreto de prata (Ag/AgCl, em solução de KCl saturado ou em concentração 0,1M), cobre/sulfato de cobre (ESC, Cu/CuSO<sub>4</sub>) que é utilizado como base pela ASTM C876 - 15, zinco/água do mar, entre outros (BERTOLINI, 2010).

A norma ASTM C876 - 15 apresenta uma correlação entre intervalos de potenciais e a probabilidade de ocorrência da corrosão, utilizando como eletrodo de referência o de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>) conforme a Tabela 1.

**Tabela 1 - Probabilidade de corrosão em função dos valores de PCA**

Probabilidade de corrosão	PCA para Eletrodo de Cu/CuSO <sub>4</sub>	Estado da Corrosão
< 10%	PCA > -200 mV	Passivo
Incerta	-350 mV < PCA < -200 mV	Incerto
> 90%	PCA < -350 mV	Ativo

Fonte: ASTM (2015)

Portanto, a técnica de PCA baseia-se na difusividade de íons através dos poros do concreto, ou seja, um dos parâmetros que influenciam nos resultados é a porosidade do concreto estudado. No momento em que se coloca uma solução composta por íons em contato com um material metálico, forma-se uma dupla camada elétrica em sua superfície. Com a formação da dupla camada elétrica por meio da organização imposta pela tentativa de estabilização do potencial no contato entre o metal e a solução, ocorrem oscilações neste potencial, decorrente das reações eletroquímicas.

Diversos autores utilizaram a técnica de potencial de circuito aberto para analisar a probabilidade de corrosão ou a passivação do aço embutido em concretos com diferentes composições, dentre eles Cascudo (2000), Silva (2006), Ribeiro (2010), Bandala *et al.* (2011), Almeida (2013), Ghorbani *et al.* (2019) e Rezende (2019).

Porém, poucos estudos buscaram revisar parâmetros da técnica para averiguar a influência nos resultados, visto que seu procedimento pode variar bastante. Koga, Albert e Nogueira (2018), Assouli, Ballivy e Rivard (2008) e Medeiros *et al.*, (2017) são alguns dos autores que estudaram parâmetros que influenciam nos resultados relacionados a técnica de PCA ou a compararam com outra técnica para analisar a confiabilidade dos seus resultados.

Para a realização dessa técnica pode-se optar ou não por realizar ciclos de molhagem e secagem, possui diversos tipos de eletrodos de referência sugeridos pela norma que a padroniza, além de poder ser realizada com imersão total ou parcial dos corpos de prova na solução. Essas variações permitidas pela norma podem trazer diferentes resultados aos experimentos ou ainda proporcionar ensaios mais demorados. Tratando da realização dessa técnica laboratorialmente, a fim de replicar se um traço real com problemas de corrosão nas armaduras está sofrendo influência dos seus componentes contribuindo com o processo corrosivo, é importante que os resultados sejam obtidos de maneira rápida para realizar uma correta intervenção na edificação. Além disso, a obtenção dos resultados dessa técnica mais rapidamente, faz com que experimentos que tratam da utilização de resíduos incorporados ao traço do concreto possam ser realizados em menos tempo. Isso favorece a realização de mais análises, variando diversos componentes do traço em estudo para avaliar a corrosão das armaduras. Em função disso foram realizados diversos experimentos, variando parâmetros da técnica de PCA e verificando a influência nos resultados dos ensaios.

### **3.1 Pesquisas que utilizaram a técnica de PCA**

A Tabela 2 apresenta alguns estudos, após o ano de 2000, que utilizaram a técnica de potencial de circuito aberto com base na *ASTM C876 – 15*, para analisar a probabilidade de corrosão. Essa tabela contempla o estudo, os autores, como foram realizados os ciclos de molhagem e secagem, se a imersão foi total ou parcial, além do tipo de eletrodo de referência utilizado, parâmetros estudados nesse trabalho.

**Tabela 2 - Estudos que utilizaram as técnicas de PCA**

<b>Estudo</b>	<b>Referência</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Imersão</b>	<b>Eletrodo de Referência</b>
Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão	(CASCUDO, 2000)	4 dias em estufa (50°C) 3 dias em solução de 5% e 10% de NaCl	Parcial	ECS
Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos	(SILVA, 2006)	4 dias em ambiente laboratório 3 dias em solução de 3,5% de NaCl	Parcial	Cu/CuSO <sub>4</sub>
Influência da lama vermelha na corrosibilidade do concreto armado	(RIBEIRO, 2010)	5 dias em estufa (50°C) 2 dias em solução de 3% de NaCl	Parcial	ECS
Caracterização eletroquímica de concretos com cinza de bagaço de cana	(BANDALA <i>et al.</i> , 2011)	Sem ciclos	Total	Cu/CuSO <sub>4</sub>
Avaliação do potencial de corrosão de armaduras em concretos com incorporação de ACBC	(ALMEIDA, 2013)	5 dias em estufa (50°C) 2 dias em solução de 3,5% de NaCl	Parcial	Ag/AgCl
Durabilidade do concreto com resíduos de granito substituindo o cimento	(GHORBANI <i>et al.</i> , 2019)	Sem ciclos	Total	ECS
Avaliação da passivação do aço em concreto com incorporação de resíduos	(REZENDE, 2019)	Sem ciclos	Total	Hg/HgO

No estudo de Cascudo (2000), o autor investigou a influência de características das armaduras de aço no âmbito do seu comportamento frente à corrosão, analisando barras de aço carbono de diferentes diâmetros e classificações com o intuito de identificar as suscetibilidades diante do processo corrosivo. Como conclusão, o autor relatou diferenças significativas de comportamento das barras de aço carbono estudadas frente à corrosão destacando a barra de aço CA-25 com o melhor desempenho.

Silva (2006) verificou o comportamento de concretos com adições minerais no que tange: a eficiência na proteção do aço contra a corrosão induzida por íons cloreto, com o intuito de aumentar a vida útil das estruturas de concreto e reduzir o índice de ocorrência da corrosão de armaduras. Em seu estudo, a autora concluiu que adições de sílica em substituição ao cimento Portland são favoráveis no controle da corrosão pelo ataque de íons cloreto.

Já Ribeiro (2010) propôs a utilização de lama vermelha, resíduo proveniente da produção de alumínio, como adição a matrizes de cimento Portland com o intuito de reduzir problemas relacionados a corrosão no concreto armado. O autor concluiu que a adição da lama vermelha às matrizes cimentícias foi favorável quanto ao processo de corrosão por conta da sua composição química, alta finura e alcalinidade.

Outro estudo que utilizou a técnica de PCA durante o seu desenvolvimento foi concretizado por Bandala *et al.* (2011). Em seu estudo, os autores avaliaram a incorporação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição a parte do cimento Portland com o intuito de reduzir a corrosão induzida por íons cloreto. Como conclusão, os autores concluíram que a mistura com maior proteção frente à corrosão foi com a proporção de 80% de cinza de bagaço de cana e 20 % de cimento Portland.

Almeida (2013) foi outro autor que utilizou a técnica de PCA durante o seu estudo, o qual visou avaliar a ocorrência da corrosão em armaduras em concretos produzidos com areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC), porém, em substituição a parte do agregado miúdo da mistura. No seu estudo, foram avaliados diferentes teores de substituição de ACBC e concluiu-se que a substituição em 30% de agregado miúdo pela ACBC pode reduzir a probabilidade de despassivação da armadura de aço no concreto.

Em estudo mais recente, Ghorbani *et al.* (2019) avaliaram o comportamento do pó residual de granito em substituição a parte do cimento Portland da mistura de traços de concreto (até 20%). Os autores concluíram que o resíduo utilizado em proporções de 10% e 20% melhoraram significativamente a resistência a corrosão das barras de aço embutidas nesses traços.

Outro estudo recente e que também fez uso da técnica de PCA, foi realizado por Rezende, em 2019, que tratou do comportamento de passivação do aço CA-60 em corpos de prova com a incorporação de 30% de ACBC em substituição ao agregado miúdo. Porém, nesse estudo o principal enfoque foi avaliar a passivação do aço, diferentemente dos outros estudos apresentados, os quais vislumbraram avaliar o comportamento do aço embutido em matrizes cimentícias diante do ataque por íons cloreto. A autora concluiu que o filme passivador formado no entorno do aço exposto à matriz cimentícia com ACBC em sua composição ofereceu maior proteção em comparação ao traço de referência utilizado.

Portanto, com base na Tabela 2, e na diversidade de estudos apresentados, pode-se perceber a possibilidade de optar por diferentes maneiras de realizar a técnica de PCA para várias finalidades, tornando difícil a comparação dos resultados de diferentes estudos. Por isso, é importante estudar esses parâmetros para verificar a sua influência nos resultados da técnica de PCA e destacar o melhor procedimento com base na combinação de parâmetros que melhor se adequam ao ensaio.

## 4. Resíduos incorporados às argamassas

Este capítulo apresenta uma breve explanação sobre os resíduos incorporados às argamassas em substituição a parte do agregado miúdo da mistura. O intuito de utilizar resíduos nos traços foi avaliar se é viável a aplicação da técnica de PCA em matrizes cimentícias diversificadas, além de comparar o comportamento das barras de aço embutidas em corpos de prova de diferentes traços. Os resíduos utilizados na confecção dos corpos de prova deste estudo foram, a areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) e o lodo de estação de tratamento de água (LETA). Ambos os materiais foram incorporados às argamassas em substituição de parte do agregado miúdo por conta de serem materiais considerados inertes e possuírem propriedades semelhantes às dos agregados miúdos. Os traços utilizados foram com base em estudos anteriores do GESEC - Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Eco-eficiência em Construção Civil e Urbana da Universidade Federal de São Carlos. Pesquisadores do grupo já avaliaram esses materiais em diversas situações e obtiveram as melhores condições para realizar a substituição do agregado miúdo pelos resíduos sem afetar nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas. No presente estudo, o principal objetivo foi avaliar a técnica de PCA, porém, com a utilização desses resíduos nas misturas, foi possível, como complemento, comparar a influência da incorporação de diferentes materiais frente ao processo de corrosão das barras de aço, averiguar a profundidade de carbonatação e a penetração de cloretos em diferentes traços.

### 4.1 Lodo de estação de tratamento de água - LETA

O lodo de estação de tratamento de água (LETA) é um resíduo proveniente da transformação da água bruta em água potável por meio de processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção realizados em estações de tratamento de água (SALES; SOUZA, 2009; RODRIGUES; HOLANDA, 2015; GOMES *et al.*, 2019; GODOY *et al.*, 2020). A principal etapa de produção desses resíduos ocorre nos decantadores por desestabilização química (CORDEIRO, 2002). Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), o lodo gerado em estações de tratamento de água é classificado como resíduo não inerte.

O tratamento de água convencional é composto pelas seguintes etapas: coagulação química, floculação, decantação e filtração das partículas finalizando-se na etapa de desinfecção da água (GOMES *et al.*, 2019). Durante o tratamento, são aplicados produtos químicos, como por exemplo, sais de ferro ou sais de alumínio, os quais tem como função desestabilizar as partículas presentes na água em estado bruto. As principais substâncias químicas utilizados durante o tratamento de água são: o sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), o cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), o cloreto ferroso ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) e o sulfato férrico ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) (SALES; SOUZA, 2009). Essas substâncias podem gerar um lodo tóxico para o meio ambiente, principalmente em corpos d'água, onde costumam ser depositados.

O LETA é um resíduo produzido em grande escala. Por ano, uma estação de tratamento de água produz aproximadamente 100 toneladas de lodo (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016). Com isso, muitos pesquisadores tentam aproveitar esse resíduo no desenvolvimento de novos materiais em diversas áreas, como na construção civil. Nessa área, existem estudos que buscam a utilização do lodo em diversas aplicações, como tijolos e produtos cerâmicos, agregados leves, produção de cimento, material cimentício suplementar e adição inerte, e geopolímeros (GOMES *et al.*, 2019).

Com relação a aplicação do lodo de estação de tratamento de água na produção de argamassas e concretos, foi estudada a substituição de 3% do agregado miúdo natural pelo LETA (SALES; CORDEIRO, 2001). Nesse estudo, os autores concluíram que nessas condições de substituição do agregado miúdo natural, é possível obter concretos com características mecânicas similares ao concreto convencional. Souza (2006), realizou um estudo avaliando concretos confeccionados com a incorporação de lodo proveniente de estação de tratamento de água em substituição ao agregado miúdo da mistura. O autor teve como conclusão que adicionando até 4% em massa de LETA em relação ao agregado miúdo da mistura, obtiveram-se concretos com características próximas as dos concretos convencionais.

No presente estudo foi utilizado o mesmo material já preparado e caracterizado por Souza (2006) e também um dos traços utilizados pelo autor na confecção dos

corpos de prova, mesmo traço já avaliado por Sales e Cordeiro 2001, com a substituição de 3% do agregado miúdo por LETA. Souza (2006) realizou a coleta do material na estação de tratamento de água de São Carlos - SP em dias de limpeza dos decantadores da estação. O sistema utilizado no tratamento de água da estação de coleta dos resíduos é o tradicional, o qual segue as etapas de floculação, sedimentação e filtração, além de utilizar como coagulante o sulfato de alumínio. O lodo foi transportado para o Laboratório de Materiais e Componentes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos. O material coletado foi seco, moído. Esse material foi caracterizado por Souza (2006) e armazenado no LMC. Essas etapas estão apresentadas na Figura 6.

**Figura 6 - Etapas de coleta e preparação do LETA onde: a) LETA na estação; b) LETA antes da secagem; c) LETA após a secagem em estufa; e d) Moagem dos torrões de LETA**



Fonte: Souza (2006)



A hipótese da utilização desse material foi realizar a comparação do comportamento de barras de aço CA60 do mesmo lote, expostas a diferentes matrizes cimentícias e ao ataque por cloretos (solução de NaCl), simulando a concentração da água do mar e análise da probabilidade de corrosão pela técnica de potencial em circuito aberto (PCA). Os corpos de prova confeccionados com LETA foram comparados a outros dois traços, um moldado com argamassa convencional e um com a incorporação de 30% de areia de cinza do bagaço de cana de açúcar (ACBC), em substituição ao agregado miúdo.

#### **4.2 Areia de cinza do bagaço de cana de açúcar - ACBC**

Outro resíduo agroindustrial gerado em grande escala e que necessita de maneiras adequadas para destinação final, tornando-se fonte de estudos na construção civil é a areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar - ACBC. A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas cultivados no Brasil, este que é líder mundial na sua produção e de seus derivados, com cerca de 9,1 milhões de hectares em 2016/2017 (BORDONAL *et al.*, 2018). A partir da cana-de-açúcar, são produzidos principalmente açúcar e etanol. Porém, esse processo gera outros derivados, como o vinhoto, a levedura, além do bagaço da cana. O bagaço produzido durante o processamento da cana é queimado nas caldeiras para gerar energia elétrica nas usinas. O processo de queima desse bagaço gera a areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, que por sua vez, é um dos resíduos que promove problemas para as indústrias quanto a sua destinação final.

Levando em consideração a produção de 2013/2014, foram geradas 4 milhões de toneladas de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (MORETTI *et al.*, 2016). Com a produção em grande escala desse resíduo abrem-se portas para a investigação e utilização desse material na construção civil incorporando-o em materiais de construção. Nesse contexto, a utilização de resíduos na construção civil reduz a necessidade de possível disposição inadequada, além de suprir a escassez de alguns materiais utilizados na construção civil. Diversos estudos já foram ou estão sendo realizados com o intuito de utilizar derivados da cana-de-açúcar na construção civil.

Muitos desses estudos utilizam a areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar substituindo parcialmente a porção de agregados miúdos de traços de concreto por ser um material inerte e possuir grande quantidade de quartzo em sua composição (LIMA *et al.*, 2011; MORETTI *et al.*, 2016; ALMEIDA *et al.*, 2019).

No presente estudo, foi utilizado o mesmo material já preparado e caracterizado por Moretti (2018), além da mesma proporção de ACBC em substituição ao agregado miúdo (30%). Com a mesma hipótese do LETA, esse resíduo foi utilizado para avaliar o comportamento das barras de aço em diferentes matrizes cimentícias, diante dos ensaios de PCA e também realizar ensaios de carbonatação e penetração de cloretos para correlacionar os resultados com os ensaios de potencial de corrosão.

## 5. Programa Experimental

Neste capítulo estão apresentados os materiais e métodos utilizados no presente estudo.

Para avaliar a influência de parâmetros na técnica de PCA, foram utilizadas argamassas com incorporação de diferentes materiais em substituição a parte do agregado miúdo. Sendo assim, os ensaios foram realizados para três traços de argamassas diferentes (REF, LETA e ACBC).

Os traços das argamassas utilizados para a confecção dos corpos de prova de referência (REF) e de ACBC foram os mesmos utilizados por (MORETTI, 2018). Em seu estudo ela determinou a porcentagem ideal de areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) em substituição à parte do agregado miúdo da mistura. A autora concluiu que a substituição de 30% do agregado miúdo por ACBC resulta em um concreto com maior resistência mecânica, maior resistividade elétrica e menos poroso se comparado a um concreto referência.

Outro traço utilizado foi com a incorporação de lodo de estação de tratamento de água (LETA) na argamassa, em substituição à parte do agregado miúdo. A substituição de 3% de massa de lodo de estação de tratamento de água em relação ao agregado miúdo resulta em concretos com características mecânicas próximas às do concreto convencional (SALES; CORDEIRO, 2001). Souza (2006) também analisou a proporção de 3% de LETA em substituição ao agregado miúdo, e concluiu que não se descarta a utilização desse concreto para contrapiso, mas restringe a sua utilização em locais expostos a umidade e intempéries, pois sua absorção de água foi 7% maior do que a do concreto convencional.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos traços de argamassa utilizados para a confecção dos corpos de prova.

**Tabela 3 - Traço em massa estabelecido por Moretti (2018) e Souza (2006)**

Traço	Cimento	Areia fina	Areia média	ACBC	LETA	Relação a/c
REF*	1	1,35	1,65	0	0	0,55
30ACBC*	1	0,946	1,65	0,413	0	0,55
3LETA**	1	1,31	1,65	0	0,041	0,55

Fonte: Moretti (2018)\* e Souza (2006)\*\*

O programa experimental deste estudo foi dividido em duas etapas, separadas pelos ensaios realizados, conforme ilustra o esquema da Figura 7.

A primeira etapa correspondeu na variação dos parâmetros da técnica de PCA, ou seja, o enfoque principal foi na técnica de monitoramento de corrosão. Já na segunda etapa foi dado destaque aos traços utilizados no estudo, analisando-os diante da técnica de PCA, e na execução de ensaios de carbonatação e penetração de cloretos para verificar se existia correlação entre os resultados desses ensaios com os ensaios de PCA.

Na primeira etapa foram realizados diversos ensaios, variando entre imersão total e parcial, com e sem ciclos de molhagem e secagem, com diferentes eletrodos de referência e utilizando diferentes sistemas de aferição de potenciais. As comparações entre os ensaios foram realizadas de forma que apenas um parâmetro variasse, a fim de obter resultados que apresentassem a influência de cada parâmetro na técnica de PCA. O ensaio 6 foi destinado para a análise da variação da massa ao longo do ensaio de PCA, e por isso não foram realizadas leituras de potenciais ao longo do ensaio, sendo aferidas apenas as massas ao longo dos ciclos de molhagem e secagem. E o ensaio 8 foi realizado para avaliar o comportamento dos potenciais durante o processo de cura dos corpos de prova REF, ou seja, com os CPs imersos totalmente em solução de hidróxido de cálcio.

As abreviaturas utilizadas para representar cada parâmetro variado correspondem ao tipo de imersão, aos ciclos de envelhecimento acelerado, aos tipos de eletrodos de referência utilizados e aos sistemas de coleta de dados.

**Figura 7 - Programa experimental**

**Etapa 1**

Experimento de PCA segundo ASTM C876 - 15

(1)	IP, c/c, Ard, ECS
(2)	IP, c/c, Mul, ECS
(3)	IP, s/c, Ard, ECS
(4)	IP, c/c, Mul, Hg/HgO
(5)	IT, s/c, Ard, Hg/HgO
(6)	IP, c/c, Sem medição
(7)	IT, c/c, Mul, ECS
(8)	IT, s/c, Ard, Hg/HgO (Cura)

**Etapa 2**

Comparação dos traços

(9) IP, c/c, Mul, ECS	(10) IT, c/c, Mul, ECS
Carbonatação	
Penetração de cloretos	

**LEGENDA:**

IP: Imersão Parcial da amostra na solução (metade do CP)

IT: Imersão total da amostra na solução

c/c: com ciclo de molhagem e secagem (Solução de NaCl)

s/c: sem ciclos de molhagem e secagem (Solução de NaCl)

Hg/HgO: eletrodo de mercúrio/óxido de mercúrio

ECS: Eletrodo de calomelano saturado

Mul: Multímetro de alta impedância

Ard: Arduino Uno

Fonte: Autor (2021)

Para os experimentos que utilizaram o Arduino como mecanismo de coleta de dados foi moldado apenas um corpo de prova para cada traço para cada ensaio, pois cada CP possui duas amostras (barras de aço) e o sistema possui somente 6 portas que se conectam aos eletrodos de trabalho (barras de aço). Já para os experimentos que utilizam o multímetro para a coleta de dados, foram confeccionados dois corpos de prova, sendo assim, totalizando 4 amostras para cada traço.

A segunda etapa foi composta pela realização dos ensaios de PCA a fim de verificar a viabilidade da aplicação da técnica em barras de aço embutidas em matrizes cimentícias com a incorporação de resíduos, além de avaliar o comportamento dos potenciais das barras de aço e apontar a matriz que mais protegeu as barras de aço diante do ataque por cloretos. Para complementar os resultados de PCA, também foram realizados os ensaios de carbonatação e penetração de cloretos, para os quais foram moldados novos corpos de prova, em formato cilíndrico de 5 x 10 cm.

Concluindo as atividades apresentadas no esquema da Figura 7, foi possível verificar a influência de cada parâmetro em estudo para a técnica de PCA. Além disso, foi possível verificar se os resultados dos ensaios de carbonatação e penetração de cloretos tiveram correlação com os resultados dos ensaios de potencial de corrosão.

Em seguida estão apresentados os materiais e métodos utilizados nesse estudo, desde a limpeza das barras de aço até a execução dos ensaios.

## **5.1 Materiais**

Os materiais utilizados neste estudo foram: cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC), areia fina e areia média. Estes materiais foram caracterizados por Moretti (2018). O anexo deste trabalho apresenta a caracterização desses materiais. Além disso, foi utilizado o lodo de estação de tratamento de água (LETA), caracterizado por Souza (2006), conforme o anexo do trabalho, e que também tem como função, incorporar a argamassa substituindo parte do agregado miúdo da mistura. Outros materiais utilizados neste estudo foram, o aço CA-60, água deionizada, hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e cloreto de sódio (NaCl), bem como fenolftaleína ( $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ ) e nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ). Na

fase de preparação das barras de aço foram utilizados alguns materiais complementares que serão apresentados no tópico 5.2.1. Preparação das barras de aço.

### **5.1.1. Aço CA-60**

O aço utilizado no presente estudo foi o aço CA-60 de 5 mm de diâmetro, pois mesmo não sendo o mais utilizado na construção civil, seu processo de fabricação se dá por trefilação a frio. Este processo faz com que os grãos do material passem por um processo de encruamento, resultando em um acúmulo de energia maior se comparado ao aço fabricado a quente tornando-o mais suscetível ao processo de corrosão. Além disso, geralmente o aço CA-60 é utilizado em estribos, que tem como função, garantir o posicionamento das armaduras principais, e por isso são posicionados mais próximos à superfície do concreto em elementos estruturais, tornando-os mais suscetível a exposição de ataques externos e, conseqüentemente, ao processo de corrosão.

Visto que o aço é um material muito heterogêneo e que, até mesmo entre lotes pode apresentar grande variabilidade em sua composição química, foi realizada a sua caracterização. Essa caracterização química foi realizada por espectrometria de emissão óptica por centelha (S-OES) e está apresentada na seção de resultados e discussão do presente estudo.

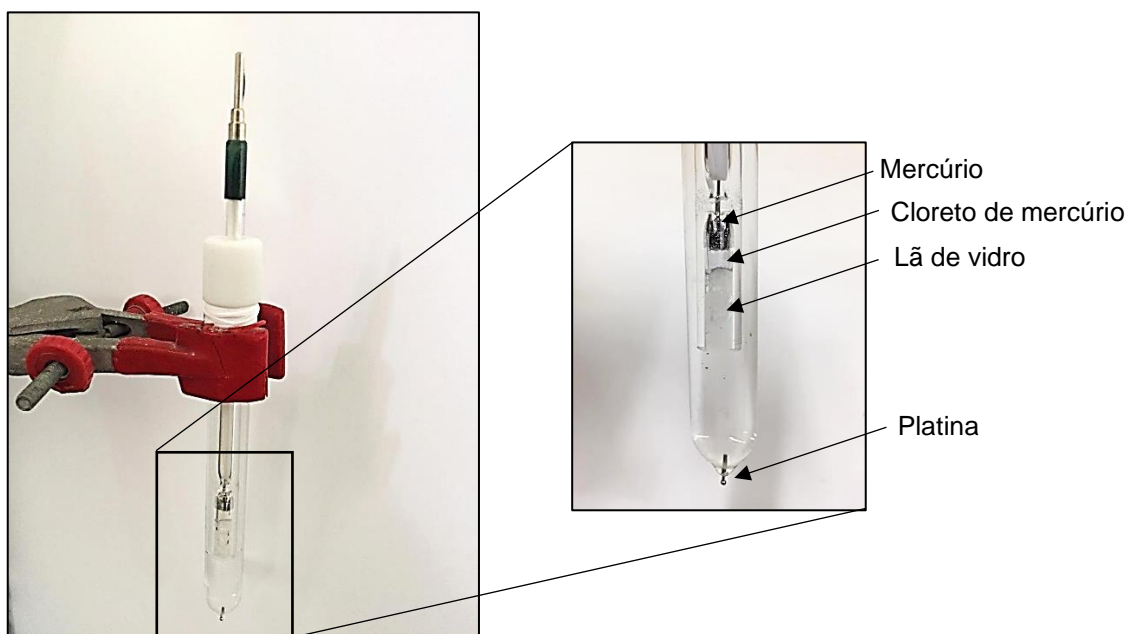
### **5.1.2. Eletrodos de Referência**

Para a análise dos potenciais durante a cura dos corpos de prova, foi utilizado o eletrodo de mercúrio/óxido de mercúrio (Hg/HgO) em solução de hidróxido de potássio (KOH), pois o eletrodo de calomelano saturado (ECS) como possui solução de cloreto de potássio (KCl) em seu interior, pode contaminar a solução de hidróxido de cálcio da cura. Já para a realização dos ensaios de potencial em circuito aberto, foram utilizados dois tipos de eletrodo de referência, de mercúrio/óxido de mercúrio (Hg/HgO) em solução de hidróxido de potássio (KOH) e de calomelano saturado (ECS) em solução de cloreto de potássio (KCl). A confecção dos eletrodos de referência foi realizada no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica

(LIEC) do Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Para a confecção, primeiramente foi adicionado o mercúrio no interior do vidro que possui uma platina fixa em sua ponta, em seguida o óxido de mercúrio, para que o mercúrio não entrasse em contato com a solução de hidróxido de potássio. Mais adiante, o restante do canal interior do eletrodo foi preenchido com lã de vidro e, por fim, o restante do preenchimento do vidro foi realizado com a solução de hidróxido de potássio. Já a confecção do eletrodo de calomelano saturado, seguiu a mesma sequência, apenas alterando alguns materiais. Neste caso, foi adicionado o mercúrio, o cloreto de mercúrio, a lã de vidro e, finalmente, a solução de cloreto de potássio, componentes que podem ser visualizados na Figura 8.

**Figura 8 - Eletrodo de referência de calomelano saturado**



Fonte: Autor (2021)

Para calibrar os eletrodos e verificar o perfeito funcionamento, os eletrodos confeccionados foram colocados em contato com a solução que possuíam em seu interior, no caso do eletrodo de Hg/HgO em solução de KOH e o eletrodo de ECS em solução de KCl em conjunto com outros eletrodos de mesmo tipo e que já estavam



em funcionamento. Como o potencial verificado entre os eletrodos novos e os eletrodos antigos foi nulo ou próximo de zero, constatou-se o perfeito funcionamento e confiabilidade dos eletrodos confeccionados, os quais foram utilizados para as medições de potencial em circuito aberto.

### **5.1.3. Soluções**

Para a realização dos experimentos foram preparadas algumas soluções, como a solução de ácido clorídrico (HCl) na proporção de 1:1 com 3,5 g/L de hexametileno tetramina (inibidor de corrosão), para remover os óxidos na fase de preparação das barras. Essa composição faz com que o aço não sofra o processo de corrosão durante a sua limpeza, mesmo estando em contato com uma solução ácida, preservando a superfície do aço para o ensaio de PCA.

Também foi utilizada uma solução saturada de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), a qual auxiliou no processo de cura úmida dos corpos de prova e foi preparada utilizando a proporção de 1,7 g/L à temperatura de 23°C.

Já a solução agressiva utilizada durante os ensaios de PCA foi uma solução aquosa de 3,5% de NaCl, em massa, simulando a concentração de NaCl na água do mar, entre 2,5 a 3,5%.

Para os ensaios de carbonatação e penetração de cloretos, como soluções indicadoras foram utilizadas soluções de fenolftaleína ( $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ ) e nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ), respectivamente.

## **5.2 Potencial de corrosão**

Todos os corpos de prova do presente estudo foram preparados da mesma maneira, independente dos parâmetros avaliados durante o monitoramento do potencial de corrosão. Já o método de coleta de dados durante os ensaios foi distinto, e está explicado na seção 5.2.3. Potencial de circuito aberto.

A seguir está apresentado o método de preparação e limpeza das barras de aço utilizadas no presente estudo.

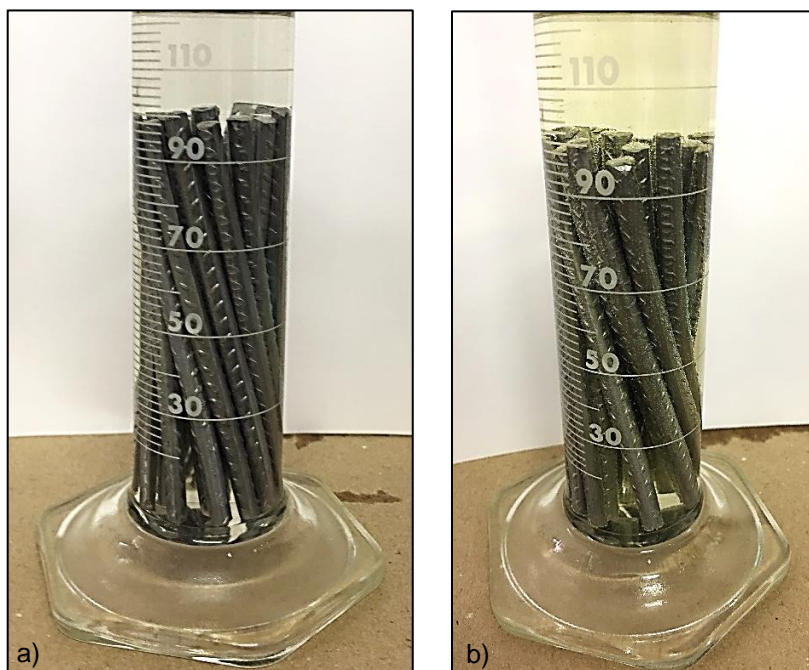
### 5.2.1. Preparação das barras de aço

As barras de aço CA-60 de 5 mm de diâmetro e 12 m de comprimento foram adquiridas já cortadas em barras menores de 10 cm de comprimento cada. Primeiramente, as pontas das barras foram passadas em um esmeril para remover imperfeições dos cortes e tornar a seção transversal lisa, a fim de facilitar o contato elétrico, explicado adiante. Em seguida, foi realizada a limpeza das barras com o intuito de remover os resíduos e impurezas presentes em sua superfície. Para a realização da limpeza foi seguido o procedimento baseado na norma americana G1-03 *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens* (ASTM, 2011).

A limpeza iniciou-se com a passagem de uma bucha seca na superfície das barras e em seguida elas foram imersas em acetona por 5 minutos para a remoção da gordura superficial. Após isso, as barras foram secas utilizando papel toalha, e imersas em solução de ácido clorídrico (HCl) e hexametilenotetramina em uma proveta, por 10 minutos. A cada 2 minutos a proveta era agitada para facilitar a remoção dos óxidos presentes nas barras. O próximo passo da limpeza foi mergulhar as barras de aço em água deionizada com temperatura de aproximadamente 50°C, durante 10 segundos, para a remoção dos gases que restaram no material. Por fim, as barras foram mergulhadas novamente na acetona, durante 2 minutos, para garantir a total remoção da gordura superficial e facilitar a evaporação da água, além de secas com papel toalha. A Figura 9 apresenta o procedimento de imersão das barras de aço na solução de ácido clorídrico com hexametilenotetramina.

Percebe-se que a coloração da água na solução de ácido clorídrico se altera do início ao final do tempo de imersão. Esse fato ocorre por conta da remoção dos óxidos presentes na barra. Para avaliar qualitativamente se a limpeza das barras foi realizada de maneira adequada, eliminando todos os óxidos presentes na superfície antes do embutimento nos corpos de prova, foi realizada uma microscopia com ampliação de 1000x. Por meio dessa análise, foi possível avaliar se após a limpeza das barras segundo a *ASTM G1-03*, não restaram óxidos na superfície das amostras utilizadas nos ensaios. Os resultados desta análise estão apresentados na seção de testes preliminares apresentada nos resultados e discussão deste estudo.

**Figura 9 - Procedimento de limpeza das barras de aço (a) início (b) final**

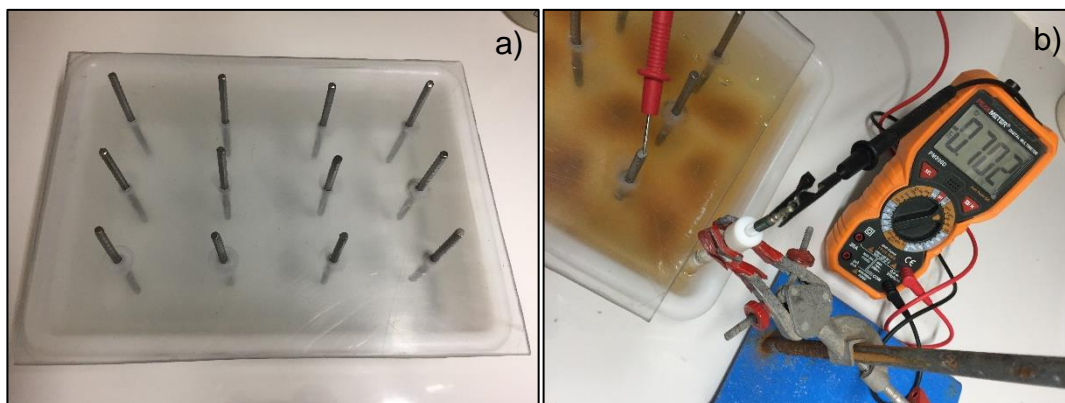


Fonte: Autor (2021)

Antes de realizar os ensaios de Potencial de Circuito Aberto, 12 barras de aço foram selecionadas para serem avaliadas a fim de detectar irregularidades e não-uniformidades no aço, que pudessem influenciar nos resultados dos ensaios. Essa avaliação consistiu em aferir os potenciais utilizando como eletrodo de referência, o eletrodo de calomelano saturado.

Para a realização desse procedimento, montou-se uma célula eletroquímica. As barras de aço da amostra passaram pelo procedimento de limpeza segundo a norma americana *G1-03*. Essa célula foi composta por uma placa de acrílico com orifícios, e após passarem pela limpeza segundo a norma americana *G1-03*, as barras de aço em estudo foram posicionadas nesses orifícios. Essa placa de acrílico foi posicionada de maneira que as barras de aço permanecessem imersas até a metade da sua altura, em solução de NaCl com concentração de 3,5% sem entrarem em contato com o fundo do recipiente. A Figura 10 apresenta a célula montada e o procedimento para a aferição dos potenciais.

**Figura 10 - Célula eletroquímica montada (a) e medição dos potenciais (b)**



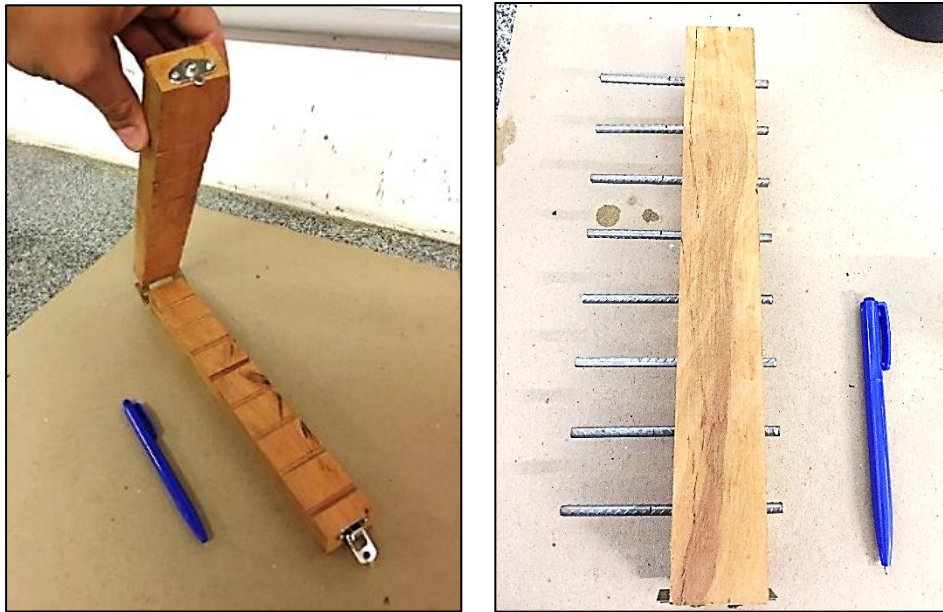
Fonte: Autor (2021)

Os potenciais de cada barra de aço foram aferidos após 5 dias em solução e, com isso, foi calculada a média entre esses valores. Em seguida cada potencial foi comparado com a média do conjunto. O critério de validação do lote das barras de aço adquiridas para o estudo foi o mesmo utilizado por Ribeiro (2010), o qual utilizou barras de aço que diferiram no máximo 2% do valor médio obtido de potencial calculado.

Os resultados obtidos por essa análise estão apresentados na seção de testes preliminares nos resultados do estudo. Com essa análise constatou-se que as barras de aço poderiam ser utilizadas no estudo sem interferirem nos resultados da técnica de PCA.

Com a constatação de que as barras de aço poderiam ser utilizadas no estudo, foi possível dar seguimento no desenvolvimento da pesquisa, com a limpeza das barras a serem utilizadas nos ensaios de PCA. Após o procedimento de limpeza das barras destinadas aos ensaios de PCA e análise de potenciais, com auxílio de um molde desenvolvido pelo autor (Figura 11), as barras foram revestidas com fita isolante líquida em uma determinada área a fim de direcionar o processo corrosivo para o centro das barras, região central do corpo de prova. O molde desenvolvido proporcionou que somente as partes revestidas com fita isolante líquida ficassem expostas, facilitando o trabalho de delimitação das áreas.

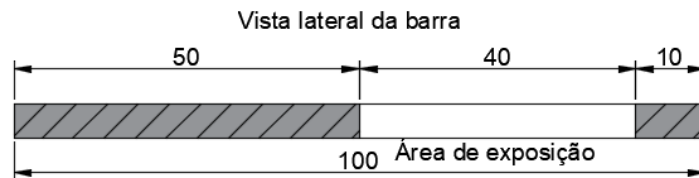
**Figura 11 - Molde para pintura das barras com fita isolante líquida**



Fonte: Autor (2021)

A Figura 12 apresenta um esquema com as dimensões das delimitações das áreas isoladas das amostras e com a área de exposição utilizada neste estudo.

**Figura 12 - Modelo com delimitações das áreas isoladas da barra (mm)**



Fonte: Autor (2021)

Foram revestidos 1 cm de um lado da barra e 5 cm do outro lado (área hachurada da Figura 12), sendo assim, a parte exposta e suscetível ao processo de corrosão totalizava 4 cm, visto que cada barra possuía 10 cm de comprimento. Após o procedimento de isolamento da área delimitada, as barras foram colocadas em recipiente fechado com sílica gel para secar, durante 60 minutos.

Para definir qual o tipo de revestimento utilizado no estudo, foram realizados alguns ensaios testes. Foram analisadas duas alternativas de revestimento das barras

de aço. Esse revestimento tem como função isolar partes da barra de aço, delimitando a área exposta e atacada pelos agentes agressivos durante os ensaios de PCA. Foram comparados dois tipos de revestimentos, resina epóxi (esmalte) e fita isolante líquida. Para ambos os tipos de revestimentos, foram analisadas diversas configurações de isolamento das barras de aço. Foram selecionadas 5 barras de aço para analisar 2 configurações de cada tipo de revestimento a fim de verificar qual revestimento forneceria maior isolamento diante da imersão na solução de NaCl, conforme a Figura 13: totalmente revestidas, revestida parcialmente (com a delimitação de área) e sem revestimento.

**Figura 13 - Avaliação dos revestimentos**



Fonte: Autor (2021)

As barras de aço foram imersas com seus revestimentos diretamente em contato com a solução de NaCl, onde permaneceram por 7 dias. Após esse período as amostras foram retiradas da solução e avaliadas visualmente a fim de definir qual seria utilizada no estudo. Os resultados desses testes estão apresentados na seção de testes preliminares nos resultados deste estudo. No entanto destaca-se que o revestimento que melhor desempenhou a função de isolamento frente a solução de NaCl foi de fita isolante líquida.

### 5.2.2. Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova, além dos traços, também foi utilizada a sequência de mistura das argamassas realizada por Moretti (2018) (Tabela 4).

**Tabela 4 - Sequência de mistura da argamassa**

<b>Etapas</b>	<b>Tempo</b>	<b>Tempo Acumulado</b>
Misturar agregados miúdos	1 minuto	1'
Adicionar 90% da água	30 segundos	1'30"
Misturar	30 segundos	2'
Parar e raspar laterais	30 segundos	2'30"
Ligar e adicionar cimento	30 segundos	3'
Misturar	30 segundos	3'30"
Parar e raspar laterais	30 segundos	4'
Ligar e adicionar 10 % de água e misturar	1 minuto	5'
Parar e raspar laterais	30 segundos	5'30"
Misturar	1 minuto e 30 segundos	7'

Fonte: Moretti (2018)

A primeira coluna da Tabela 4 apresenta as etapas do procedimento realizado, a segunda, o tempo de cada procedimento, e a terceira e última, o tempo acumulado para que fosse realizado um controle contínuo por cronômetro. A mistura foi realizada em uma argamassadeira com capacidade de 5 L e na velocidade lenta, conforme a Figura 14.



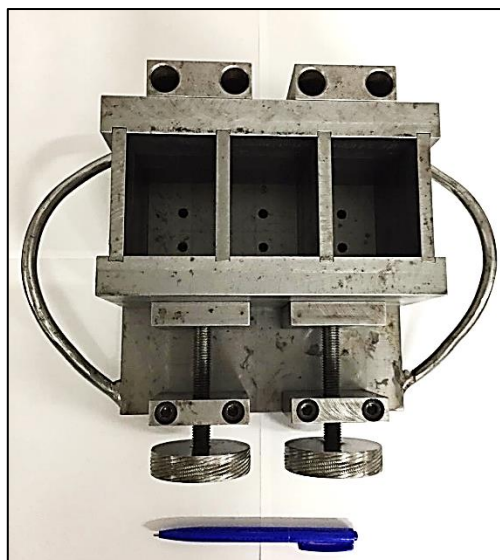
**Figura 14 - Processo de mistura na argamassadeira**



Fonte: Autor (2021)

Após a mistura, com o molde prismático (Figura 15) já preparado (passado óleo mineral, que tem função de desmoldante), e com as barras posicionadas, os corpos de prova foram moldados em duas camadas de argamassa, as quais foram adensadas por mesa vibratória por cerca de 10 segundos cada, até que eliminaram-se todas as bolhas da mistura, promovendo melhor distribuição da argamassa no molde e uma redução dos espaços vazios em seu interior.

**Figura 15 - Molde para corpo de prova prismático**

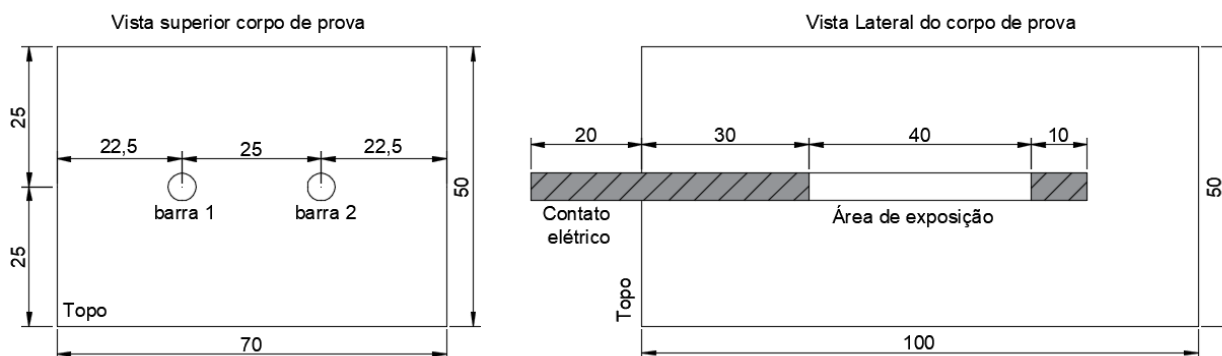


Fonte: Autor (2021)



O posicionamento das barras de aço no interior do corpo de prova foi realizado conforme o esquema da Figura 16. Além disso, essa figura também apresenta as dimensões dos corpos de prova confeccionados. Destaca-se a distância entre a superfície lateral dos corpos de prova e o centro das barras de aço de 2,5 cm.

**Figura 16 - Posicionamento das barras de aço no corpo de prova (mm)**



Fonte: Autor (2021)

Após o adensamento, os corpos de prova foram cobertos por plástico filme para que a água responsável pela hidratação do cimento não evaporasse. Em seguida, os corpos de prova foram levados à câmara seca ( $23 \pm 2$ ) °C, onde permaneceram durante 24 horas, até serem desmoldados.

Passadas as 24 horas destinadas à cura inicial dos corpos de prova, estes foram desmoldados e na sequência o contato elétrico foi preparado. A seguir está explicado como foi realizado o contato elétrico das amostras, que serviu para a realização das leituras de potencial de corrosão durante os experimentos.

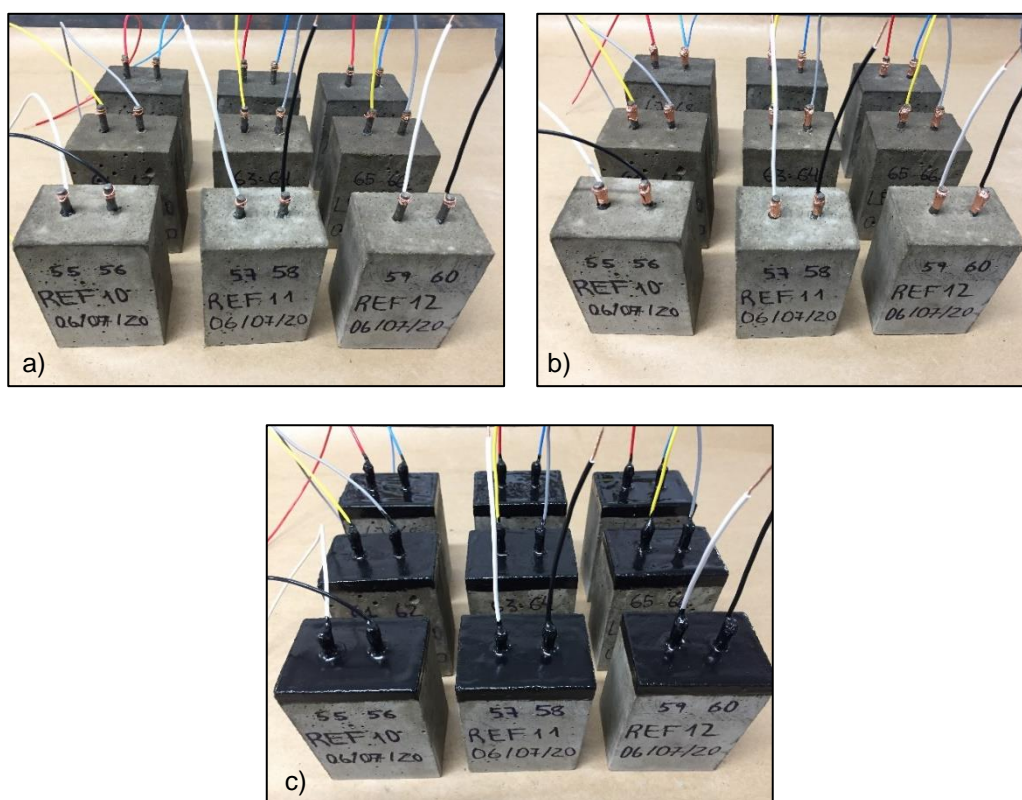
### **5.2.3. Potencial de circuito aberto**

Para realização do monitoramento do potencial de corrosão é necessário que seja preparado um circuito elétrico. E para isso, inicialmente foi feita a remoção da fita isolante líquida da ponta da barra que ficou saliente ao corpo de prova, além de passada uma lima na seção transversal para garantir a total remoção.

Após esse procedimento, foram amarrados cabos de fios de cobre de aproximadamente 20 cm de comprimento à ponta de cada barra de aço (Figura 17a). Após a conexão, os cabos foram envolvidos com fita de cobre, a qual possui função de fixação dos cabos na armadura para garantia do contato elétrico (Figura 17b).

Após o processo de fixação dos cabos de cobre nos eletrodos de trabalho (barras de aço), sobre a fita de cobre e o topo do corpo de prova, foi aplicada uma camada de fita isolante líquida para preservar o contato elétrico na presença de solução ácida no seu entorno e para assegurar que o mesmo não sofresse nenhuma interferência externa (Figura 17c). Além disso, a fita isolante líquida na parte superior do corpo de prova previne do ingresso da solução em uma região indesejada. Com isso, o ingresso de cloretos ficou restrito somente nas laterais e inferior dos corpos de prova, parte delimitada para o processo de corrosão acontecer, simulando a realidade de regiões suscetíveis a exposição salina.

**Figura 17 - Procedimento de montagem do contato elétrico**



Fonte: Autor (2021)

Após o contato elétrico, os corpos de prova foram movidos para um recipiente contendo solução saturada de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), onde permaneceram durante 28 dias para a cura úmida. Passados os 28 dias, foram iniciados os procedimentos de medição de potencial de corrosão. Este procedimento para os ensaios com ciclos de molhagem e secagem foram realizados de maneira distinta dos que não passaram por esses ciclos.

Os ciclos de molhagem e secagem foram realizados deixando os corpos de prova imersos em solução salina, durante três dias, e alternando com a secagem em estufa a  $50 \pm 5$  °C, durante quatro dias. Isso faz com que o processo corrosivo seja acelerado, pois faz com que ocorra a difusão do oxigênio e penetração de cloretos nos poros do concreto mais facilmente. A cada ciclo, a concentração de cloretos aumenta, pois inicialmente eles estão presentes na forma iônica e precipitam-se como sais nos poros do concreto (SILVA, 2006).

A solução agressiva utilizada, foi uma solução aquosa com 3,5% de cloreto de sódio (NaCl) em massa. Essa solução foi substituída a cada 4 ciclos, ou seja, aproximadamente uma vez por mês. O início das medições se iniciou após a retirada dos corpos de prova da solução de cura úmida.

No entanto, mesmo não sendo o principal intuito desse estudo, também foi realizada uma análise do comportamento dos potenciais durante o período de cura úmida dos corpos de prova em solução de hidróxido de cálcio, quando estes permanecem imersos totalmente na solução a fim de proporcionar ambiente que promova o restante das reações do cimento e atinja a resistência almejada. Para isso, foram avaliadas barras de aço embutidas em corpos de prova REF. Nesse ensaio a permanência dos corpos de prova em solução de hidróxido de cálcio se estendeu por mais de 28 dias, totalizando 70 dias, a fim de avaliar o comportamento dos potenciais após o período de cura úmida geralmente adotado para ensaios mecânicos. O ensaio foi realizado em duplicata, ou seja, foram analisadas duas barras de aço embutidas em corpo de prova moldado com mesmo traço. Os resultados desse ensaio estão apresentados na seção 6.5 Cura úmida, nos resultados do presente estudo.

Para os experimentos de PCA, o primeiro passo após a retirada da solução de hidróxido de cálcio (28 dias), foi realizar a pesagem dos corpos de prova e medição

do potencial de corrosão inicial, e logo após, transferi-los para uma estufa, onde se iniciou o semiciclo de secagem, seguido do semiciclo de molhagem, que ocorreu com a imersão do corpo de prova na solução de cloreto de sódio. Ao final de cada semiciclo, foi realizada uma leitura do potencial de corrosão de cada amostra de aço, conforme a Figura 18.

**Figura 18 - Medição de PCA utilizando multímetro de alta impedância**



Fonte: Autor (2021)

Para as medições foi utilizado um multímetro de alta impedância. Foi posicionada uma esponja umedecida com solução salina de NaCl, com concentração de 3,5%, a mesma solução utilizada para imersão do corpo de prova. Isso fez com que melhorasse a condutividade elétrica do ambiente, proporcionando medidas mais condizentes com o que esteve ocorrendo com o material ensaiado. Sobre a esponja, posicionou-se o eletrodo de referência na região central da parte exposta da barra, e este foi conectado ao multímetro pelo polo negativo (fio preto). Já o eletrodo de trabalho (barra de aço) foi conectado ao multímetro pelo polo positivo (fio vermelho). Para cada corpo de prova foram realizadas duas leituras, uma para cada amostra (barra de aço embutida). Com isso, constituiu-se uma célula eletroquímica para a realização do monitoramento do potencial de corrosão.

Considerando os intervalos estipulados pela *ASTM C876 - 15*, o ensaio seria finalizado quando dois ciclos consecutivos e completos de molhagem e secagem

apresentarem leituras de potencial de corrosão inferiores ao valor crítico para o estado de corrosão ativo, como realizado por Almeida (2013). No entanto, como o intuito principal desse estudo foi avaliar a técnica de potencial de circuito aberto, todos os ensaios utilizados para a avaliação dos parâmetros da técnica foram realizados até o período de 20 semanas, ou seja, 20 ciclos completos de molhagem e secagem. O critério de parada foi utilizado apenas para os ensaios em que o intuito foi avaliar o comportamento das barras de aço embutidas em diferentes matrizes cimentícias e determinar qual traço ofereceria melhores condições para as armaduras, no âmbito de protegê-las do ataque por cloretos e, conseqüentemente, do processo de corrosão.

Para analisar a influência do tipo de eletrodo de referência na técnica de potencial em circuito aberto, foram utilizados eletrodos de referência de mercúrio/óxido de mercúrio (Hg/HgO) e de calomelano saturado (ECS). Porém, como apresentado na revisão de literatura do trabalho, os intervalos de potencial balizados pela norma *ASTM C876 - 15* se referem ao eletrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>). Sendo assim, para analisar os resultados dos ensaios utilizando outros eletrodos de referência, os valores tabelados pela norma foram convertidos com base nos valores de potencial dos eletrodos de referência com relação ao eletrodo de hidrogênio padrão. O valor considerado de potencial do eletrodo de referência de Hg/HgO para conversão foi de -98 mV (vs Eletrodo de Hidrogênio Padrão). A conferência da conversão de potenciais realizada foi obtida colocando o ECS ligado ao eletrodo de Hg/HgO por meio de um eletrólito e aferida a diferença de potencial entre eles. Ao final da conversão dos potenciais, foram obtidos os valores apresentados nas Tabelas 5 e 6 para o eletrodo de referência de mercúrio/óxido de mercúrio e de calomelano saturado, respectivamente, os quais foram utilizados ao longo do estudo.

**Tabela 5 - Probabilidade de corrosão em função dos valores de PCA (Hg/HgO)**

<b>Probabilidade de corrosão</b>	<b>PCA para Eletrodo de Hg/HgO</b>	<b>Estado da Corrosão</b>
< 10%	PCA > 18 mV	Passivo
Incerta	-132 mV < PCA < 18 mV	Incerto
> 90%	PCA < -132 mV	Ativo

**Tabela 6 - Probabilidade de corrosão em função dos valores de PCA (ECS)**

<b>Probabilidade de corrosão</b>	<b>PCA para Eletrodo de ECS</b>	<b>Estado da Corrosão</b>
< 10%	PCA > -126 mV	Passivo
Incerta	-276 mV < PCA < -126 mV	Incerto
> 90%	PCA < -276 mV	Ativo

Fonte: Koga (2018)

Em se tratando dos corpos de prova que não sofreram ciclos de molhagem e secagem, os valores de potenciais das barras de aço foram medidos por uma placa controladora que simula um multímetro de multicanais, em que há uma entrada (eletrodo de referência) e seis saídas (eletrodos de trabalho). O controle do circuito foi realizado por meio de um programa desenvolvido no *software* livre Arduino IDE 1.8.8. Com isso, foi possível realizar uma leitura de diferença de potencial entre os eletrodos de trabalho e o eletrodo de referência a cada 10 minutos. Os dados foram acompanhados pelo monitor serial do programa e armazenados para serem analisados.

Esse monitoramento foi realizado até 140 dias, ou seja, as mesmas 20 semanas estipuladas para os ensaios com ciclos, para facilitar a comparação dos resultados e destacar a principal influência de cada parâmetro.

Ambos os sistemas de leituras também foram comparados a fim de fornecer informações sobre as vantagens e desvantagens da utilização de cada sistema, e, portanto, esta comparação também compõe os resultados do presente estudo.

A imersão dos corpos de prova foi realizada de duas maneiras, uma com os corpos de prova totalmente imersos em solução de cloreto de sódio, sem que ultrapasse o topo para evitar o ingresso de cloretos por uma área indesejada (parte superior do corpo de prova). Outra maneira de imergi-los na solução avaliada foi de modo parcial, cobrindo os corpos de prova até a metade da sua altura.

A partir dos resultados dos ensaios de PCA com imersão total e parcial na solução de NaCl, com e sem o ciclo de envelhecimento acelerado e utilizando diferentes tipos de eletrodo de referência, foi possível realizar diversas comparações

e definir, dentre eles, qual é a melhor combinação desses parâmetros para a realização da técnica de PCA, visando resultados mais rápidos e mais precisos.

Além disso, foi realizado um ensaio isolado para verificar variação da massa dos corpos para cada traço de até o final dos experimentos, em decorrência do acúmulo de NaCl nos poros dos corpos de prova, com aferições após cada semiciclo.

### 5.3 Ensaio acelerado de carbonatação

A profundidade de carbonatação foi aferida por meio do ensaio acelerado de carbonatação. Este ensaio foi realizado moldando corpos de prova cilíndricos de argamassa de 10x15 cm para os traços REF, LETA e ACBC da Tabela 3 e utilizando o procedimento de amassamento apresentado na Tabela 4. A opção pelos corpos de prova cilíndricos foi por conta de apresentarem profundidade de carbonatação maior em comparação aos corpos de prova prismáticos. Isso acontece pelo fato de que a difusão de CO<sub>2</sub> ocorre de maneira radial nos corpos de prova, sendo assim é possível a soma dos vetores na difusão do gás carbônico (ALMEIDA, 2013). Os corpos de prova foram moldados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015), com 4 camadas de argamassa, aplicando 30 golpes com soquete em cada camada, com os moldes previamente untados com óleo desmoldante. E após a moldagem, uma lâmina de vidro foi utilizada para que os corpos de prova não perdessem água de amassamento, além de promover uma superfície sem imperfeições (Figura 19).

**Figura 19 - Moldagem de corpos de prova cilíndricos**



Fonte: Autor (2021)

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram levados a câmara seca ( $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), onde permaneceram por 24 horas, até a desmoldagem. Seguido da desmoldagem, os corpos de prova foram identificados e levados para um recipiente com solução de hidróxido de cálcio saturada, onde permaneceram por 28 dias para o processo de cura úmida. Após a cura úmida, os corpos de prova passaram por um período de pré-condicionamento, com o intuito de padronizar a umidade e a temperatura dos mesmos antes de dar início ao ensaio de carbonatação acelerada. Esta etapa consistiu em levar os corpos de prova a estufa para secagem a  $50 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 7 dias até o atingirem a constância de massa. Após o esse período, os corpos de prova foram armazenados em câmara seca ( $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) com umidade relativa de  $60\% \pm 5\%$ , para completar o período de pré-condicionamento e obter uma padronização da temperatura e umidade relativa das amostras, por 5 dias.

Após o período de pré-condicionamento, ou condicionamento preliminar, os corpos de prova foram levados a câmara de carbonatação, conforme ilustra a Figura 20, onde permaneceram até alcançadas as idades para rompimento e aferição das profundidades de carbonatação.

**Figura 20 - Câmara de carbonatação com corpos de prova**



Fonte: Autor (2021)

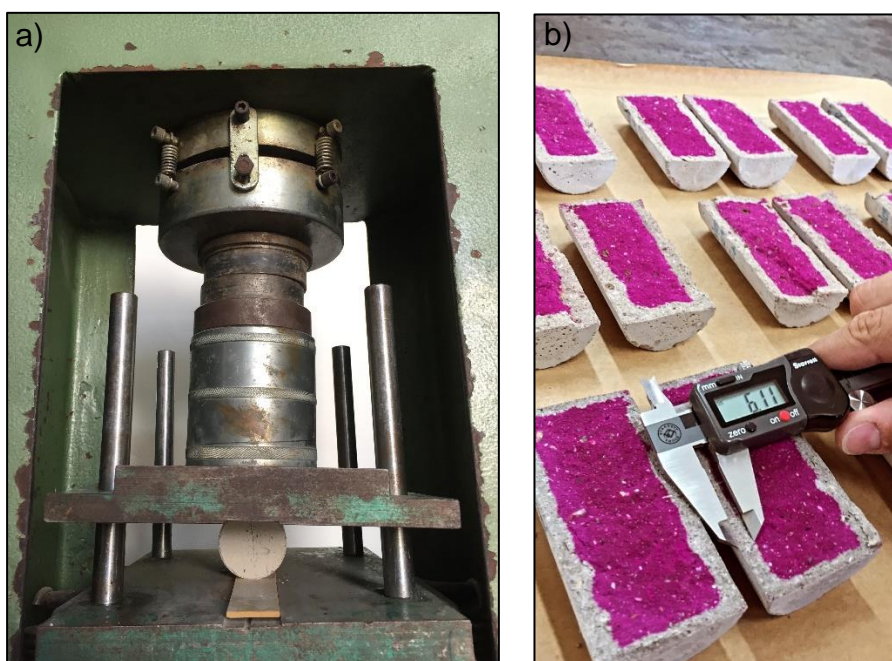


O teor de CO<sub>2</sub> foi mantido constante de 15% ± 5%, a umidade relativa do ar no interior da câmara de carbonatação foi controlada e mantida entre 60% e 85% e a temperatura foi de 23°C ± 1°C. As profundidades foram aferidas nas idades de 7, 14, 28, 56, 84, 112 e 140 dias para cada traço de argamassa utilizado nesse estudo (REF, LETA e ACBC).

No total, foram analisados 3 corpos de prova para cada idade de cada traço em estudo, totalizando 63 corpos de prova. O rompimento dos corpos de prova aconteceu por compressão diametral, com isso foram obtidas duas faces de cada corpo de prova. De cada face, foram aferidas três medidas de profundidade de carbonatação de cada lado do corpo de prova, totalizando seis medidas em cada face. Sendo assim cada corpo de prova possuiu 12 aferições de profundidade de carbonatação.

Para verificar a profundidade de carbonatação após o rompimento (Figura 21a), foi utilizado o método colorimétrico com solução de fenolftaleína, seguindo as recomendações de RILEM (1984). A aplicação da solução ocorreu sobre cada face de cada corpo de prova, logo após o rompimento dos corpos de prova, conforme a Figura 21b.

**Figura 21 - Rompimento dos CPs e aferição de profundidade de carbonatação**



Fonte: Autor (2021)

As medições das profundidades de carbonatação foram realizadas utilizando um paquímetro digital e armazenadas em banco de dados para seu tratamento e obtenção dos resultados. Os resultados dos ensaios de carbonatação foram tratados estatisticamente por meio de análise de variância. Outra análise estatística realizada foi o Teste de Tukey, para verificar se as comparações entre os parâmetros em estudo apresentavam resultados estatisticamente diferentes e significativos.

#### **5.4 Ensaio de Penetração de Cloretos**

A penetração de cloretos foi analisada por meio da aspersão de solução indicadora sobre as superfícies dos corpos de prova de cada traço em estudo (REF, LETA e ACBC), após o rompimento diametral. Como solução indicadora, foi utilizada uma solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) que faz com que ocorra a formação de zonas brancas e marrons com um limite claro entre as diferentes cores (HE *et al.*, 2012). A coloração mais clara representa a profundidade de penetração dos cloretos enquanto a região mais escura representa a área livre de cloretos.

Este ensaio foi realizado em corpos de prova cilíndricos de argamassa de 10x15 cm para os traços REF, LETA e ACBC da Tabela 3 e utilizando o procedimento de mistura apresentado na Tabela 4.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada utilizando o mesmo procedimento dos corpos de prova destinados ao ensaio de carbonatação acelerada, segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015), com 4 camadas de argamassa, aplicando 30 golpes com soquete em cada camada, com moldes previamente untados com óleo desmoldante. E após a moldagem, também foi utilizada uma lâmina de vidro para impedir a perda da água de amassamento e evitar imperfeições na superfície dos corpos de prova.

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram levados a câmara seca ( $23 \pm 1$  °C) onde permaneceram por 24 horas, para a cura inicial até a desmoldagem. Seguido da desmoldagem, os corpos de prova foram identificados e levados para um recipiente com solução de hidróxido de cálcio saturada, onde permaneceram por 28 dias para o processo de cura úmida.

Após o processo de cura úmida, os corpos de prova foram levados para a estufa a  $50 \pm 5$  °C onde permaneceram por 7 dias, até ficarem completamente secos (Figura 22). Após a secagem os corpos de prova foram imersos em solução de NaCl com a concentração de 3,5 %, em massa, com o intuito de simular a concentração da água em ambientes marinhos.

**Figura 22 - Corpos de prova em estufa ( $50 \pm 5$  °C)**



Fonte: Autor (2021)

As argamassas foram analisadas nas idades de 3, 7, 14, 21, 28 e 56 dias. Além disso, foram analisadas imersas parcialmente e totalmente na solução salina. Para esse ensaio, foram moldados dois corpos de prova de cada traço para cada idade, um destinado a imersão parcial e outro para total. Os corpos de prova imersos parcialmente em solução passaram por ciclos de molhagem e secagem, a fim de simular a melhor combinação diante dos resultados obtidos durante os ensaios de PCA.

Para verificar a penetração de cloretos, após o rompimento dos corpos de prova, foi aspergida a solução de nitrato de prata. A aplicação da solução ocorreu sobre cada face de cada corpo de prova (Figura 23). Após a aplicação da solução, os corpos de prova foram expostos a secagem natural para que as medidas de

profundidade de penetração de cloretos pudessem ficar mais visíveis e serem coletadas (HE *et al.*, 2012).

**Figura 23 – Corpos de prova após aplicação da solução de nitrato de prata**



Fonte: Autor (2021)

As medidas de penetração de cloretos foram realizadas da mesma maneira que no ensaio de carbonatação, utilizando um paquímetro digital e armazenadas em banco de dados para o tratamento e obtenção dos resultados.

Os resultados do ensaio de penetração de cloretos também foram tratados estatisticamente por meio de análise de variância. Outra análise estatística também utilizada foi o Teste de Tukey, para verificar se, de fato, as comparações entre os parâmetros em estudo apresentavam resultados estatisticamente diferentes e significativos.

O próximo capítulo trata dos resultados obtidos durante o desenvolvimento desta pesquisa.

## 6. Resultados e discussão

Neste capítulo estão apresentados os resultados do presente estudo. Além dos resultados quantitativos, também é importante destacar as melhorias da técnica no que diz respeito aos aparatos utilizados e aos procedimentos adotados para a realização dos ensaios. Antes dos ensaios de PCA, foram realizados alguns testes para garantir que o procedimento fosse realizado de maneira correta. Portanto, serão apresentadas também algumas alterações implementadas para a execução dos ensaios de PCA a fim de aprimorar seus procedimentos.

### 6.1 Caracterização química do aço

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre a caracterização química do aço do presente estudo com a de outros autores da literatura. A caracterização química do aço foi realizada por espectrometria de emissão óptica por centelha (S-OES).

Tabela 7 - Caracterização química do aço (%)

Elemento	Autor				Desvio Padrão
	Hemkemeier	Moretti	Rezende	Helene	
Fe	<b>98,75</b>	98,69	99,10	99,05	0,21
C	<b>0,12</b>	0,15	0,05	0,12	0,04
Mn	<b>0,43</b>	0,66	0,38	0,78	0,19
P	<b>0,02</b>	0,02	0,03	0,02	0,00
S	<b>0,03</b>	0,02	0,04	0,03	0,01
Si	<b>0,09</b>	0,21	0,08	-	0,07
Cr	<b>0,08</b>	0,09	0,08	-	0,01
Ni	<b>0,09</b>	0,04	0,06	-	0,03
Mo	<b>0,01</b>	0,01	0,01	-	0,00
Cu	<b>0,20</b>	0,12	0,17	-	0,04

Fonte: Moretti (2018); Rezende (2019); Helene (1993)

Com base no desvio padrão que fornece a dispersão entre os valores percentuais de composição dos elementos de diferentes estudos, percebe-se que existem diferenças entre as composições químicas de cada autor. O principal motivo dessa variação é a heterogeneidade do aço da construção civil, pois até no mesmo lote, existe variação na composição química do aço. Esse fator pode implicar na formação de regiões anódicas e catódicas dentro de uma mesma barra de aço, favorecendo o processo de corrosão (RIBEIRO; CUNHA, 2018).

## 6.2 Testes preliminares para a técnica de PCA

Nesta seção, discutiu-se sobre alguns testes necessários para dar início aos procedimentos experimentais de PCA. Com base nesses testes, foi possível adotar as melhores maneiras de executar os ensaios do presente estudo e aprimorar os procedimentos adotados.

### 6.2.1. Validação das barras de aço

O critério de validação do lote das barras de aço adquiridas para o estudo foi o mesmo utilizado por Ribeiro (2010), o qual utilizou barras de aço que diferiram no máximo 2% do valor médio obtido. Os valores de potenciais provenientes da avaliação das barras de aço utilizadas nesse estudo estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Potenciais aferidos das barras de aço**

<b>Barra</b>	<b>Potencial (mV)</b>	<b>Barra</b>	<b>Potencial (mV)</b>
1	700	7	705
2	698	8	698
3	697	9	702
4	699	10	696
5	701	11	691
6	699	12	702

Fonte: Autor (2021)

A média dos potenciais aferidos foi de 699 mV e o desvio padrão entre as medidas foi de 3,54 mV, enquanto o coeficiente de variação obtido a partir da relação entre o desvio padrão e a média foi de 0,51%. A maior variação aconteceu na barra 11 que apresentou diferença de 1,16% do valor médio.

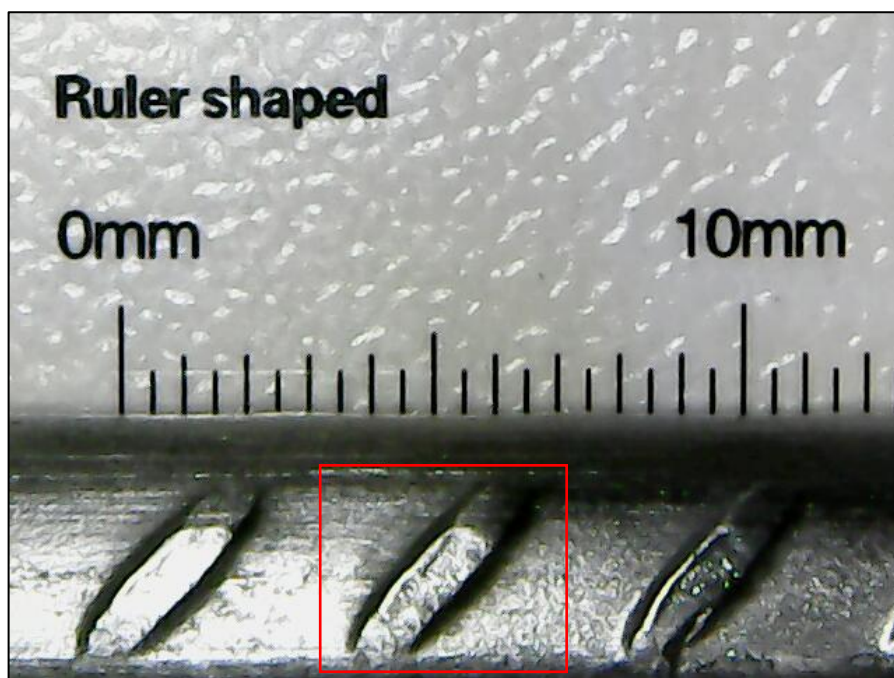
Portanto, analisando os resultados desse ensaio, percebeu-se que nenhuma das barras diferiu mais do que 2% do valor médio, sendo assim, não foram detectadas irregularidades e não-uniformidades perante essa análise, validando a utilização do lote de barras de aço no presente estudo, sem que interferissem nos resultados.

### 6.2.2. Avaliação da limpeza das barras de aço

Para averiguar se o método de limpeza, com base na *ASTM G1-03* seria eficiente para a realização do presente estudo, a limpeza foi avaliada qualitativamente por meio de imagens ampliadas em 1000x.

A localização das imagens extraídas da microscopia realizada para avaliação qualitativa da qualidade da limpeza das barras de aço está apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Localização da ranhura da barra de aço analisada



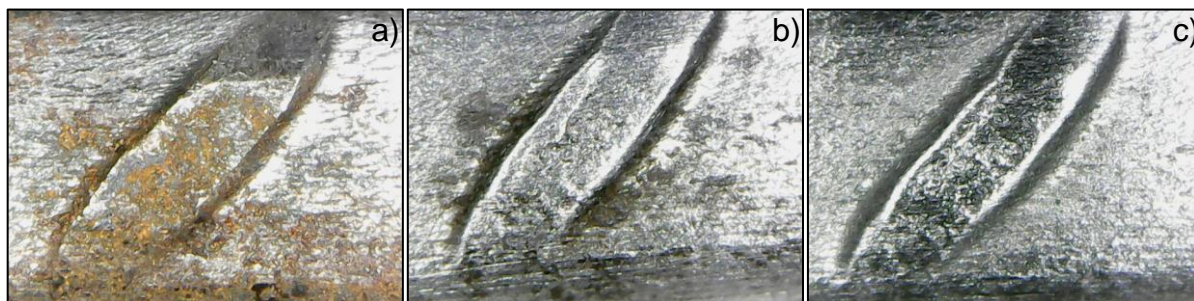
Fonte: Autor (2021)



Definiu-se como uma limpeza eficiente, aquela que eliminasse, em sua totalidade, os óxidos remanescentes na superfície das barras de aço.

Conforme a Figura 24, percebe-se que as imagens extraídas dão destaque a uma ranhura da barra de aço. O local foi definido por conta de promover fácil deposição de óxidos em virtude de possíveis falhas na estrutura do aço nessas regiões. A Figura 25 apresenta as imagens extraídas do microscópio digital com ampliação de 1000x.

**Figura 25 - Microscopia para avaliação de limpeza (1000x): a) Material sem limpeza; b) Material após aplicação de acetona; c) Material após limpeza completa**



Fonte: Autor (2021)

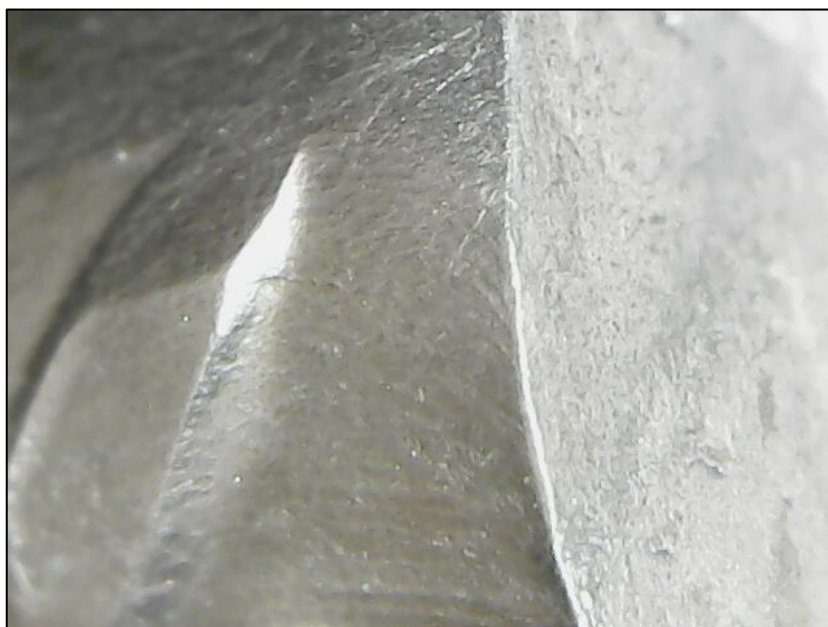
As imagens foram coletadas de três etapas da limpeza realizada segundo a *ASTM G1-03*. Primeiramente, a Figura 25a, é uma imagem da barra de aço sem nenhum procedimento de limpeza, retirada diretamente do local no qual encontrava-se armazenada. Nota-se a presença de grande quantidade de óxidos nessa barra de aço, representada pela coloração em tonalidades quentes. Já a Figura 25b, representa a barra de aço após passar pela limpeza por bucha e imersão em acetona. A bucha auxiliou na remoção de grande parte dos óxidos presentes na superfície, enquanto a acetona teve como função, a remoção da gordura superficial das barras. Nessa etapa percebeu-se que a camada mais espessa de óxidos foi removida, porém ainda restaram alguns pontos que podem ser resquícios de óxidos. Por fim, a Figura 25c apresenta a etapa final de limpeza, que consiste em imergir as barras de aço em solução de ácido clorídrico (HCl) e hexametilenotetramina, seguido da secagem e nova limpeza por meio da bucha. Nessa etapa percebeu-se que ocorreu a limpeza



total da barra de aço, sem que houvesse óxidos para interferirem nos resultados dos ensaios realizados durante o estudo.

Para validar as imagens apresentadas, também foram destacadas extremidades da barra de aço, regiões que unem a lateral da barra à seção da mesma (Figura 26). Essa região foi escolhida pelo fato de também possuir imperfeições na estrutura, que favorecem a deposição de óxidos e dificultam a limpeza das barras de aço.

**Figura 26 - Extremidades da barra de aço (1000x)**



Fonte: Autor (2021)

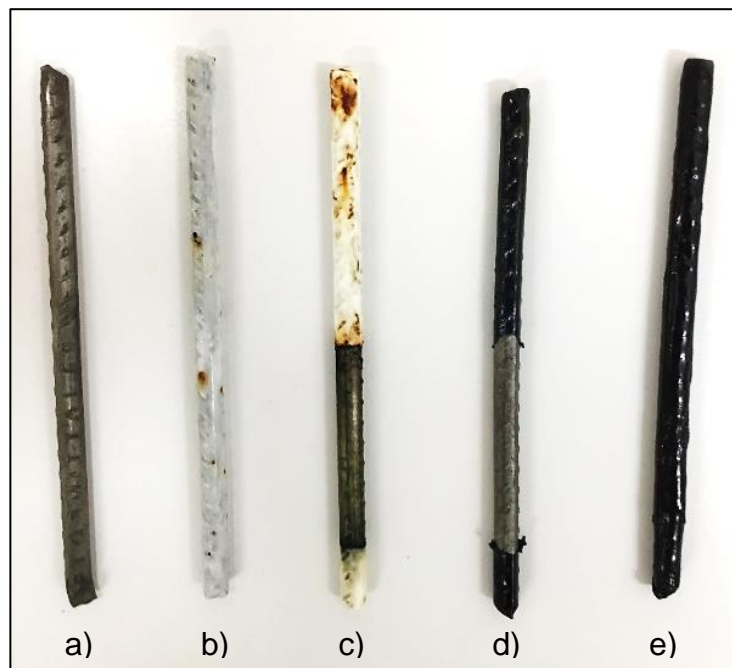
Com base nas imagens ampliadas, percebeu-se que, conforme as etapas de limpeza das barras se concretizaram, os óxidos foram removidos, caracterizando um procedimento adequado para ser realizado antes de embutir as barras de aço nos corpos de prova de argamassa. Com os resultados visuais apresentados por essa análise, essa técnica de limpeza foi designada para todos os experimentos que envolviam a utilização de barras de aço.

### 6.2.3. Revestimento das barras de aço

Antes da realização dos ensaios de PCA, também foram realizados testes com os tipos de revestimento das barras de aço, a fim de definir o tipo de revestimento que garantisse o total isolamento das regiões não expostas a solução de NaCl, direcionando a corrosão a uma região específica das barras de aço.

A Figura 27 apresenta os resultados do teste de revestimento das barras de aço após 7 dias imersas em solução de NaCl com concentração de 3,5%, teste no qual foram comparados revestimentos de resina epóxi e fita isolante líquida, em diferentes configurações.

**Figura 27 - Comparação entre revestimentos das barras de aço: a) Totalmente exposta; b) Totalmente revestida (resina epóxi); c) Revestida parcialmente (resina epóxi); d) Revestida parcialmente (fita isolante líquida); e e) Revestida totalmente (fita isolante líquida)**

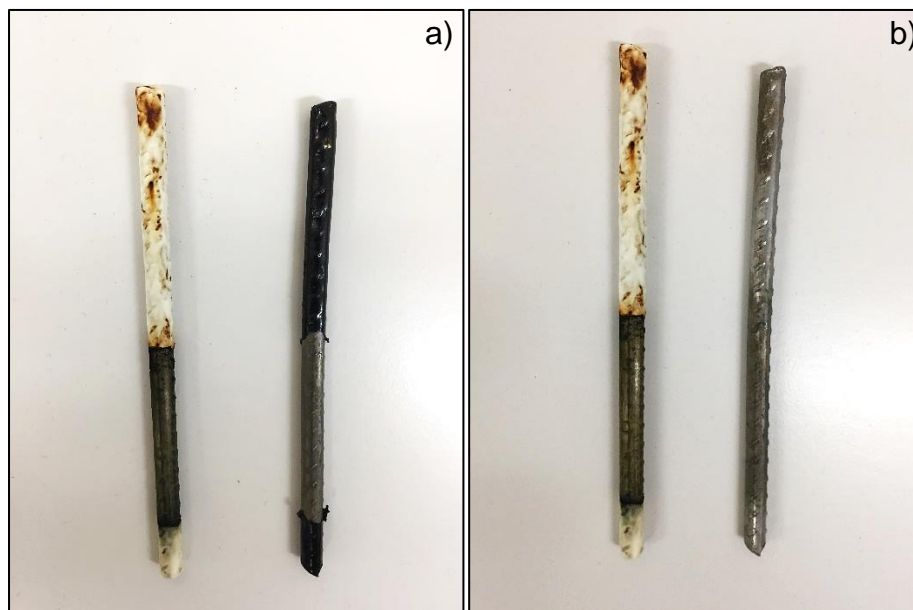


Fonte: Autor (2021)

A barra a), representa a barra de aço totalmente exposta à solução salina. A barra b) representa a configuração totalmente revestida com resina epóxi (esmalte). Nessa configuração percebeu-se que mesmo com a barra totalmente isolada,

surgiram alguns pontos de corrosão ao longo da barra de aço. Esse fato pode ser por conta de algum metal presente na composição da resina e que pode formar regiões com diferença de potencial entre a resina e a barra de aço, facilitando o início do processo de corrosão. As barras c) e d) foram revestidas conforme a configuração utilizada no presente estudo, porém, a c) com resina epóxi e a d) com fita isolante líquida. Percebeu-se que a barra c) apresentou pontos de corrosão semelhantes a barra b), por conta do mesmo motivo, enquanto a barra d) não apresentou nenhum ponto de corrosão na região isolada da barra. Já a barra e) foi revestida com fita isolante líquida totalmente e não apresentou nenhum ponto de corrosão ao longo do seu comprimento. A Figura 28 apresenta as barras revestidas com resina epóxi e fita isolante líquida na configuração utilizada nesse estudo.

**Figura 28 - Comparação dos revestimentos das barras revestidos parcialmente: a) antes da remoção da fita isolante líquida; b) após a remoção da fita isolante líquida**



Fonte: Autor (2021)

Na Figura 28a as barras de aço ainda estavam revestidas e na Figura 28b, a fita isolante líquida foi completamente removida. Com isso, foi possível perceber que a resina epóxi favoreceu a formação de óxidos na barra de aço, enquanto a barra de aço revestida com fita isolante líquida apresentou apenas um sinal de escurecimento

na região exposta diretamente à solução salina. Além disso, após remover a fita isolante líquida da barra totalmente revestida, percebeu-se grande diferença se comparada a barra totalmente exposta, resultando em um isolamento eficiente da armadura (Figura 29). No entanto, observando a barra de aço isolada totalmente com resina epóxi, foi possível notar pontos de deposição de óxidos, oriundos de possíveis falhas no isolamento ou ainda decorrentes de possíveis reações entre substâncias metálicas que podiam estar presentes na composição da resina.

**Figura 29 - Comparação entre barra totalmente exposta e isolada (fita isolante)**



Fonte: Autor (2021)

Sendo assim, para a delimitação da área de exposição das armaduras à solução salina, foi utilizada a fita isolante líquida. Destaca-se que as barras estavam diretamente em contato com o cloreto, e por isso o ensaio foi executado em um período curto, de 7 dias.

#### **6.2.4. Ensaio Preliminar de PCA**

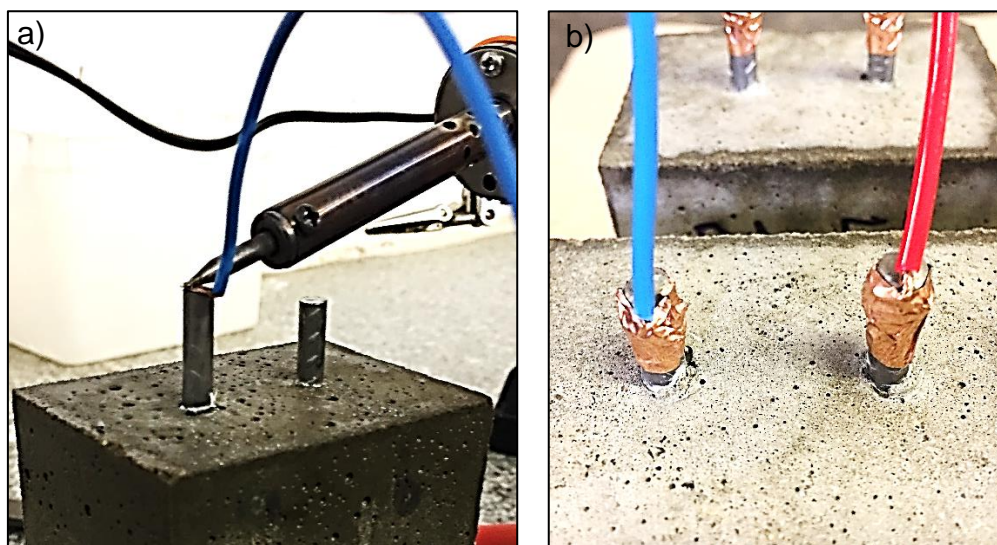
Por meio de um ensaio preliminar de PCA, foi possível se familiarizar com a técnica e identificar formas de aprimorá-la para os próximos ensaios.

Deste modo, o molde confeccionado pelo autor para a delimitação da área da barra de aço a ser exposta apresentou extrema utilidade, pois foi confeccionado com as medidas adotadas para delimitação da área, e com isso, otimizou o processo de revestimento com fita isolante líquida, das barras de aço. Esse molde, por conter uma dobradiça e um feixe, facilitou o processo de manuseio do aparato e, conseqüentemente, o revestimento das barras, evitando o contato direto nas mesmas, visto que as barras na etapa de delimitação da área de exposição, já passaram pelo processo de limpeza com solução de ácido clorídrico e hexametilenotetramina, além de acetona. Após a limpeza das barras de aço, elas já se encontram em uma etapa em que não é permitido o contato direto com as mãos, uma vez que pode contaminar novamente o material e exigir nova limpeza.

Com relação ao procedimento de contato elétrico entre os cabos de cobre e o eletrodo de trabalho (barra de aço), este sofreu uma modificação com relação ao primeiro ensaio realizado. No ensaio preliminar, a conexão entre esses dois componentes foi realizada por meio de solda. No entanto, para realizar a soldagem foi necessário aquecer a barra de aço a fim de garantir que a solda e a barra de aço se conectassem perfeitamente e isso fazia com que as barras de aço adquirissem uma coloração que indicava um superaquecimento (coloração escura). Além disso, o processo de soldagem era complexo e consumia bastante tempo.

E como um dos objetivos desse estudo foi aprimorar a técnica de PCA, em virtude das conseqüências que esse aquecimento poderiam causar, além das dificuldades apresentadas durante a soldagem, podendo ocasionar uma possível interferência nos resultados do experimento, optou-se por, nos próximos ensaios, estabelecer um contato apenas por meio da amarração dos cabos de cobre envolvidos por fita de cobre. A Figura 30 apresenta o contato elétrico como foi realizado no primeiro ensaio (Figura 30a) e como foi realizado nos ensaios subsequentes (Figura 30b).

Figura 30 - Contato elétrico antigo (a) e atual (b)



Fonte: Autor (2021)

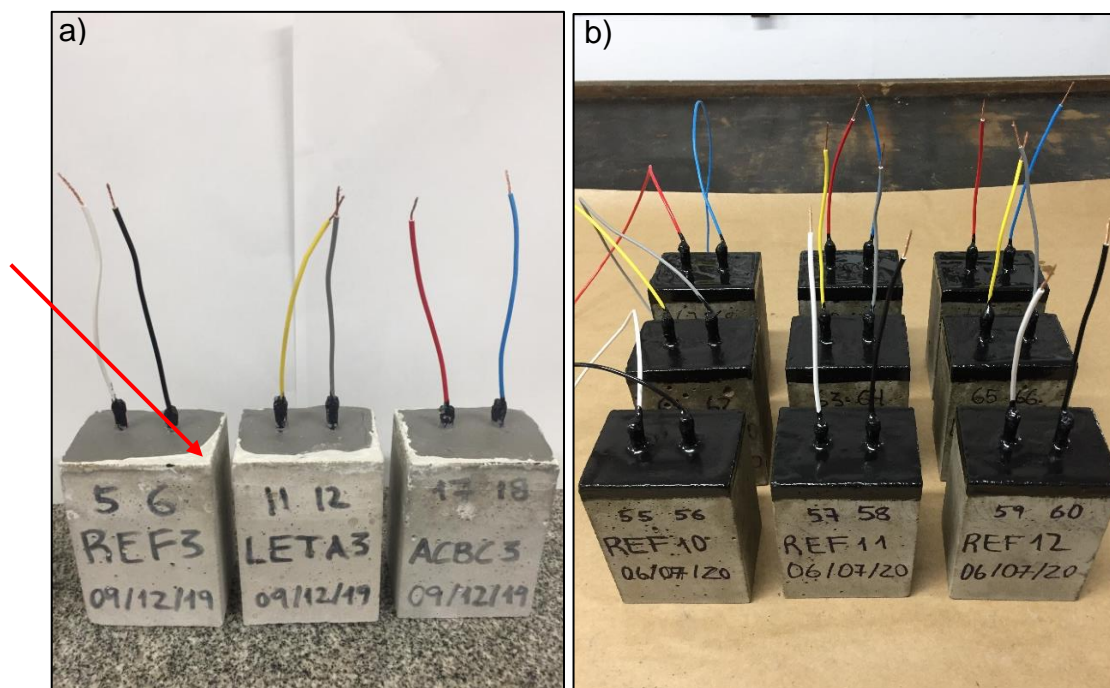
Sendo assim, com a alteração do procedimento de contato elétrico, garantiu-se nenhuma influência do mesmo nos resultados dos ensaios de potencial em circuito aberto em função do aquecimento das barras de aço.

Outra modificação realizada para o desenvolvimento dos ensaios desse estudo foi com relação ao procedimento de isolamento da parte superior do corpo de prova, procedimento executado a fim de evitar o ingresso de solução através da parte superior do corpo de prova e afetar nos resultados dos ensaios.

Preliminarmente, esse isolamento havia sido realizado utilizando massa plástica. No entanto, pelo fato de que a massa plástica é um produto químico inflamável, e que pode afetar o sistema respiratório durante o seu manuseio, causando danos à saúde, optou-se por utilizar a fita isolante líquida para realizar esse isolamento. Portanto, além de ser utilizada no isolamento das barras de aço, a fita isolante líquida foi utilizada para isolar a superfície dos corpos de prova. A Figura 31 apresenta a diferença entre o isolamento preliminar e o isolamento utilizado no estudo.



Figura 31 - Isolamento preliminar (a) e isolamento utilizado (b)



Fonte: Autor (2021)

Além de garantir a integridade da saúde de quem manuseia o experimento, com a utilização da fita isolante líquida foi possível revestir os cantos vivos dos corpos de prova, regiões de fácil acesso da solução, quando os CPs estão imersos totalmente na mesma. Observando a Figura 31a percebeu-se que existia um sinal de penetração nos cantos dos corpos de prova, destacados com uma coloração mais clara. Portanto, para evitar a contaminação com solução na parte superior dos corpos de prova, os mesmos foram revestidos com fita isolante líquida na face superior e nos primeiros 5 mm das laterais, conforme Figura 31b.

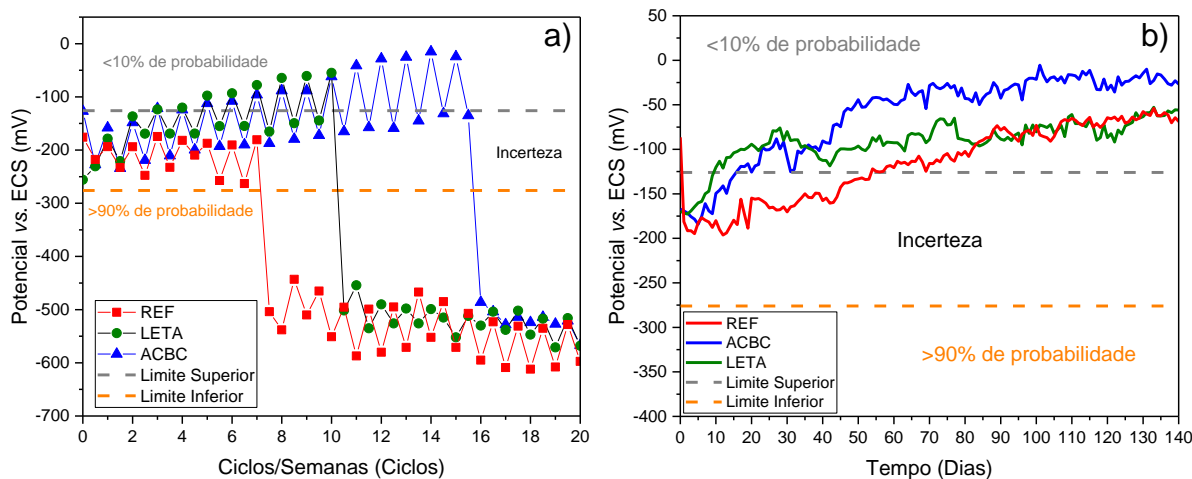
### 6.3 Multímetro de alta impedância x Arduino

Neste estudo, foram analisados dois sistemas de coleta de dados durante a aplicação da técnica de PCA. O sistema de medição de potencial por multímetro de alta impedância foi comparado com um sistema de medição de potencial por Arduino.

A Figura 32 apresenta a comparação de resultados de ensaios utilizando os dois sistemas de medição, onde Figura 32a corresponde ao sistema de medição por

multímetro, enquanto a Figura 32b representa os resultados obtidos por Arduino. Para essa análise, as leituras por multímetro foram realizadas em ensaio com ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial dos corpos de prova, enquanto as leituras por Arduino foram realizadas em ensaio sem ciclos e imersão total.

**Figura 32 - Comparação entre resultados de ensaios com multímetro (a) e Arduino (b)**



Fonte: Autor (2021)

Analisando a Figura 32a (ensaio com ciclos e imersão parcial), percebeu-se que ocorreram picos de potencial ao longo do ensaio. Esses picos são decorrentes da alternância entre os ciclos, devido ao teor de umidade dos CPs e alta resistividade apresentada pelos CPs secos, dificultando a movimentação dos íons. Essa influência pode ser justificada pela queda ôhmica do concreto, que segundo Cascudo (1997), é uma queda que ocorre no potencial de corrosão em função da alta resistividade do meio (concreto), que fica entre o eletrodo de referência e o eletrodo de trabalho (barra de aço). Por outro lado, o ensaio realizado sem ciclos e com imersão total dos CPs em solução (Figura 32b), não apresentou o mesmo comportamento por conta da não existência de ciclos de molhagem e secagem, mantendo constante o teor de umidade dos CPs.

Por meio desses ensaios, observou-se que as medições por multímetro são mais indicadas para ensaios com ciclos de molhagem e secagem, enquanto a medição por Arduino é mais interessante em ensaios sem ciclos de molhagem e



secagem por conta do processo de montagem do sistema. Os ciclos exigem que os corpos de prova sejam manuseados para a estufa e para a solução e isso faz com que a praticidade do sistema de medição por multímetro seja mais atrativa.

Como esses resultados foram apresentados apenas para destacar a diferença entre os dois sistemas de leituras, não será discutido o comportamento de cada barra de aço nessas situações. Essa discussão será abordada nos tópicos referentes às análises de parâmetros propostos por esse estudo, Ciclos de Molhagem e Secagem e Imersão Total x Imersão Parcial das amostras em solução de NaCl.

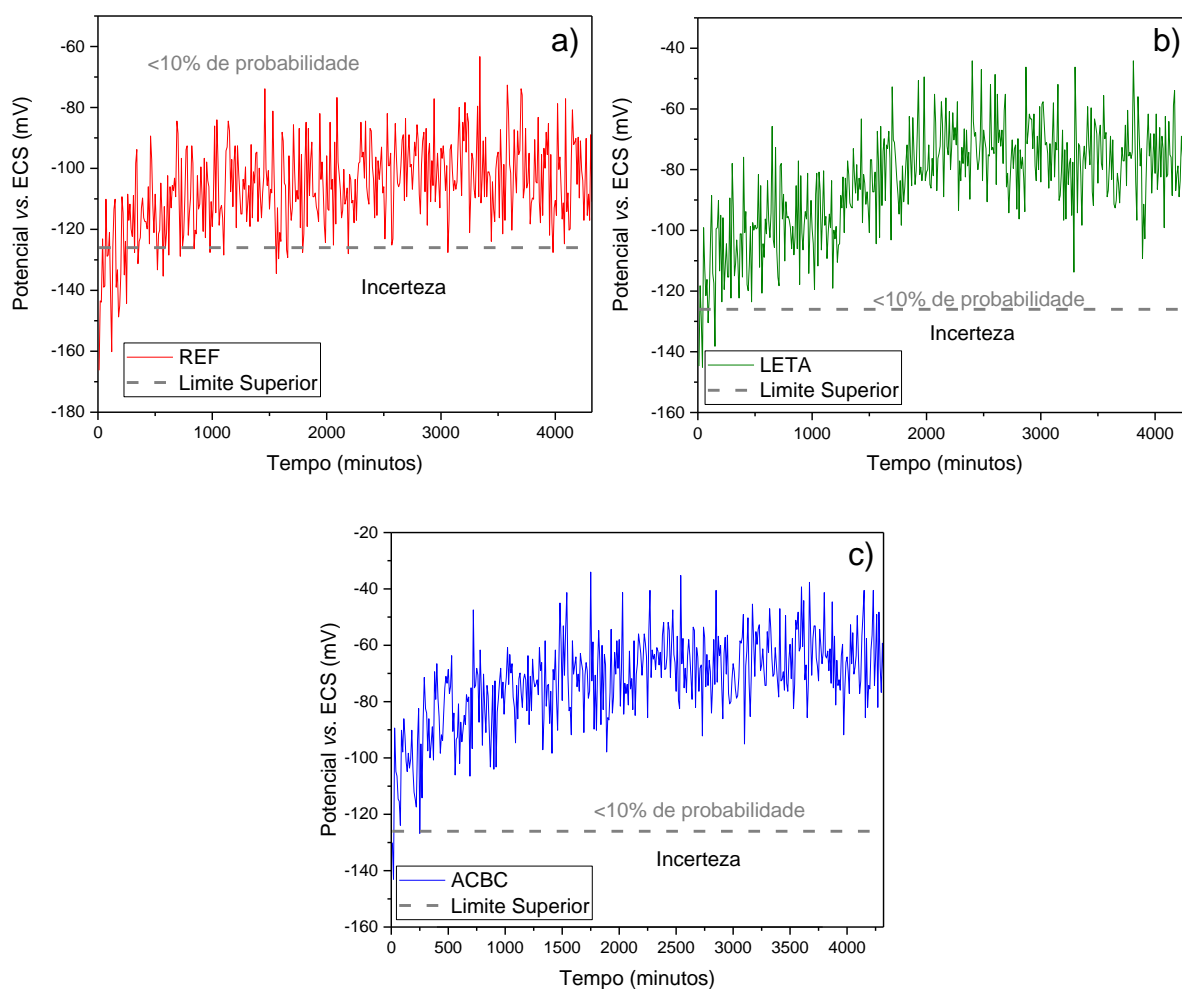
Com relação aos resultados, ambos se provaram eficientes, porém é importante ressaltar que utilizando o Arduino para as medições, é possível a obtenção de mais dados de potenciais durante o ensaio, permitindo uma análise de todo período em que os corpos de prova ficam imersos na solução e conectados ao sistema. Por isso, mesmo o multímetro sendo mais indicado para ensaios com ciclos, esses ensaios também podem ser realizados utilizando Arduino para as leituras.

Salienta-se que no sistema de medição com Arduino com ciclos de molhagem e secagem, os potenciais são aferidos somente quando os corpos de prova são direcionados aos ciclos de molhagem. A leitura do início do semiciclo de molhagem equivale a leitura após a estufa e a leitura do final desse semiciclo é equivalente a leitura após a imersão em solução salina. Além disso, a duração do semiciclo de molhagem é de 3 dias, ou aproximadamente 4320 minutos, tempo em que foram computadas as leituras a cada 10 minutos, apresentadas na Figura 33.

Verificou-se que, utilizando o Arduino para as aferições de potenciais em ensaios com ciclos de molhagem e secagem, foi possível observar o comportamento dos potenciais desde o momento em que os corpos de prova entram em contato com a solução e sua evolução até o final do semiciclo de molhagem. Com isso, foi possível verificar que os potenciais iniciam mais negativos quando estão secos, e no decorrer do semiciclo, se estabilizam, passando de um regime transiente para um regime estacionário, justificando o comportamento dos potenciais em ensaios medidos por multímetro, quando apresentam picos entre as medições após a estufa e após a imersão em solução salina. Esse comportamento está relacionado a queda ôhmica que ocorre por conta da maior resistividade do concreto durante os semiciclos secos.

Com os corpos de prova úmidos a resistividade tende a diminuir e com isso são aferidos valores de potenciais mais próximos do que está realmente ocorrendo com as armaduras. Esse comportamento aconteceu para os três traços em estudo, conforme a Figura 33.

**Figura 33 - Potenciais medidos durante o semiciclo de molhagem em REF (a), LETA (b) e ACBC (c)**



Fonte: Autor (2021)

Com o corpo de prova seco, os íons tem maior dificuldade de movimentação devido ao teor de umidade dos CPs e alta resistividade apresentada, já os corpos de prova úmidos apresentam potenciais mais próximos do que está realmente ocorrendo com as barras de aço (ALMEIDA *et al.*, 2019). Por isso, o critério de parada adotado

em ensaios de PCA é quando dois potenciais consecutivos medidos após o semiciclo de imersão em solução de NaCl apresentam valores que implicam na probabilidade maior que 90% de ocorrência de corrosão, com base nos intervalos preconizados pela *ASTM C876-15*.

Em suma, ambos os sistemas de medição foram utilizados para ensaios com e sem ciclos de molhagem e secagem, e com imersão total e parcial da amostra em solução de NaCl. E com base nos resultados, foram notadas algumas vantagens e desvantagens de cada sistema de medição durante a realização da técnica de potencial de circuito aberto.

As vantagens do sistema de medição por Arduino foram: Permite apresentar a evolução das medidas de potenciais em intervalos pequenos de tempo, realizar mais medições dentro de um intervalo de tempo, coletar medidas à distância, se conciliado com um sistema de acesso remoto. Porém, tem como desvantagem, uma maior dificuldade de preparação do sistema, e por isso, é indicado para ensaios sem ciclos de envelhecimento acelerado. Além disso, a montagem do sistema também é apresentada como uma desvantagem, pois é necessária a confecção de todo sistema, enquanto o multímetro já está pronto para a utilização, apenas necessitando da conexão dos seus polos com os cabos em contato com as barras de aço. Com isso, a principal vantagem de utilizar o multímetro para as medições é com relação ao simples manuseio, facilitando as medições de potenciais com ciclos de molhagem e secagem. Por outro lado, a desvantagem de utilizar esse sistema de medição é com relação ao número de medidas, as quais ficam limitadas às vezes em que o multímetro é conectado às amostras, totalizando uma medição após cada semiciclo de molhagem e secagem.

Com isso, pode-se afirmar que é viável a utilização do sistema de medição por multímetro quando os ensaios possuem ciclos de molhagem e secagem, enquanto o sistema de medição por Arduino melhor se adequa aos ensaios realizados sem a utilização de ciclos de envelhecimento acelerado. No entanto, podem ser utilizados em ambas as situações, sem restrições, apenas com maior ou menor nível de dificuldade experimental.

Portanto, tratando-se dos sistemas de medições de potenciais, ambos os sistemas são válidos para a medição dos potenciais durante a aplicação da técnica de PCA, porém cada um possui suas vantagens e desvantagens, e com isso podem ser utilizados conforme sua disponibilidade e necessidade.

#### 6.4 Eletrodo de Calomelano Saturado x Eletrodo de Hg/HgO

Com relação aos eletrodos de referência utilizados durante a pesquisa, ambos foram calibrados medindo o potencial em comparação a outro de mesma natureza, garantindo a confiabilidade dos resultados.

Como a norma que preconiza a técnica de PCA fornece os intervalos de probabilidade de corrosão com base em valores de potencial para o eletrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub>, esses intervalos de potenciais foram convertidos para valores dos eletrodos em uso, resultando nos intervalos da Tabela 9.

A segunda coluna representa os intervalos de potenciais convertidos para o eletrodo de Hg/HgO, enquanto a terceira coluna representa os intervalos de potenciais referentes ao eletrodo de calomelano saturado (ECS).

**Tabela 9 - Intervalos de potenciais convertidos (eletrodos de ECS e Hg/HgO)**

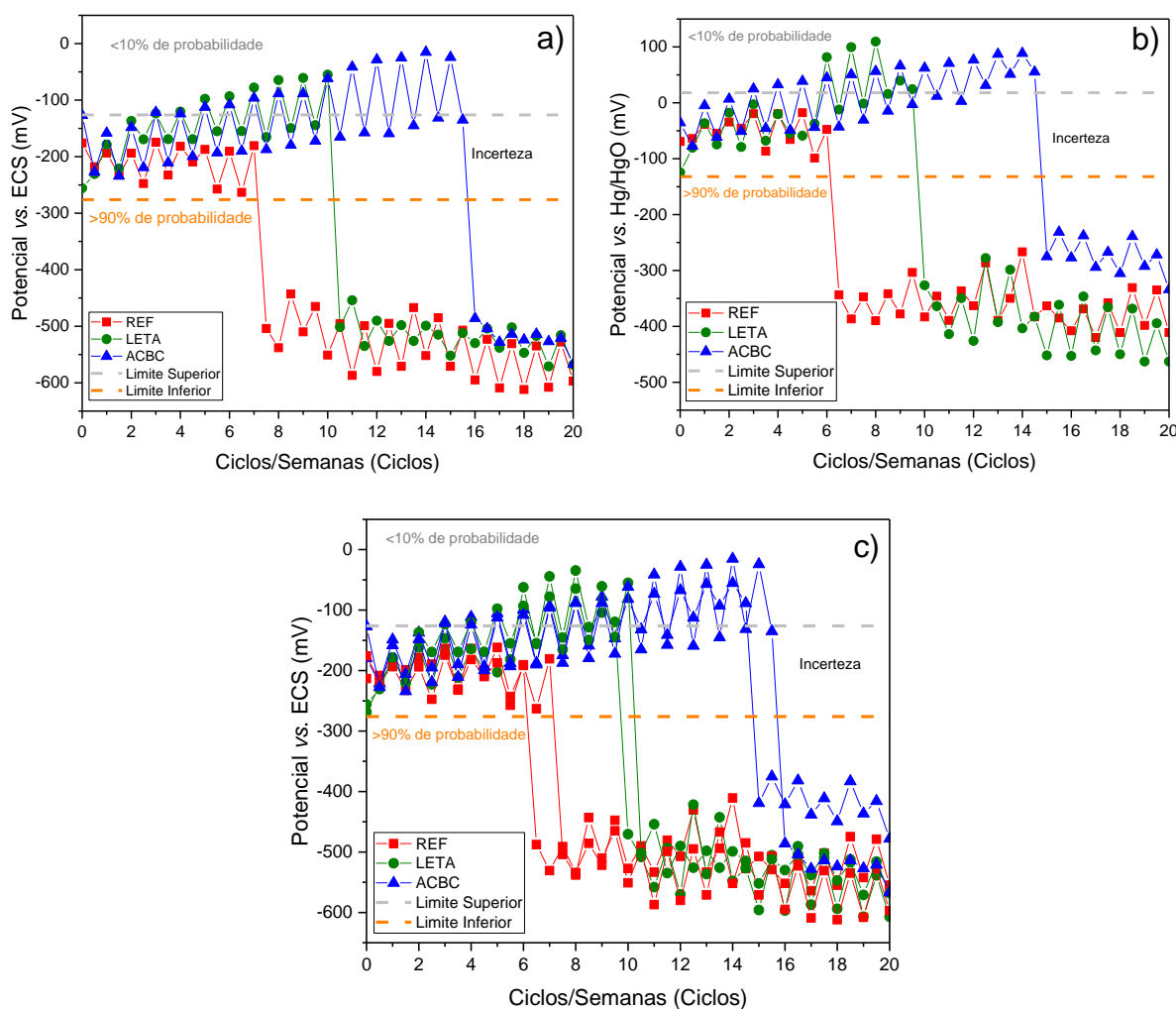
Probabilidade de corrosão	PCA para Eletrodo de Hg/HgO	PCA para Eletrodo de ECS*
< 10%	PCA > 18 mV	PCA > -126 mV
Incerta	-132 mV < PCA < 18 mV	-276 mV < PCA < -126 mV
> 90%	PCA < -132 mV	PCA < -276 mV

Fonte: \*Koga (2018)

A Figura 34 apresenta resultados dos ensaios realizados com eletrodos de calomelano saturado (Figura 34a) e mercúrio/óxido de mercúrio (Figura 34b). Ambos os ensaios foram realizados com ciclos de molhagem e secagem e com imersão parcial na solução de NaCl, alterando apenas o eletrodo de referência durante as medições. As leituras de potenciais foram realizadas com multímetro de alta impedância, visto que os ensaios foram realizados com ciclos de molhagem e

secagem. Os potenciais medidos utilizando o eletrodo de Hg/HgO foram convertidos para valores equivalentes ao eletrodo de ECS e apresentados na Figura 34c para a comparação. As barras de aço foram embutidas em corpos de prova moldados utilizando os três traços REF, LETA e ACBC.

**Figura 34 - Potenciais medidos com eletrodos de referência de ECS (a), Hg/HgO (b) e Hg/HgO convertidos para ECS com ECS (c)**



Fonte: Autor (2021)

Por meio desses resultados, percebeu-se um comportamento semelhante entre os mesmos traços, com diferença máxima de uma semana, nos potenciais medidos utilizando ambos os eletrodos de referência, inclusive no tempo para atingir

probabilidade maior do que 90% de ocorrência da corrosão, em virtude das barras de aço estarem expostas ao mesmo ambiente (corpos de prova com mesmo traço).

Durante as medições, utilizando um multímetro de alta impedância, após a conexão dos polos positivo e negativo, um cronômetro era acionado até atingir 1 minuto, quando era realizada a medição do potencial apresentado. Esse sistema de coleta foi utilizado por conta da oscilação dos potenciais, que principalmente após os semiciclos de secagem, apresentavam pouca estabilidade, sobretudo nas primeiras semanas de ensaio. Com isso foi possível padronizar o sistema de coletas, conforme outros autores já o fizeram (ALMEIDA, 2013). Durante os semiciclos de secagem, a tendência é que se forme uma camada superficial seca, com alta resistividade e que pode afetar as medidas de potencial, pelo fato de que os íons evitam o concreto resistivo e como consequência disso, o eletrodo de referência não os detecta (RIBEIRO, 2010).

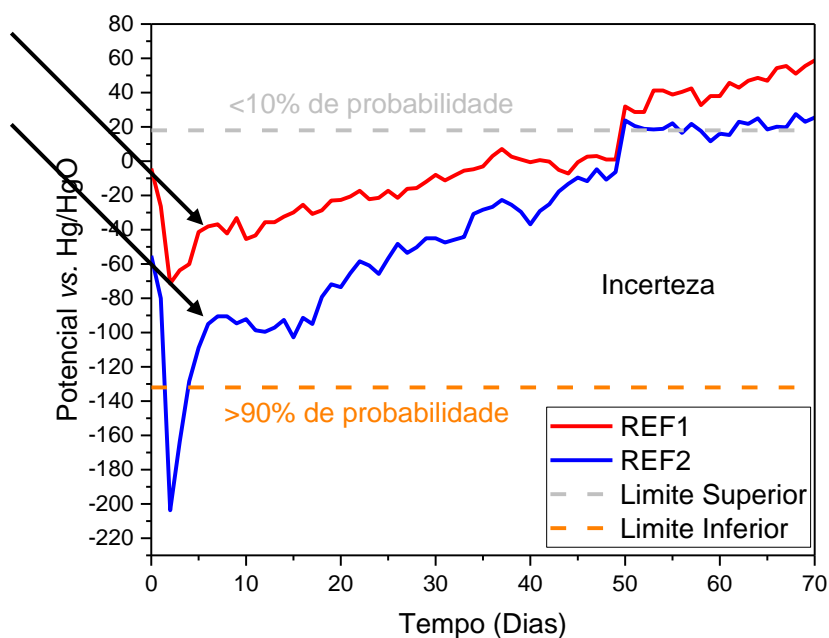
Comparando os eletrodos de referência utilizados nesse estudo, notou-se uma maior estabilidade do eletrodo de ESC em comparação ao eletrodo de Hg/HgO, dentro do tempo estipulado para estabilização do potencial. Porém, para maiores afirmações, é necessário realizar um estudo aprofundado com enfoque nos eletrodos de referência. Mesmo assim, em virtude da maior estabilidade do eletrodo de ESC, optou-se por ele para dar continuidade aos ensaios de PCA. Apenas para a avaliação dos potenciais durante a cura úmida dos corpos de prova foi utilizado um eletrodo de Hg/HgO, em solução de KOH, pois o eletrodo de calomelano saturado pode contaminar a solução de hidróxido de cálcio com a solução contida no seu interior, de KCl influenciando no comportamento dos resultados.

Portanto, os resultados da técnica de PCA não foram influenciados pelo tipo de eletrodo de referência utilizado, apenas houve uma diferença no tempo de estabilização dos potenciais durante as aferições. No entanto, sugere-se o estudo de mais tipos de eletrodos de referência para a aplicação desta técnica, como por exemplo o Ag/AgCl.

## 6.5 Cura úmida

Com a utilização de um dos traços da pesquisa já foi possível avaliar os potenciais apresentados pelo aço por meio da técnica de PCA durante o processo de cura úmida do concreto, por isso, optou-se por avaliar o traço REF, ou seja, sem a incorporação de resíduos. Essa análise se deu com a imersão dos corpos de prova em solução saturada de hidróxido de cálcio para a cura úmida. A Figura 35 apresenta os potenciais aferidos ao longo do tempo (dias) de cura úmida dos corpos de prova.

Figura 35 - Resultados de potenciais ao longo da cura úmida dos CPs (REF)



Fonte: Autor (2021)

Com base na Figura 35, percebe-se que os pontos coletados pelo Arduino diariamente retratam a evolução dos potenciais ao longo do ensaio. Ambas as barras de aço analisadas obtiveram probabilidade de corrosão menor do que 10% após aproximadamente 60 dias. O sistema Arduino foi utilizado para a realização dessas leituras, pois por meio do presente estudo o mesmo se mostrou mais eficiente para a coleta contínua de dados em corpos de prova imersos totalmente em solução e que não necessitam de ciclos de molhagem e secagem, que é o caso do processo de cura de corpos de prova, segundo a norma NBR 5738 (ABNT, 2015). Para auxiliar na

aferição dos potenciais, concretizando o circuito eletroquímico, foi utilizado um eletrodo de referência de Hg/HgO, em solução de KOH, pois o eletrodo de calomelano saturado pode contaminar a solução de hidróxido de cálcio com a solução contida no seu interior, de KCl influenciando no comportamento dos resultados, como comentado na seção anterior.

Analisando os resultados do ensaio percebeu-se que, inicialmente, ocorre um pico mais negativo, com potencial discrepante, apontando o primeiro contato do corpo de prova com a solução, e com isso, uma mudança no ambiente dos corpos de prova, porém, a medida que o tempo passa, o potencial tende a subir, e quando atinge a primeira zona de estabilidade, com aproximadamente 7 dias, destacada no gráfico (setas pretas), supôs-se que as barras de aço sofreram um processo de passivação, mesmo estando em um intervalo que segundo a norma *ASTM C876 – 15*, é incerto quanto a probabilidade da ocorrência de corrosão. Além disso, no decorrer do ensaio, notou-se uma tendência das curvas para potenciais mais positivos, se aproximando da zona de probabilidade de corrosão menor do que 10%, indicando uma maior proteção da barra pelo filme passivo na superfície. Com aproximadamente 50 dias, as curvas ultrapassaram o limite superior estipulado pela norma, indicando probabilidade de corrosão menor do que 10% e esses potenciais continuaram subindo até o encerramento do ensaio (70 dias). Esse resultado aponta para uma maior proteção das barras de aço após o procedimento de cura úmida.

Portanto, para garantir a realização de ensaios de potencial de circuito aberto após o processo de passivação, e garantia de que as barras de aço estão em um nível de probabilidade baixa de ocorrência da corrosão, sugere-se que antes da realização do ataque por cloretos, seja realizada a cura dos corpos de prova até que as barras de aço apresentem potenciais acima do limite superior apontados pela norma *ASTM C876 – 15*. Cascudo, (2000) e Ribeiro (2010) utilizaram em seus estudos esse procedimento e obtiveram resultados dentro do esperado. No entanto, não é possível afirmar se esse mesmo comportamento aconteceria em concretos especiais de alto desempenho, visto que oferecem menor porosidade à matriz cimentícia e em decorrência disso promove uma saturação dos corpos de prova mais lenta. Por isso, é necessário que seja realizado um estudo mais aprofundado para a obtenção de um padrão de cura preliminar ao ensaio de PCA, visto que diversos autores optaram por



realizar a cura por 28 dias, seguindo o procedimento de cura indicado para outros ensaios mecânicos de corpos de prova, sem considerar a passivação por completo das barras de aço (ALMEIDA *et al.*, 2019; GHORBANI *et al.*, 2019).

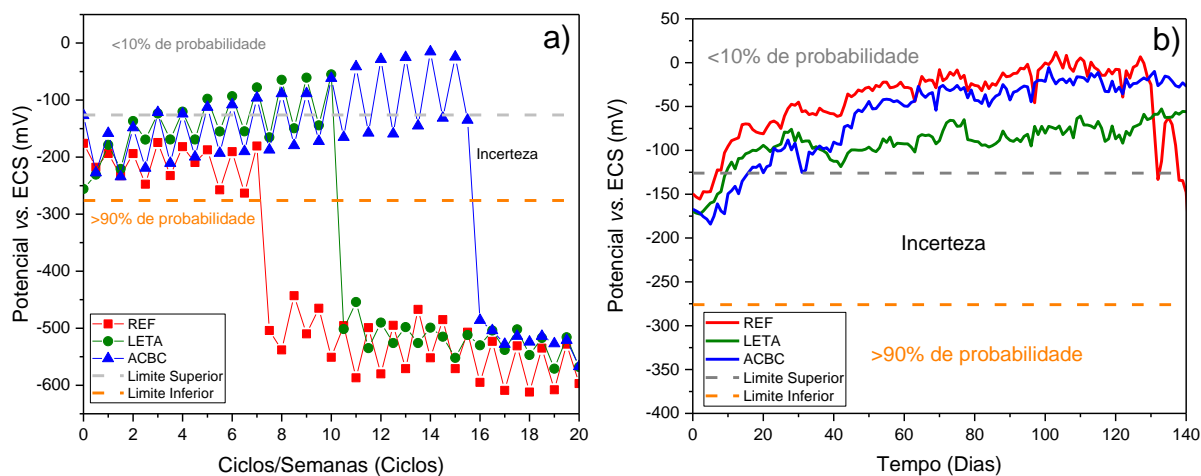
Além disso, a utilização do sistema de leituras por Arduino permitiu a análise ininterrupta das amostras de aço embutidas em corpos de prova moldados com o traço referência, até que os resultados apresentassem probabilidade de corrosão menor do que 10% segundo os intervalos da *ASTM C876-15* convertidos para o eletrodo de referência de Hg/HgO. Portanto, salienta-se que para as leituras de potenciais durante a cura úmida dos corpos de prova, pode ser utilizado tanto Arduino, como o multímetro. No entanto, o Arduino fornece mais praticidade ao ensaio e promove menores interferências externas por conta do manuseio dos corpos de prova e da utilização de multímetro.

## **6.6 Ciclos de molhagem e secagem**

Para avaliar a influência dos ciclos de molhagem e secagem, foram realizados ensaios com imersão parcial dos corpos de prova de três traços diferentes em solução de NaCl, utilizando o eletrodo de referência de calomelano saturado, variando apenas no âmbito da realização ou não de ciclos de envelhecimento acelerado.

A Figura 36 apresenta os resultados obtidos durante o ensaio de PCA com e sem a presença de ciclos de molhagem e secagem. A Figura 36a representa os valores de potenciais obtidos em ensaio com ciclos de molhagem e secagem, enquanto a Figura 36b representa os valores de potenciais obtidos em ensaio sem a realização dos ciclos.

Figura 36 - Resultados dos ensaios de PCA com (a) e sem ciclos (b) de molhagem e secagem



Fonte: Autor (2021)

Observa-se na Figura 36, que a curva referente ao ensaio com ciclos de envelhecimento acelerado tende ao limite inferior da norma *ASTM C876-15* mais rapidamente.

Mesmo os dois ensaios sendo realizados com imersão parcial da amostra, um facilitador para o ingresso de oxigênio nos poros da matriz cimentícia e é preponderante para o processo de corrosão, o ensaio que passa por ciclos de molhagem e secagem apresenta probabilidade de corrosão alta mais cedo do que o ensaio que não é exposto aos ciclos. Observando a Figura 36b percebe-se que ao completar 140 dias de ensaio, equivalente a 20 semanas, as barras de aço não apresentaram probabilidade de corrosão maior do que 90%, independente do material. O único traço a apresentar um sinal de queda nos potenciais foi o referênci, que após aproximadamente 130 dias de ensaio, apresentou uma queda abrupta, porém até a finalização do ensaio, aos 140 dias, ainda não apresentava potenciais que indicassem a probabilidade maior que 90% de ocorrência da corrosão, permanecendo no intervalo de incerteza. Mesmo assim, foi possível perceber que o traço referênci fornece menor proteção a barra de aço se comparado aos outros traços estudados.

Sendo assim, concluiu-se que um dos principais parâmetros analisados nesse estudo que influencia no processo de corrosão é a presença ou não de ciclos de

molhagem e secagem dos corpos de prova, pois mesmo utilizando a imersão parcial, sem a utilização dos ciclos de envelhecimento acelerado, os materiais com a incorporação de resíduos não apresentaram sinal de corrosão com base na análise qualitativa realizada por meio da técnica de PCA dentro do mesmo intervalo de tempo em que o ensaio com ciclos apresentou a probabilidade alta da corrosão estar ocorrendo. Esse fato ocorre por conta da intensificação dos mecanismos de transporte dos cloretos, que são principalmente a absorção ou sucção capilar a qual ocorre na superfície dos corpos de prova e a difusão que ocorre na parte interna dos mesmos. Além disso, a realização dos ciclos também favorece no ingresso de oxigênio nos corpos de prova, elemento essencial para o processo de corrosão acontecer.

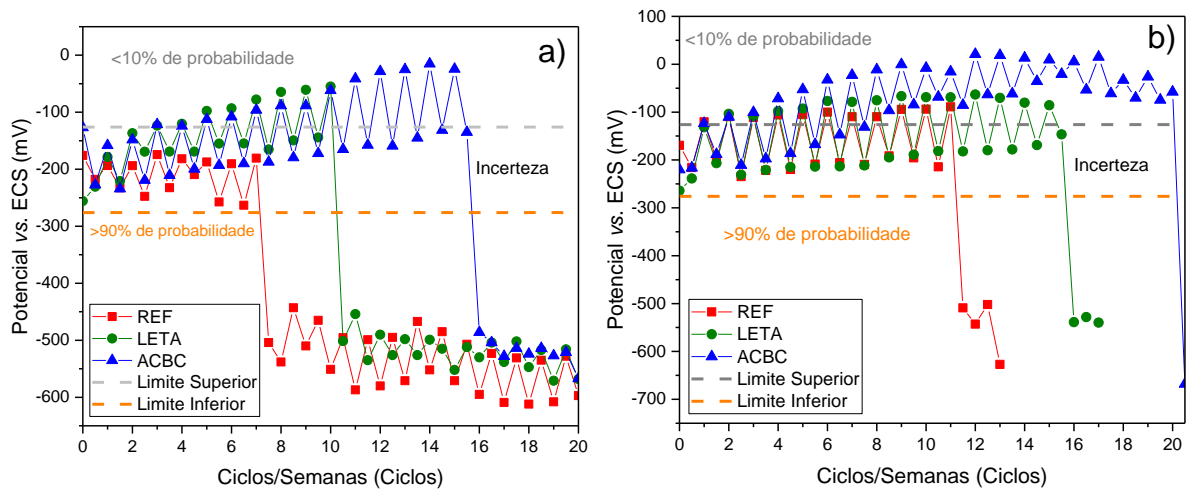
Propõe-se que seja analisada a influência do tempo de imersão na solução e tempo de estufa para a técnica de PCA em trabalhos futuros, visto que no presente estudo foi adotado o tempo de 4 dias em estufa e 3 dias em solução salina, mesmo tempo adotado por Cascudo (2000) e Silva (2006) em seus estudos, diferentemente de outros autores, como Ribeiro (2010) e Almeida (2013), que utilizaram 5 dias em estufa e 2 dias em solução salina, pois pode ser um fator importante na obtenção dos resultados de PCA.

### **6.7 Imersão total x Imersão parcial das amostras em NaCl**

Para avaliar a influência da imersão total e parcial das amostras em NaCl, também foi necessário realizar dois tipos de ensaios, pois com base na seção anterior, um parâmetro preponderante para atingir a probabilidade de corrosão maior do que 90% em menor tempo é a realização de ciclos de molhagem e secagem.

Com isso, foram analisados corpos de prova com a realização dos ciclos de molhagem e secagem, utilizando o mesmo eletrodo de referência, porém um dos ensaios com imersão total dos CPs em solução salina e outro com imersão parcial, ou seja, até a metade da altura dos CPs. A Figura 37a apresenta os resultados dos ensaios com imersão parcial e a Figura 37b com imersão total em solução de NaCl com concentração de 3,5% (com ciclos de molhagem e secagem).

Figura 37 - Ensaios de PCA com imersão parcial (a) e total (b) (com ciclos)



Fonte: Autor (2021)

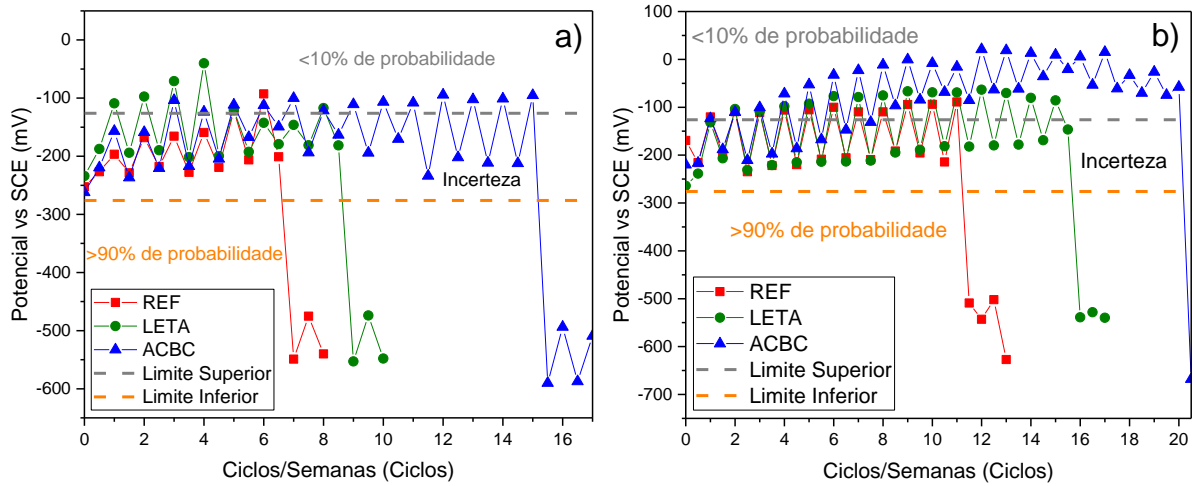
Comparando os gráficos da Figura 37, percebeu-se que as barras de aço embutidas em corpos de prova imersos parcialmente em solução de NaCl apresentaram probabilidade de corrosão maior que 90% antes das barras de aço embutidas em CPs imersos totalmente em solução. Esse fator ocorre por conta da maior facilidade de ingresso de oxigênio nos corpos de prova imersos parcialmente, facilitando o processo de corrosão. Como ambos os ensaios passaram por ciclos de molhagem e secagem, e houve uma diferença entre o tempo para apresentar probabilidade alta de corrosão, concluiu-se que o tipo de imersão também influencia no processo de corrosão. Percebeu-se também que para as duas situações, as barras de aço embutidas em REF apresentaram potenciais mais negativos antes das barras de aço embutidas em CPs com a incorporação de resíduos, alterando apenas o tempo para atingir o estado ativo de corrosão. Comparando o tempo em que cada material apresentou probabilidade de corrosão maior do que 90%, a barra de aço embutida no traço REF apresentou uma queda abrupta nos potenciais com 7 semanas de ensaio com imersão parcial, enquanto no ensaio com imersão total apresentou a queda com 11 semanas, totalizando uma diferença de aproximadamente 4 semanas. A diferença encontrada nos potenciais aferidos em LETA foi de 5 semanas e para ACBC de 4 semanas.

Salienta-se novamente, que os resultados foram apresentados para diferentes traços apenas para elucidar o mesmo comportamento dos potenciais para diferentes matrizes cimentícias, destacando a influência do parâmetro em estudo em todos os materiais utilizados. Na seção seguinte será abordado com mais ênfase a diferença entre os materiais aplicados no estudo.

### **6.8 Comparação de diferentes traços (REF, LETA e ACBC)**

O principal intuito do trabalho foi analisar parâmetros da técnica de PCA, no entanto, também foi analisado o comportamento dos potenciais aferidos em barras de aço embutidas em corpos de prova moldados com a incorporação de resíduos em substituição ao agregado miúdo, com o objetivo de verificar se a técnica de PCA é aplicável a diferentes traços. A Figura 38 apresenta os resultados de ensaios de PCA com barras de aço embutidas em corpos de prova de referência, com a substituição de 30% do agregado miúdo por ACBC e 3% do agregado miúdo por LETA. Os resultados da Figura 38a foram obtidos utilizando um eletrodo de referência de calomelano saturado, com a utilização de ciclos de envelhecimento acelerado e com imersão parcial dos corpos de prova em solução de NaCl, que ao longo desse estudo se mostraram mais eficazes para a obtenção de resultados mais rápidos sobre quais materiais apresentam maior ou menor proteção diante do ataque por cloretos. Por outro lado, os resultados da Figura 38b foram obtidos utilizando os mesmos parâmetros citados da Figura 38a, com exceção da imersão, a qual foi total, ou seja, com os corpos de prova totalmente imersos em solução de NaCl. Foram apresentadas essas duas situações por conta de que ao longo do estudo foi possível notar que ambas as situações trouxeram resultados em até 20 ciclos, isto é, 20 semanas de ensaio. Para analisar as barras de aço embutidas em diferentes traços sem ciclos de molhagem e secagem, seria necessário um tempo de ensaio maior do que 140 dias ou 20 semanas, e por isso, esse parâmetro não foi adotado para essa análise. As aferições foram realizadas utilizando um multímetro de alta impedância.

**Figura 38 - Resultados de PCA para REF, LETA e ACBC, considerando (a) imersão parcial e (b) imersão total dos corpos de prova**



Fonte: Autor (2021)

Com base nos gráficos, observou-se que o comportamento dos potenciais foi semelhante para os três tipos de traços utilizados, REF, LETA e ACBC, no sentido da viabilidade da aplicação da técnica de PCA para diferentes matrizes cimentícias, com picos ao longo dos ciclos de molhagem e secagem. Com isso, é possível afirmar que a técnica é aplicável em barras de aço embutidas em corpos de prova com a incorporação de materiais residuais.

A principal diferença se diz respeito ao tempo em que a probabilidade de corrosão passou da zona passiva para a zona ativa de corrosão, com base nos intervalos preconizados pela norma *ASTM C876-15*, indicando probabilidade alta da corrosão estar ocorrendo. O material referência foi o primeiro a apresentar probabilidade de corrosão acima de 90%, após a oitava semana, ou seja, após oito ciclos completos de molhagem e secagem, quando dois semiciclos após o estado umedecido apresentaram potenciais mais negativos do que o intervalo inferior estipulado pela norma *ASTM C876-15* e convertido para o eletrodo em uso (-276 mV). Por outro lado, as barras de aço embutidas em corpos de prova com a incorporação de resíduos apresentaram potenciais dentro da zona ativa de corrosão após o décimo ciclo em LETA e após o décimo sétimo ciclo em ACBC (com ciclos). Além disso, em

se tratando dos materiais, as barras que levaram maior tempo para atingirem a probabilidade de corrosão maior do que 90% foram as embutidas em ACBC. Portanto, as barras de aço embutidas em ACBC ofereceram um ambiente de maior proteção, em decorrência do maior tempo decorrido de ensaio para atingir a probabilidade maior do que 90% da ocorrência da corrosão.

No estudo desenvolvido por Almeida (2013), o autor também constatou que o aço embutido na matriz cimentícia com 30% de ACBC em substituição natural teve melhor desempenho em comparação ao traço de referência. Na ocasião, a amostra embutida no traço com ACBC atingiu probabilidade maior do que 90% da ocorrência da corrosão na 18ª semana, um ciclo completo de molhagem e secagem depois do resultado obtido no presente estudo.

Um dos fatores para esse resultado é a capacidade de passivação do aço embutido em corpos de prova confeccionados com ACBC. Rezende (2019) avaliou a passivação do aço nesse ambiente (ACBC) e concluiu que existe a possibilidade de formar uma película protetora mais robusta em torno do aço, garantindo maior proteção às barras de aço, justificando o melhor resultado durante a execução da técnica de PCA se comparado a barras de aço embutidas em argamassas convencionais. Além disso, Almeida (2013) avaliou o potencial de corrosão em corpos de prova com a incorporação de ACBC nas mesmas proporções do presente estudo e concluiu esse traço pode reduzir a probabilidade de despassivação da armadura de aço no concreto, por conta de fornecer maior proteção às barras de aço.

O que pode ter influenciado no tempo em que ocorre o início do processo corrosivo é o aumento da alcalinidade promovido pela presença de ACBC na argamassa. Quanto maior a alcalinidade proporcionada pelo filme passivador, menor a suscetibilidade das barras de aço ao ataque por cloretos (CASCUDO, 1997). Além disso, a porosidade do material também pode ter influenciado nesses resultados, com a ACBC fornecendo uma matriz menos porosa do que os outros dois materiais, muito por conta do melhor empacotamento de partículas e colmatação dos poros em decorrência da sua granulometria se situar entre areia fina e cimento observando os resultados de caracterização apresentados no estudo de Moretti 2018, em anexo, e maior proporção de substituição se comparada ao LETA.

E comparando os dois gráficos, nota-se que em ambos, as barras de aço embutidas em matrizes REF apresentam mais de 90% de probabilidade de corrosão antes dos outros dois traços analisados, com o LETA em segundo lugar e o ACBC sendo o último a apresentar-se no intervalo do gráfico que representa o estado de corrosão ativa. Sendo assim, independentemente do tipo de imersão utilizado, parcial ou total, o material que ofereceu maior proteção para as barras de aço foi com a incorporação de areia de cinza de bagaço de cana, seguido do lodo de estação de tratamento de água e, por último, a amostra branca ou de referência. A diferença notável entre os gráficos foi no tempo para alcançar o limite de probabilidade de corrosão maior do que 90%, em função do tipo de imersão, pelo motivo explanado na seção anterior, a maior facilidade do ingresso de oxigênio na imersão parcial, fator preponderante para a ocorrência da corrosão e, por isso, foi promovida antecipadamente nessa situação para todos os traços (Figura38a).

Nesse ensaio, o principal intuito foi analisar as barras de aço embutidas em diferentes matrizes cimentícias. Nesse sentido, diferentemente das seções anteriores, onde os ensaios foram alongados até a 20ª semana para facilitar a comparação entre o comportamento dos potenciais variando diferentes parâmetros, nesse ensaio foi utilizado o critério de parada apresentado na metodologia, o qual consistiu em encerrar o ensaio quando duas leituras após o ciclo de imersão em solução apresentassem potenciais mais negativos do que o limite inferior estipulado pela norma *ASTM C876-15* (-276 mV). Esse critério foi utilizado para que, após a realização desse ensaio, os corpos de prova pudessem ser rompidos e fosse realizada uma análise visual das barras de aço logo após apresentarem probabilidade de corrosão acima de 90%.

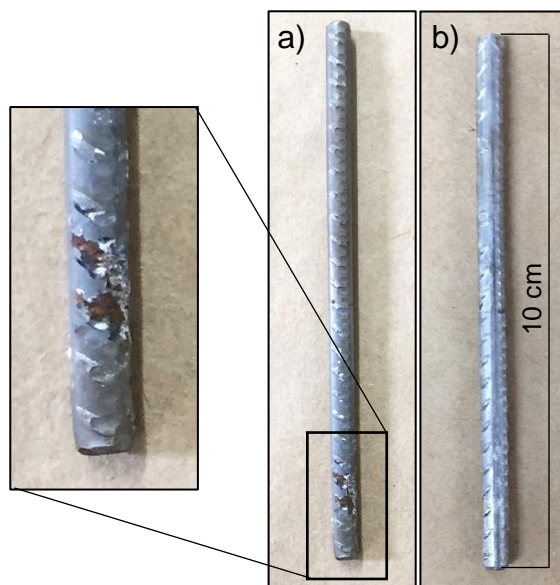
Diante do ensaio de PCA realizado nesta seção do estudo, destaca-se a efetividade da técnica em realmente apresentar a probabilidade acima de 90% de corrosão após a corrosão ter iniciado, conforme verificado na Figura 39.

A Figura apresenta as barras de aço após o ensaio de PCA e remoção da fita isolante líquida da superfície. A Figura 39a apresenta a barra de aço após ensaio de PCA com ciclos de molhagem e secagem. Enquanto a Figura 39b apresenta uma barra de aço que passou pelo ensaio de PCA e não atingiu a probabilidade de



corrosão maior do que 90% após 20 semanas por conta da não realização de ciclos de molhagem e secagem.

**Figura 39 - Barras de aço após ensaio de PCA: a) após ensaio com ciclos; e b) após ensaio sem ciclos de molhagem e secagem**



Fonte: Autor (2021)

Comparando as imagens verifica-se que a barra de aço não exposta aos ciclos de molhagem e secagem não possui nenhum sinal de corrosão, enquanto a barra de aço da Figura 39a apresenta pontos indicativos de corrosão localizada, tipo de corrosão proporcionada por íons cloreto.

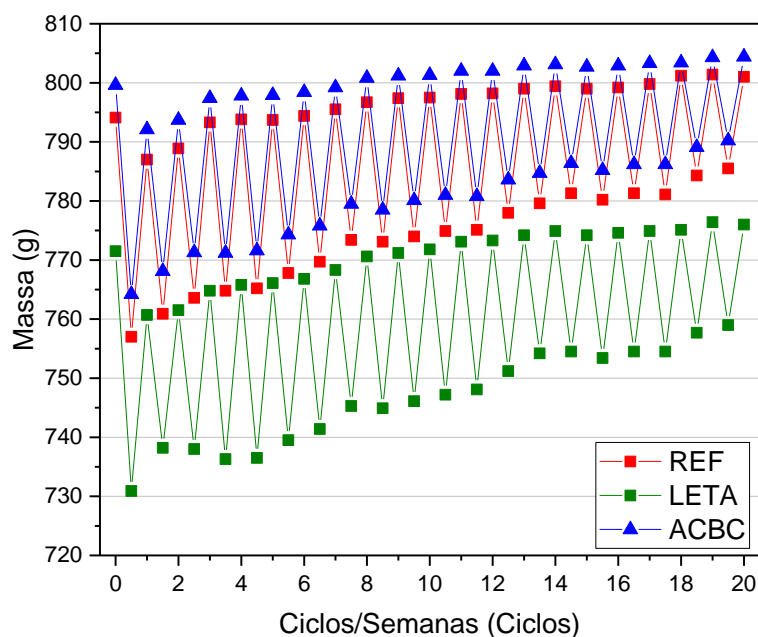
Por meio dessas imagens ficou evidente que a técnica se demonstrou eficaz em informar a probabilidade da ocorrência da corrosão, além de confirmar a agressividade de ambientes que proporcionam situações semelhantes aos ciclos de molhagem e secagem, locais que facilitam o ingresso de oxigênio e a variação da umidade no interior da matriz cimentícia, fatores preponderantes para o desenvolvimento da corrosão das barras de aço. Com isso, essa análise complementa o estudo dos ciclos de molhagem e secagem apresentados na seção 6.6.

Outra análise realizada para os três traços em estudo, foi com relação ao acúmulo de NaCl, quando foi verificada a variação da massa dos corpos de prova no

decorrer dos ciclos de molhagem e secagem em imersão parcial, que correspondem aos parâmetros combinados de maior eficiência para a realização da técnica de PCA. Foram utilizados corpos de prova específicos para essa análise, para que o umedecimento com solução proveniente das leituras de PCA não interferisse na variação das massas. As massas foram aferidas após a retirada dos corpos de prova da estufa e após a retirada da solução. Destaca-se que após a retirada da solução, os corpos de prova passaram por uma secagem superficial com auxílio de uma flanela, a fim de remover a umidade superficial e obter um padrão de pesagem para o desenvolvimento dessa análise, na condição de saturados com a superfície seca.

O resultado da variação de massa está apresentado na Figura 40. A aferição das massas foi realizada até a semana 20, ou seja, até completados 20 ciclos de molhagem e secagem. Os corpos de prova utilizados para essa análise foram com as mesmas dimensões e características dos utilizadas nos ensaios de PCA, inclusive contendo barras de aço embutidas no seu interior. Sendo assim, esses corpos de prova passaram por todos os procedimentos de preparação de barras de aço e cura úmida utilizados na moldagem dos corpos de prova dos ensaios de PCA.

**Figura 40 - Variação da massa dos corpos de prova no ensaio de PCA**



Fonte: Autor (2021)

A primeira aferição apresentada no gráfico corresponde a massa dos corpos de prova após a cura úmida, ou seja, quando os corpos de prova foram retirados da solução saturada de hidróxido de cálcio, na qual apresentavam-se imersos totalmente. Isso justifica a primeira medida ser superior ao restante das massas, ao passo que o ensaio foi realizado com os corpos de prova imersos parcialmente na solução de NaCl.

Analisando os resultados, percebeu-se que todos os traços apresentaram um aumento nas massas ao longo do ensaio em ambos os semiciclos. Isso ocorreu por conta de uma deposição de NaCl nos poros das argamassas. Foi possível perceber também que a variação de massa foi mais intensa nos semiciclos de secagem para todos os traços analisados e isso foi associado à propriedade higroscópica do sal remanescente nos poros das argamassas, que é a capacidade de absorver água, fazendo com que aumente o grau de umidade nesses semiciclos.

Foi possível constatar também uma diminuição da amplitude entre cada semiciclo, das massas, com o passar do ensaio. Esse fator se justifica pelo preenchimento dos poros das argamassas e, conseqüentemente, menor variação das massas entre os semiciclos de molhagem e secagem.

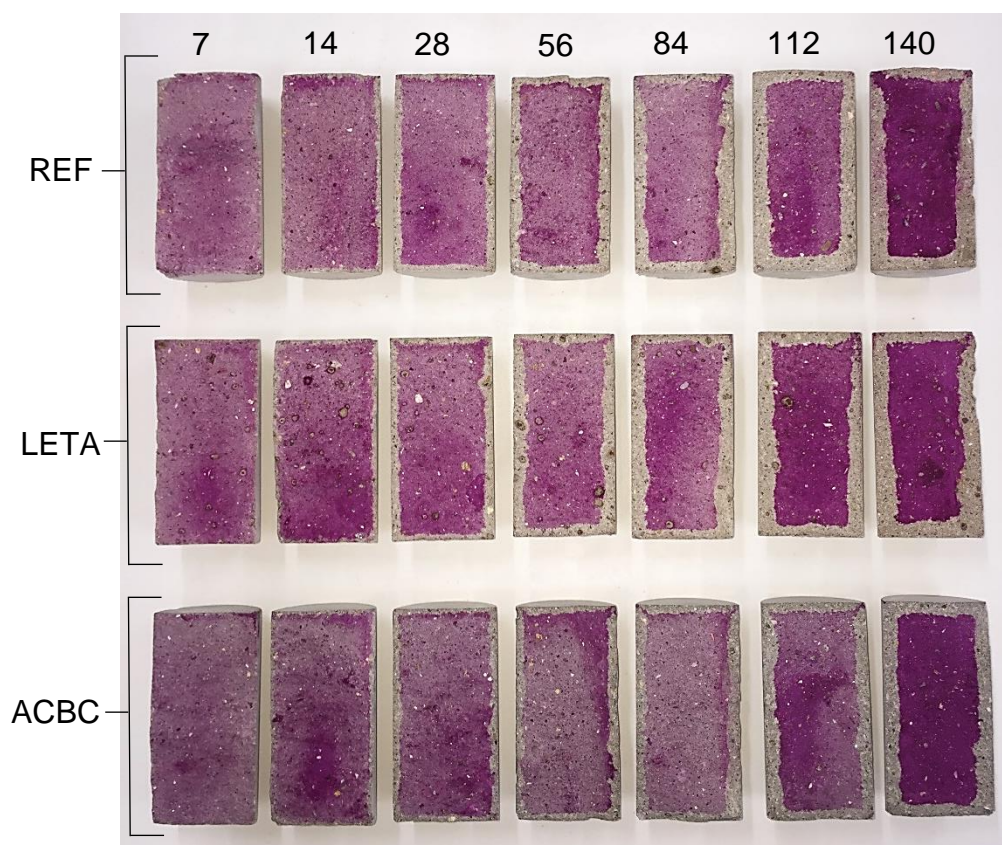
De maneira geral, verificou-se que as diferentes matrizes cimentícias não apresentaram grandes diferenças de comportamento ao longo do ensaio, a diferença ficou apenas na massa de cada corpo de prova, com o LETA apresentando uma massa inferior aos outros traços. Essa diferença de massa se deve a menor massa específica apresentada pelo LETA (1 a 1,2 g/cm<sup>3</sup> (SOUZA, 2006)) em comparação ao ACBC com aproximadamente 3,12 g/cm<sup>3</sup> (MORETTI, 2018). Além da diferença entre as massas específicas, a proporção de LETA utilizada foi de 3% em substituição ao agregado miúdo e de ACBC foi de 30%, o que também favoreceu na diferença de massa encontrada no ensaio. Portanto, esse ensaio contribuiu para a verificação do aumento da massa ao longo dos ciclos, constatação de maior aumento de massa nos semiciclos de secagem e comprovação de que os traços se comportaram de maneira similar no âmbito da variação de massa.

### 6.8.1. Profundidade de Carbonatação nas Argamassas

Como a carbonatação é um dos mecanismos de deterioração que fazem com que ocorra a redução do pH nos poros do concreto, podendo despассивar as armaduras e torna-las suscetíveis ao processo de corrosão, também foram realizados ensaios de carbonatação acelerada para averiguar a profundidade de carbonatação nas matrizes cimentícias utilizadas nesse estudo.

Na Figura 41 é possível observar a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo. As profundidades foram aferidas nas idades de 7, 14, 28, 56, 84, 112 e 140 dias para cada traço de argamassa utilizado nesse estudo (REF, LETA e ACBC).

Figura 41 - Evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo (dias)



Fonte: Autor (2021)

Para facilitar a visualização da evolução da carbonatação ao longo do tempo, foram selecionadas uma face para cada idade dentre todos os corpos de prova analisados. Nas idades de 7 e 14 dias as profundidades de carbonatação aferidas foram muito pequenas se comparadas as idades mais avançadas, pois quanto mais tempo confinadas na câmara e carbonatação, maior o avanço desse fenômeno.

Foram calculadas as médias e o coeficiente de variação do conjunto das medidas de profundidades de carbonatação para cada idade em estudo, as quais estão contidas na Tabela 10.

**Tabela 10 - Profundidade de carbonatação das argamassas**

Idade (dias)	REF		LETA		ACBC	
	PCm* (mm)	CV** (%)	PCm* (mm)	CV** (%)	PCm* (mm)	CV** (%)
7	0,65	30,33	0,54	43,66	0,56	34,63
14	1,48	19,30	1,54	14,22	1,15	21,34
28	3,22	10,84	3,73	10,80	2,71	15,54
56	4,70	10,59	5,32	5,42	3,58	14,45
84	6,45	11,89	6,84	7,72	4,76	11,29
112	7,06	6,25	7,45	8,23	5,98	8,42
140	7,96	10,06	8,32	14,75	6,15	13,31

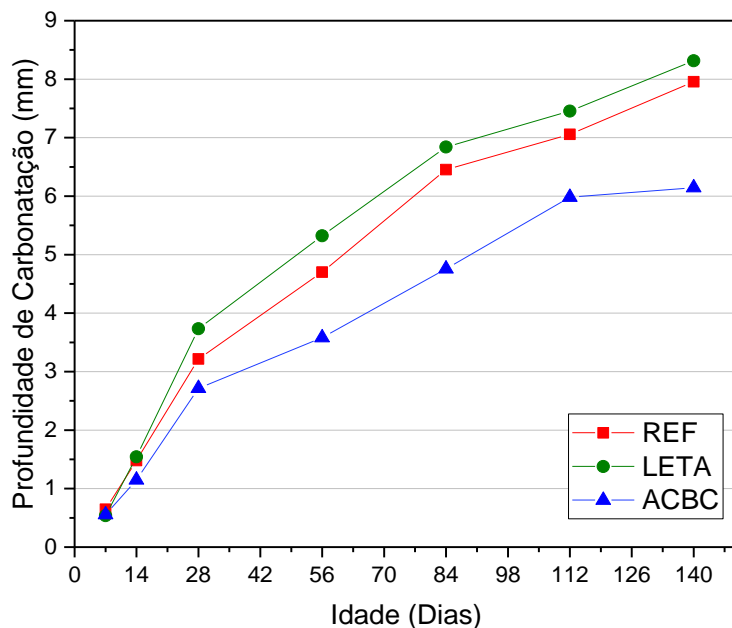
\*PCm: Profundidade de carbonatação média; \*\*CV – Coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e a média)

Analisando os coeficientes de variação dos conjuntos, percebe-se que os maiores valores ocorreram nas primeiras medições, com 7 e 14 dias de ensaio. Esse resultado aconteceu por conta da dificuldade de visualização da profundidade de carbonatação nas primeiras idades do ensaio, quando as leituras variaram mais entre si. No entanto, conforme o ensaio prossegue, nas idades mais avançadas, a visualização da profundidade de carbonatação fica mais evidente, facilitando a aferição, tendo como consequência, resultados de CV menores.

Observou-se também que até a idade de 140 dias para todos os traços utilizados a profundidade de carbonatação média ficou abaixo de 9 mm. Os corpos de prova utilizados para os ensaios de PCA desse estudo apresentaram um cobrimento das barras de aço, na pior situação, de 20 mm, distância entre a superfície lateral do corpo de prova e a superfície da barra de aço. Sendo assim, se fosse analisada a corrosão por carbonatação em corpos de prova com o mesmo cobrimento das barras de aço utilizadas durante a realização da técnica de PCA do presente estudo, até 140 dias a carbonatação ainda não teria atingido as barras de aço para despассивá-las.

Além disso, foram traçadas as curvas de tendência de evolução da frente de carbonatação para cada traço em estudo, com base nas médias de profundidade de carbonatação (Tabela 10), conforme as idades de confinamento em câmara de carbonatação (Figura 42).

**Figura 42 - Curvas de tendência de evolução da carbonatação**



Fonte: Autor (2021)

Nas primeiras idades os comportamentos foram semelhantes, porém, com o andamento do ensaio foi possível perceber um distanciamento maior entre as curvas, indicando um comportamento diferente em função da sua matriz cimentícia. Com base

nas curvas de tendência percebeu-se que a matriz cimentícia contendo ACBC, incorporado em substituição a parte da areia, teve melhores resultados, visto que dificultou o ingresso de CO<sub>2</sub>, como apontado pelo ensaio colorimétrico com fenolftaleína. Já as duas outras curvas apresentaram comportamentos semelhantes, com os corpos de prova com incorporação de LETA apresentando valores maiores de profundidade de carbonatação ao longo de todo ensaio. Esse fator pode ser atribuído a diferença de massa específica dos corpos de prova com a incorporação do resíduo ACBC, que promove uma matriz cimentícia menos porosa, reduzindo o avanço da carbonatação.

Também foi realizada a análise de variância para cada conjunto de médias em cada idade. Foi considerado um nível de significância  $\alpha$  de 5%, com isso, os resultados fornecem 95% de confiança. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Resultados de Valor-P, F e F críticos da ANOVA (Carbonatação)**

Idade (dias)	P-Valor	F
7	0,065667136	2,795018371
14	8,937E-10	25,57599945
28	2,84167E-18	60,8383647
56	2,02263E-30	140,5905023
84	3,85813E-27	114,71527
112	4,18629E-21	75,82608446
140	2,09121E-16	51,92834329

Nota: O valor de F crítico foi de 3,082852016.

Avaliando a diferença dos valores de cada idade, percebeu-se que os corpos de prova avaliados com 7 dias foram os únicos a apresentarem P-Valor maior do que 5%, o qual foi o nível de significância considerado nos cálculos. Isso mostra que os valores de profundidade de carbonatação aferidos na primeira idade (7 dias) de cada matriz cimentícia não possuíam diferença significativa e, portanto, estatisticamente

podem ser considerados semelhantes. Sendo assim, a partir de 14 dias de ensaio, as leituras passaram a ser diferentes estatisticamente, pois seus P-valores se encontram abaixo de 5%. Esse resultado confirma a análise visual do comportamento das curvas de tendência de evolução das profundidades de carbonatação, as quais indicaram um distanciamento das médias a partir da segunda semana de ensaio (14 dias).

Utilizando os resultados da ANOVA, também foi possível averiguar quais médias possuíam diferença significativa, por meio do Teste de Tukey por pares, ao passo que os resultados de ANOVA apresentam apenas a proximidade entre os dados do conjunto como um todo. Os resultados obtidos por meio dessa avaliação estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Teste de Tukey para as médias das profundidades de carbonatação**

<b>Idade (dias)</b>	<b>REF (mm)</b>	<b>LETA (mm)</b>	<b>ACBC (mm)</b>
7	0,65 ± 0,20 <sup>a</sup>	0,54 ± 0,24 <sup>a</sup>	0,56 ± 0,19 <sup>a</sup>
14	1,48 ± 0,29 <sup>a</sup>	1,54 ± 0,22 <sup>a</sup>	1,15 ± 0,24 <sup>b</sup>
28	3,22 ± 0,35 <sup>a</sup>	3,73 ± 0,40 <sup>b</sup>	2,71 ± 0,42 <sup>c</sup>
56	4,70 ± 0,50 <sup>a</sup>	5,32 ± 0,29 <sup>b</sup>	3,58 ± 0,52 <sup>c</sup>
84	6,45 ± 0,77 <sup>a</sup>	6,84 ± 0,53 <sup>b</sup>	4,76 ± 0,54 <sup>c</sup>
112	7,06 ± 0,44 <sup>a</sup>	7,45 ± 0,61 <sup>b</sup>	5,98 ± 0,50 <sup>c</sup>
140	7,96 ± 0,80 <sup>a</sup>	8,32 ± 1,23 <sup>a</sup>	6,15 ± 0,82 <sup>b</sup>

Nota: a, b e c revelam se existe diferença significativa entre os pares.

Os resultados apresentados na tabela mostram se existe diferença significativa entre os pares. Quando os três traços apresentam a mesma letra, afirma-se que estatisticamente os materiais não apresentaram diferença significativa. Quando um entre os três valores apresenta letra diferente, indica que os outros dois traços são semelhantes. Por outro lado, no caso das três letras serem diferentes, ou seja, a, b e c, os valores possuem diferença significativa entre si e não podem ser considerados semelhantes.



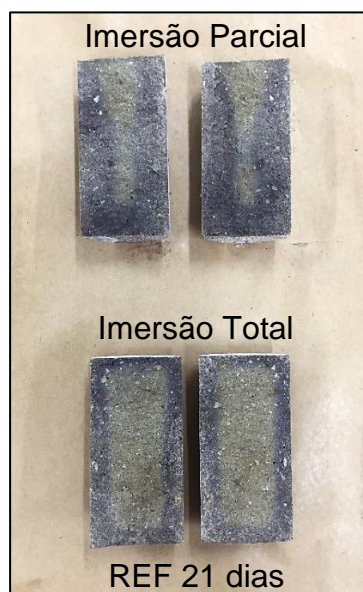
Avaliando os resultados provenientes do Teste de Tukey percebe-se maior semelhança entre os resultados de REF e LETA, visto que em algumas idades, não apresentaram diferença significativa entre os dados médios de profundidade de carbonatação. Por outro lado, os resultados de ACBC se diferiram em todas as idades, com exceção da primeira idade (7 dias). Esses resultados também concordam com os resultados apresentados anteriormente, quando se destaca o distanciamento dos valores de profundidade de carbonatação do ACBC das outras duas matrizes cimentícias. Com isso, percebe-se que a matriz cimentícia com a incorporação de ACBC em substituição a parte do agregado miúdo apresenta resultados melhores no que diz respeito a profundidade de carbonatação, pois promove um melhor tamponamento dos poros da matriz, dificultando a entrada de CO<sub>2</sub>, impactando no avanço da carbonatação nessa argamassa.

### **6.8.2. Penetração de Cloretos nas Argamassas**

Como os cloretos são elementos preponderantes para o estudo da técnica de PCA, a penetração de cloretos nos diferentes traços do presente estudo também foi analisada a fim de verificar se existe correlação com os resultados dos ensaios de PCA.

As argamassas foram analisadas após imersas em solução de NaCl (3,5 %) nas idades de 3, 7, 14, 21, 28 e 56 dias. Os resultados foram apresentados até 56 dias por conta da impossibilidade de visualização da região de destaque que representa a penetração de cloretos, assumindo que o cloreto alcançou a totalidade do corpo de prova em 56 dias nos ensaios com ciclos de molhagem e secagem. Além disso, foram analisadas imersas parcialmente e totalmente na solução salina, configurando os mesmos parâmetros de imersão utilizados nos ensaios de PCA, conforme ilustra a Figura 43.

**Figura 43 - Tipos de imersão logo após aplicação da solução indicadora**



Fonte: Autor (2021)

A região destacada nas extremidades dos corpos de prova após a aspersão da solução de nitrato de prata representa a profundidade alcançada pelos cloretos durante a realização do ensaio. Utilizando-se um paquímetro digital foram aferidas as profundidades de penetração de cloretos representadas pelas regiões destacadas. Percebe-se que como os corpos de prova com imersão parcial passaram por ciclos de molhagem e secagem, os mesmos apresentaram profundidade de penetração de cloretos maior do que em corpos de prova imersos totalmente em solução e, portanto, que não passaram por ciclos de envelhecimento acelerado. E as médias dos resultados obtidos para os três traços, para imersão total e sem ciclos, e para imersão parcial e com ciclos, estão apresentados na Tabela 13 e na Tabela 14, respectivamente.

**Tabela 13 - Penetração de cloretos nas argamassas (imersão total/sem ciclos)**

Idade (dias)	REF		LETA		ACBC	
	ACm* (mm)	CV** (%)	ACm* (mm)	CV** (%)	ACm* (mm)	CV** (%)
3	4,45	6,48	4,13	12,11	4,00	13,67
7	7,06	10,16	7,56	9,67	4,62	25,12
14	10,20	3,44	9,58	4,01	8,71	3,38
21	10,58	12,92	9,72	7,24	9,51	14,03
28	12,21	11,39	12,39	8,51	11,32	12,02
56	15,83	7,14	14,91	7,38	13,65	7,92

\*ACm: Avanço de cloretos médio; \*\*CV: Coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e a média)

Com base nos valores apresentados na Tabela 13 observou-se que até a data de 56 dias de ensaio as medidas médias de penetração de cloretos foram de 15,38 mm para o REF, 14,91 mm para o LETA e 13,65 mm para o ACBC, constatando-se que a matriz cimentícia com ACBC pode provocar um aumento na resistência à penetração de cloretos, visto que o avanço foi menor. No entanto, com 56 dias de ensaio para todos os traços não foi possível o alcance da solução salina nas barras de aço, que seria de 20 mm na pior situação, se considerado o revestimento utilizado nos corpos de prova do ensaio de PCA. Esses resultados confirmam a menor agressividade dos ensaios sem ciclos de molhagem e secagem e corroboram com os resultados de PCA sem a realização dos ciclos, os quais indicaram probabilidade menor do que 10% de corrosão até a semana 20 de ensaio. Além disso, sem a ocorrência do contato da solução de NaCl com as barras de aço e rompimento da camada de passivação do aço, não é possível o desenvolvimento do processo corrosivo por ataque de cloretos.

**Tabela 14 - Penetração de cloretos nas argamassas (imersão parcial/com ciclos)**

Idade (dias)	REF		LETA		ACBC	
	ACm* (mm)	CV** (%)	ACm* (mm)	CV** (%)	ACm* (mm)	CV** (%)
3	4,78	9,84	4,87	7,21	4,61	8,93
7	8,27	22,64	6,98	14,27	6,35	15,98
14	16,75	3,29	14,32	6,27	13,06	5,85
21	20,27	3,64	20,21	3,64	18,86	5,36
28	25,00	0	25,00	0	21,75	17,25
56	25,00	0	25,00	0	25,00	0

\*ACm: Avanço de cloretos médio; \*\*CV: Coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e a média)

Por outro lado, analisando os resultados provenientes do ensaio de penetração de cloretos com ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial, apresentados na Tabela 14, percebeu-se que para as argamassas REF e LETA a penetração de cloretos atingiu os corpos de prova por inteiro, valores representado por 25,00 mm tendo em vista que cada corpo de prova possui 50,00 mm de diâmetro e que as medidas são contadas a partir da lateral até o centro do corpo de prova, ou seja, compreendendo o raio de 25,00 mm. Já o traço contendo ACBC teve média do avanço dos cloretos de 21,75 mm, corroborando com os resultados apresentados no ensaio sem ciclos, o qual indicou o ACBC como traço que desempenhou melhor diante da exposição a solução salina. Por outro lado, com 56 dias em todos os corpos de prova, a penetração de cloretos já havia atingido a profundidade total dos corpos de prova.

Portanto, para os três traços estudados, a penetração de cloretos passou da medida de 20 mm em 28 dias, indicando que as barras de aço já estariam expostas à solução se consideradas as medidas de cobertura dos corpos de prova utilizados na técnica de PCA.

Comparando os dois ensaios, ficou evidente que a diferença entre a utilização ou não de ciclos de molhagem e secagem, faz com que o tempo em que a solução

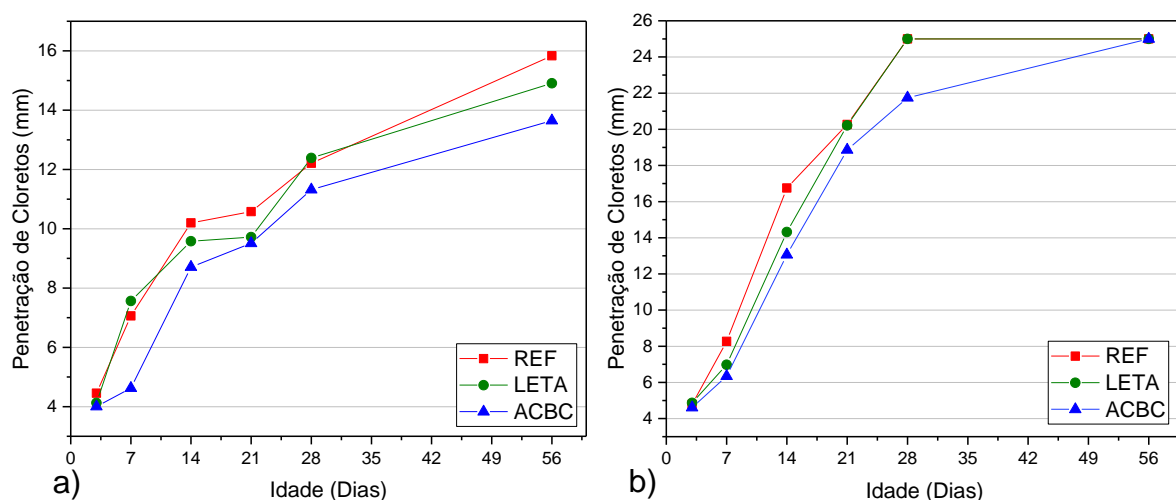
demora para atingir as barras de aço seja influenciado. Com a utilização de ciclos de molhagem e secagem esse contato ocorre de maneira mais rápida. Diferentemente do ensaio de carbonatação acelerada, nesse caso pode-se afirmar que a corrosão apresentada nos ensaios de PCA ocorreu em virtude da exposição das barras de aço aos cloretos.

O tempo maior para apontar a probabilidade alta de corrosão durante a técnica de PCA (acima de 28 dias) indica que as barras de aço, mesmo após o contato da solução de NaCl, podem ter apresentado certa proteção até o rompimento da camada de passivação do aço. E o melhor resultado verificado foi para as barras de aço embutidas em corpos de prova com a incorporação de ACBC, pois correlacionando os resultados do ensaio de penetração de cloretos com o ensaio de PCA, considerando o tempo em que a solução de NaCl atingiria as barras de aço, o ensaio de PCA ainda tardou em apontar a probabilidade de corrosão maior do que 90%.

No entanto, os corpos de prova utilizados no ensaio de PCA eram prismáticos, enquanto os corpos de prova utilizados na realização dos ensaios de penetração de cloretos eram cilíndricos. Assim, a situação em que são utilizados corpos de prova cilíndricos é pior, pois ocorre a soma de vetores de penetração de cloretos por conta do formato dos corpos de provas e isso promove um ingresso mais acentuado da solução nos corpos de prova se comparados aos corpos de provas prismáticos. Mesmo assim, o ensaio de penetração de cloretos mostrou a maior agressividade da utilização dos ciclos de molhagem e secagem combinados com a imersão parcial dos corpos de prova em comparação aos ensaios que não passaram por ciclos e utilizaram os corpos de prova imersos totalmente na solução, justificando os resultados dos ensaios de PCA.

Também foram traçadas curvas de tendência afim de avaliar a evolução da penetração de cloretos ao longo do tempo, conforme a Figura 44.

**Figura 44 - Tendência de evolução da penetração de cloretos das argamassas sem ciclos e imersão total (a) e com ciclos e imersão parcial (b)**



Fonte: Autor (2021)

Com base nos gráficos percebeu-se que os resultados de REF e LETA permanecem mais próximos um ao outro, enquanto ACBC apresentou melhores resultados, com penetração de cloretos menor ao longo do tempo. Comparando os gráficos também fica visível a diferença entre a profundidade em que os cloretos alcançaram em ambos os casos, destacando a eficiência da utilização de ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial (Figura 44b), para a obtenção de resultados mais rapidamente, na avaliação da corrosão do aço embutido em diferentes matrizes cimentícias.

A significância dos resultados das médias obtidas também foi avaliada adotando-se  $\alpha = 5\%$ , e os resultados da ANOVA dos ensaios sem ciclos e com imersão total, e com ciclos e imersão parcial, foram apresentados nas Tabela 15 e Tabela 16, respectivamente.

**Tabela 15 - Resultados de Valor-P, F (Sem ciclos e imersão total)**

<b>Idade (dias)</b>	<b>P-Valor</b>	<b>F</b>
3	0,057608529	3,115796953
7	3,53355E-09	37,16777402
14	2,19227E-11	56,52816321
21	0,076011844	2,788982629
28	0,104918209	2,415869792
56	0,00013787	11,7784462

Nota: O valor de F crítico foi de 3,284917651.

Observando os valores de P-Valor para cada idade entre os três traços avaliados, percebeu-se que para 3, 21 e 28 dias esse valor apresentou-se maior do que 5%, o qual foi o nível de significância considerado nos cálculos.

Esse resultado mostrou que não existiu diferença significativa entre os valores de profundidade de penetração de cloretos de cada traço para essas idades no ensaio sem a utilização de ciclos e com imersão total dos corpos de prova em solução, portanto, para essas idades, esses valores podem ser considerados estatisticamente semelhantes.

**Tabela 16 - Resultados de Valor-P, F (Com ciclos e imersão parcial)**

<b>Idade (dias)</b>	<b>P-Valor</b>	<b>F</b>
3	0,304740747	1,232128993
7	0,004894383	6,27730039
14	5,49998E-13	74,80453359
21	0,000236398	10,86926192
28	0,000741851	9,03651972
56	-	-

Nota: O valor de F crítico foi de 3,284917651.

Em se tratando dos resultados do ensaio com a utilização de ciclos de molhagem e secagem e imersão parcial da amostra observou-se que apenas na primeira idade (3 dias) apresentou P-valor maior do que 5%, ou seja, apenas para essa idade os valores de profundidade de penetração de cloretos não possuíam diferença significativa, podendo ser considerados estatisticamente semelhantes. Para o restante das idades houve uma diferença significativa entre os valores obtidos dos traços analisados. Essa diferença ocorreu em virtude do distanciamento dos valores de penetração de cloretos da argamassa com incorporação de ACBC que por meio do gráfico apresentado na Figura 44, ficou perceptível.

Utilizando os resultados da ANOVA, também foi possível verificar quais médias possuíam diferença significativa entre si, por meio do Teste de Tukey por pares. A realização do Teste de Tukey foi importante pois apenas os resultados de ANOVA apresentam a semelhança entre os dados do conjunto inteiro, enquanto o Teste de Tukey auxilia na diferenciação entre cada material, apontado se os resultados possuem ou não uma diferença significativa entre si. Os resultados obtidos por meio do Teste de Tukey estão apresentados nas Tabela 17 e 18.

**Tabela 17 - Teste T. para penetração de cloretos (Sem ciclos/imersão total)**

<b>Idade (dias)</b>	<b>REF (mm)</b>	<b>LETA (mm)</b>	<b>ACBC (mm)</b>
3	4,45 ± 0,29 <sup>a</sup>	4,13 ± 0,50 <sup>a</sup>	4,00 ± 0,55 <sup>a</sup>
7	7,06 ± 0,72 <sup>a</sup>	7,56 ± 0,73 <sup>a</sup>	4,62 ± 1,16 <sup>b</sup>
14	10,20 ± 0,35 <sup>a</sup>	9,58 ± 0,38 <sup>b</sup>	8,71 ± 0,29 <sup>c</sup>
21	10,58 ± 1,37 <sup>a</sup>	9,72 ± 0,70 <sup>a</sup>	9,51 ± 1,33 <sup>a</sup>
28	12,21 ± 1,39 <sup>a</sup>	12,39 ± 1,05 <sup>a</sup>	11,32 ± 1,36 <sup>a</sup>
56	15,83 ± 1,13 <sup>a</sup>	14,91 ± 1,18 <sup>b</sup>	13,65 ± 1,01 <sup>c</sup>

Nota: a, b e c revelam se existe diferença significativa entre os pares.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 17, percebeu-se maior semelhança entre os traços REF e LETA. No entanto, na maior parte do ensaio, as



diferenças entre as médias de cada traço não foram significativas quando não são realizados ciclos de molhagem e secagem e com a imersão total dos corpos de prova em solução de NaCl.

**Tabela 18 - Teste T. para penetração de cloretos (Com ciclos/imersão parcial)**

<b>Idade (dias)</b>	<b>REF (mm)</b>	<b>LETA (mm)</b>	<b>ACBC (mm)</b>
3	4,78 ± 0,47 <sup>a</sup>	4,87 ± 0,35 <sup>a</sup>	4,61 ± 0,41 <sup>a</sup>
7	8,27 ± 1,87 <sup>a</sup>	6,98 ± 1,00 <sup>a</sup>	6,35 ± 1,01 <sup>b</sup>
14	16,75 ± 0,55 <sup>a</sup>	14,32 ± 0,90 <sup>b</sup>	13,06 ± 0,76 <sup>c</sup>
21	20,27 ± 0,74 <sup>a</sup>	20,21 ± 0,74 <sup>a</sup>	18,86 ± 1,01 <sup>b</sup>
28	25,00 ± 0,00 <sup>a</sup>	25,00 ± 0,00 <sup>a</sup>	21,75 ± 3,75 <sup>b</sup>
56	25,00 ± 0,00 <sup>a</sup>	25,00 ± 0,00 <sup>a</sup>	25,00 ± 0,00 <sup>a</sup>

Nota: a, b e c revelam se existe diferença significativa entre os pares.

Por outro lado, o ensaio com a utilização de ciclos e imersão parcial da amostra apresentou diferença significativa da ACBC com relação aos outros traços durante todo desenvolvimento, com exceção a primeira idade (3 dias). Da mesma maneira que no outro ensaio, nesse os resultados apontaram para uma semelhança entre os traços REF e ACBC no que diz respeito a penetração de cloretos, pois apenas na idade de 14 dias eles apresentaram diferença significativa segundo o Teste Tukey. Com base nos resultados foi possível perceber que o distanciamento entre os valores médios de ACBC e dos outros materiais apontam para um melhor desempenho desse traço. Um fator que corrobora com essa informação é que enquanto os outros dois traços atingiram a penetração total dos corpos de prova, o valor médio de penetração de cloretos referente ao traço com ACBC ainda não havia atingido esse grau de penetração.

Na sequência, estão apresentadas as conclusões do presente estudo, apontando as suas principais contribuições.

## 7. Conclusões

A realização dos testes preliminares demonstrou-se importante para o andamento da pesquisa, e auxiliou na identificação de que além dos parâmetros propostos para a análise nesse estudo, existem formas de aprimorar os experimentos visando também procedimentos mais práticos e precisos. A aferição de potenciais em um grupo de barras de aço se mostrou uma técnica eficiente para mostrar que o lote adquirido não interferiria nos ensaios. A avaliação da limpeza das barras também se apresentou como uma maneira eficaz de eliminar todos os óxidos contidos na superfície das barras de aço. A identificação do revestimento ideal (fita isolante líquida) para delimitar a área de exposição das barras de aço na realização dos ensaios de PCA também foi imprescindível para o andamento da pesquisa. E de fato, a realização de um ensaio preliminar de PCA auxiliou na familiarização com a técnica e na identificação de formas para aprimorá-la. O molde desenvolvido pelo autor foi um dos aparatos que forneceu melhorias para os preparativos da técnica, pois facilitou o manuseio das barras durante o seu revestimento. Outras melhorias nos preparativos dos corpos de prova foram com relação à amarração com cabos de cobre e fita de cobre durante o contato elétrico dos eletrodos de trabalho, ao invés da soldagem. Também merece destaque o uso da fita isolante líquida destinada ao isolamento da superfície dos corpos de prova substituindo a massa plástica.

Com relação aos ensaios de PCA realizados, foi possível pontuar as vantagens e desvantagens da utilização dos sistemas de leitura, Arduino e multímetro, durante a técnica. Nesse sentido, foi possível concluir que o Arduino é mais indicado para ensaios longos e com análises contínuas, sem a utilização de ciclos de molhagem e secagem, enquanto o multímetro, por sua facilidade de manuseio, é mais indicado para ensaios com ciclos. Foi possível perceber também, que os eletrodos de referências avaliados nesse estudo não influenciaram nos resultados da técnica de PCA, e que apresentaram apenas uma diferença na estabilização dos potenciais durante as leituras. Por meio da análise da cura úmida, foi possível perceber que é importante a realização da cura até que as barras de aço apresentem probabilidade de corrosão menor do que 10% a fim de garantir a passivação do aço (acima de 50 dias de cura úmida), no entanto, é importante que esse procedimento seja avaliado

para utilização em concretos com alto desempenho. Com relação aos ciclos de molhagem e secagem, ficou evidente que a sua utilização faz com que se obtenha resultados mais rápidos da técnica de PCA, independente do traço e do tipo de imersão utilizados, configurando o parâmetro que tem maior influência nos resultados dessa técnica. No entanto, a combinação dos ciclos de molhagem e secagem com a imersão parcial trouxeram resultados ainda mais rápidos.

Também foi possível concluir que a técnica de PCA é aplicável em matrizes cimentícias com a incorporação de resíduos. E desse ensaio notou-se que as argamassas com a incorporação de LETA e ACBC forneceram ambiente com maior proteção para as barras de aço em virtude de que apresentaram probabilidade de corrosão mais tardia se comparados aos corpos de prova de argamassa convencional (REF).

No que diz respeito aos ensaios realizados, os resultados de profundidade de carbonatação e de penetração de cloretos mostraram que em todas as situações as argamassas contendo ACBC tiveram melhores resultados no âmbito de impedir o avanço da carbonatação e da penetração de cloretos. Também foi possível verificar a agressividade que os ciclos de molhagem e secagem combinados com a imersão parcial dos corpos de prova promovem no âmbito de favorecer o ingresso de cloretos nas matrizes cimentícias, corroborando com os resultados apresentados pelos ensaios de PCA.

Portanto, o presente estudo contribuiu com o aprimoramento desde as etapas de preparação até a execução da técnica de PCA, no âmbito de fornecer informações sobre as melhores condições experimentais para um ensaio mais rápido. Deste modo, os resultados deste estudo poderão servir como embasamento para o auxílio no monitoramento de corrosão laboratorial. Além disso, esta pesquisa revelou que a incorporação dos resíduos (LETA e ACBC) em substituição ao agregado miúdo, contribuiu para a formação de um ambiente protetor para as barras de aço frente ao ataque por cloretos.

## 8. Sugestões para trabalhos futuros

Na sequência, estão listadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o comportamento dos potenciais das barras de aço ao longo do ensaio de PCA com a utilização de diferentes intervalos de ciclos de molhagem e secagem (dias em estufa e imersos);
- Utilizar técnicas eletroquímicas quantitativas para analisar a correlação com os resultados com o presente estudo (Resistência de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica).
- Avaliar outros tipos de eletrodos de referência para a aplicação da técnica e verificar se existe alguma influência nos resultados;
- Estudar ensaio de PCA com revestimento de fita isolante líquida na parte inferior, limitando o ingresso de solução apenas na lateral dos corpos de prova;
- Avaliar a técnica de PCA sem a delimitação das áreas de exposição das barras de aço com fita isolante líquida (barras totalmente expostas).

## Referências Bibliográficas

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

ALMEIDA, F. C. R. *et al.* Use of sugarcane bagasse ash sand (SBAS) as corrosion retardant for reinforced Portland slag cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 72–82, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **G1 - 03 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens**, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C876 - 15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete** *Annual Book of ASTM Standards* Philadelphia, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações Habitacionais - Desempenho** Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOULI, B.; BALLIVY, G.; RIVARD, P. Influence of environmental parameters on application of standard ASTM C876-91: half cell potential measurements. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v. 43, n. 1, p. 93–96, 2008.

BANDALA, E. E. M. *et al.* Electrochemical Characterization of Modified Concretes with Sugar Cane Bagasse Ash. **International Journal of Electrochemical science**, v. 6, p. 4915–4926, 2011.

BERTOLINI, L. **Materiais de Construção: patologia, reabilitação e prevenção**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e**

**técnicas eletroquímicas**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado comportamento frente à corrosão**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2000.

CHO, H. C. *et al.* Estimation of concrete carbonation depth considering multiple influencing factors on the deterioration of durability for reinforced concrete structures. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, 2016.

GHORBANI, S. *et al.* Mechanical and durability behaviour of concrete with granite waste dust as partial cement replacement under adverse exposure conditions. **Construction and Building Materials**, v. 194, p. 143–152, 2019.

GODOY, L. G. G. *et al.* Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2020.

GOMES, S. *et al.* Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, n. February, p. 148–159, 2019.

HE, F. *et al.* AgNO<sub>3</sub>-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 1–8, 2012.

HELENE, P. Introdução. In: **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 1–10.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Universidade de São Paulo, 1993.

ISAIA, G. C. (ED.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

KOGA, G. Y.; ALBERT, B.; NOGUEIRA, R. P. Revisiting the ASTM C876 standard for corrosion of reinforcing steel: On the correlation between corrosion potential and polarization resistance during the curing of different cement mortars. **Electrochemistry Communications**, v. 94, n. July, p. 1–4, 2018.

MEDEIROS, M. H. F. *et al.* Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, p. 864–885, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MORETTI, J. P. **Incorporação de resíduo agroindustrial em matrizes cimentícias**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2018.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

REZENDE, M. A. M. **Matriz cimentícia produzida com resíduo agroindustrial: Reação álcali-agregado, ataque por sulfatos e passivação do aço**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2019.

RIBEIRO, D. V. **Influência da adição da lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado**. Universidade Federal de São Carlos, 2010.

RIBEIRO, D. V. Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos. In: **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 125–158.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Uso de técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado. In: **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 291–350.

RILEM. Draft Recommendation- Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC 18. **Materials and Structures**, v. 17, n. 102, p. 435–440, 1984.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of Soil-Cement Bricks. **Procedia Materials Science**, v. 8, p. 197–202, 2015.

SALES, A.; CORDEIRO, J. S. Imobilização da Fase Sólida de Lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Rio de Janeiro: RIMA/ABES/PROSAB, 2001. p. 245–258.

SALES, A.; SOUZA, F. R. Concretes and mortars recycled with water treatment sludge and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2362–2370, 2009.

SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2006.

SONG, H.; SARASWATHY, V. Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 2, p. 1–28, 2007.

SOUSA, C. A. C. Princípios da corrosão eletroquímica. In: **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. p. 11–32.

SOUZA, F. R. **Estudo da eco-eficiência de argamassas e concretos reciclados com resíduos de estações de tratamento de água e de construções e demolições**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, 2006.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. **Stockholm: Swedish Cement and Concrete**, 1982.



## Anexo

Este anexo contempla a caracterização dos materiais necessários para o desenvolvimento dos corpos de prova, que não foi apresentada no corpo do trabalho.

O resíduo lodo de estação de tratamento de água (LETA), utilizado para a produção de um dos traços de argamassa, foi caracterizado por Souza (2006). A Tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização físico-química do LETA. A concentração de sódio foi de 4,68 % e o pH de 7,20.

**Tabela 19 - Caracterização físico-química do LETA que utilizado na pesquisa**

<b>Variáveis</b>	<b>Valores (Mg/L)</b>
DQO	4800
Sólidos Totais	58630
Sólidos Suspensos	26520
Sólidos Dissolvidos	32110
Alumínio	11100
Zinco	4,25
Chumbo	1,60
Cádmio	0,02
Níquel	1,80
Ferro	5000
Manganês	60
Cobre	2,06
Cromo	1,58

Fonte: Souza (2006)

As elevadas concentrações de metais como o alumínio encontradas no LETA são justificadas pela aplicação de sulfato de alumínio como coagulante durante o tratamento de água (SOUZA, 2006).

Os demais materiais foram caracterizados por Moretti (2018) no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Com relação à ACBC a Tabela 20 apresenta os valores de massa específica e parâmetros D10, D50 e D90, correspondentes ao tamanho abaixo do qual ficou retido 10%, 50% e 90% do volume do material, respectivamente. Esses dados se referem à granulometria do material.

**Tabela 20 - Massa específica e parâmetros da granulometria da ACBC**

Amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
ACBC	2,69	2,43	22,79	73,27

Fonte: Moretti (2018)

A Tabela 21 apresenta a composição química da ACBC, a qual foi obtida por espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX).

**Tabela 21 - Composição química da ACBC utilizada na pesquisa**

Elementos	(% massa)
SiO <sub>2</sub>	91,3
CaO	0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0
SO <sub>3</sub>	-
K <sub>2</sub> O	0,5
TiO <sub>2</sub>	0,9
MgO	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,3
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1
MnO	0,1
Equivalente alcalino	0,6
Perda ao fogo	1,3

Fonte: Moretti (2018)

As areias naturais foram adquiridas na cidade de São Carlos e suas características físicas estão apresentadas na Tabela 22.

**Tabela 22 - Características físicas das areias finas utilizadas na pesquisa**

<b>Características</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Areia fina</b>	<b>Areia média</b>
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 (ABNT, 2009b) e NM 53 (ABNT, 2009c)	2,64	2,60
Massa unitária seca e solta (Kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006b)	1504,86	1623,42
Massa unitária compactada (Kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45 (ABNT, 2006b)	1704,34	1682,02
Absorção de água (%)	NBR NM 30 (ABNT, 2001a) e NM 53 (ABNT, 2009c)	0,34	0,46
Material pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003a)	1,33	0,35
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010b)	-	0,35
Impurezas orgânicas	NBR NM 49 (ABNT, 2001b)	Solução mais clara que a padrão	Solução mais clara que a padrão

Fonte: Moretti (2018)

O cimento utilizado na presente pesquisa é o cimento Portland CPV ARI, o qual foi analisado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e apresentou a composição apresentada na tabela 23.

**Tabela 23 - Características físicas e químicas do CP V ARI utilizado na pesquisa**

Características físicas		Características químicas			
	Unit.	Valor	Componentes	% em massa	
<b>Massa específica (ABNT, 2001c)</b>	g/cm <sup>3</sup>	3,12	Perda ao fogo	3,79	
<b>Início de pega (ABNT, 2003b)</b>	min	135	SiO <sub>2</sub>	19,17	
<b>Fim de pega (ABNT, 2003b)</b>	min	210	CaO	63,97	
<b>Água para pasta de consistência normal</b>	%	31,5	Mgo	0,61	
<b>Finura</b>	Retido #	%	0,1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,21
	Sup. Esp.	cm <sup>2</sup> /g	4730	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,03
<b>Resistência à compressão (f<sub>ci</sub>)</b>	1 dias		27,5	SO <sub>3</sub>	2,84
	3 dias	MPa	42,0	Na <sub>2</sub> O	0,06
	7 dias		48,7	K <sub>2</sub> O	0,61
	28 dias		52,2	CO <sub>2</sub>	2,38
			CaO	1,76	
			Resíduo insolúvel	0,85	
			Equivalente alcalino	0,46	

Fonte: Moretti (2018)

As areias fina e média utilizadas no estudo apresentaram a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 24.

**Tabela 24 - Distribuição granulométrica das areias utilizadas na pesquisa**

Peneira (mm)	Areia fina		Areia média	
	% Retida	% Acumulada	% Retida	% Acumulada
<b>8,000</b>	-	-	2,01	2,01
<b>6,300</b>	0,00	0,00	1,04	3,05
<b>5,600</b>	0,00	0,00	0,41	3,47
<b>4,800</b>	0,02	0,02	0,87	4,34
<b>4,000</b>	0,02	0,04	0,85	5,19
<b>3,400</b>	0,02	0,07	0,49	5,68
<b>2,800</b>	0,04	0,10	1,67	7,35
<b>2,400</b>	0,05	0,16	1,82	9,17
<b>2,000</b>	0,06	0,22	2,24	11,41
<b>1,700</b>	0,06	0,28	2,78	14,18
<b>1,400</b>	0,05	0,33	2,78	16,96
<b>1,200</b>	0,09	0,42	4,21	21,17
<b>1,000</b>	0,12	0,54	6,05	27,22
<b>0,850</b>	0,07	0,60	4,72	31,94
<b>0,710</b>	0,07	0,68	7,61	39,55
<b>0,600</b>	0,11	0,79	6,55	46,10
<b>0,500</b>	6,10	6,89	8,62	54,72
<b>0,425</b>	12,16	19,06	8,17	62,89
<b>0,355</b>	6,69	25,75	5,66	68,55
<b>0,300</b>	14,91	40,66	7,67	76,22
<b>0,250</b>	12,59	53,25	7,51	83,72
<b>0,212</b>	7,17	60,42	3,91	87,64
<b>0,180</b>	17,73	78,15	5,76	93,40
<b>0,150</b>	11,45	89,61	3,47	96,87
<b>0,125</b>	2,23	91,84	1,06	97,92
<b>0,106</b>	4,30	96,14	0,94	98,87
<b>Fundo</b>	<b>3,86</b>	<b>100,00</b>	<b>1,13</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Moretti (2018)