

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**STEFANIA DAROLD SOUZA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE BARRAS DE AÇO  
GALVANIZADOS EM GRAMPOS PARA OBRAS DE CONTENÇÃO**

**São Leopoldo**

**2021**

STEFANIA DAROLD SOUZA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE BARRAS DE AÇO  
GALVANIZADOS EM GRAMPOS PARA OBRAS DE CONTENÇÃO**

Projeto de Dissertação apresentados(a)  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –  
UNISINOS

Orientador: Prof Dr. Mauricio Mancio

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Gobbi

São Leopoldo

2021

S729a

Souza, Stefania Darold.

Avaliação da resistência à corrosão de barras de aço galvanizados em grampos para obras de contenção / Stefania Darold Souza. – 2021.

185 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

“Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Gobbi”

1. Corrosão. 2. Cloretos. 3. Galvanização. 4. Pasta de Cimento. 5. Solo grampeado. I. Título.

CDU 620.193

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

STEFANIA DAROLD SOUZA  
**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE BARRAS DE AÇO  
GALVANIZADOS EM GRAMPOS PARA OBRAS DE CONTENÇÃO**

Dissertação apresentados(a) para  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –  
UNISINOS

Orientador: Prof Dr. Mauricio Mancio

Coorientador: Prof. Dr. Felipe Gobbi

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.º Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes – UNISINOS

---

Profª. Dra. Marlova Piva Kulakowski – UNISINOS

---

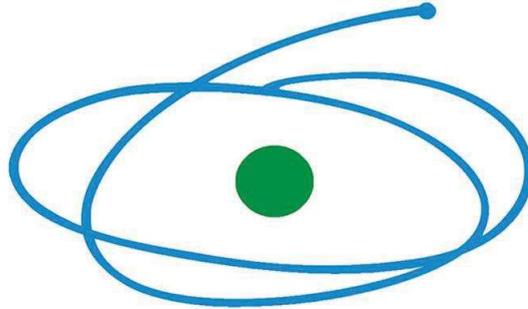
Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade – PUC-RS

São Leopoldo

2021

## **AGRADECIMENTOS À CAPES**

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



**C A P E S**

## AGRADECIMENTOS

Eu encaro a educação como uma ferramenta de mudança de vida, e com toda a certeza, ela mudou a minha vida e de um montão de gente. Ainda me frustra muito viver em um país onde a cada dia que passa ela é menos valorizada. Sinto por todos que não foram privilegiados, e tiveram a mesma sorte que eu, que continuemos a lutar por um mundo mais justo.

Dessa forma não é possível eu iniciar esse agradecimento sem ser pela maior entusiasta pela educação que eu conheço, minha mãe. Paula Darold. Talvez ela não saiba que o que é ser entusiasta ou nem ache que fez mais que a obrigação dela em relação a mim, mas como toda a certeza eu posso dizer, eu só cheguei aqui porque minha mãe lutou muito por mim e sempre me incentivou a seguir nos caminhos do estudo, para viver uma vida diferente da dela, Obrigada, Mãe, eu consegui.

Não podendo deixar de lado minha tia Neive (*in memoriam*), que sempre trazia livros do colégio em que trabalhava, me ensinou o valor da educação e dos estudos, sinto por não ter feito mais por você, obrigada.

Agradeço ao meu companheiro de vida Arthur Rossi, que esteve comigo em todos os momentos desde 2016, onde por um acaso do destino nos encontramos. Obrigada por estar comigo, me apoiar e ajudar sempre, minha vida com certeza é melhor porque você está comigo, te amo. Também agradeço Giseli e Fernanda que são parte da minha família também.

A minha amiga Cristhiana Albert, que além de amiga foi conselheira, apoio técnico, ombro amigo e revisora. Obrigada pelas inúmeras ajudas e por estar presente durante praticamente todo o meu mestrado. Não existem palavras que descrevam minha admiração e minha gratidão por ti.

A Camila Werner, que além do apoio no programa experimental, também compartilhou comigo seu conhecimento, com certeza sem a tua ajuda esse trabalho não estaria concretizado.

Aos amigos que fiz durante a graduação e estreitei laços durante o mestrado, obrigada pelo auxílio, por cada dúvida sanada e por cada risada, a vida de mestranda é mais fácil com vocês: Monique, Mateus, Paulo, Vanessa e Vitória.

Aos laboratoristas do LMC Bianca, Igor, André e Leonardo que me ajudaram inúmeras vezes e que por muitos dias trabalharam até mais tarde para me atender,

Obrigada. Agradeço também a Alini, do LCVMat pelo apoio com os ensaios eletroquímicos.

Ao meu orientador Mauricio Mancio, por todo o apoio técnico e por ser esse ser humano exemplar que inspira muita gente, se um dia eu for metade do ser humano que você é sei que serei uma grande pessoa. Por fim ao meu coorientador Felipe Gobbi, por sempre representar para mim exemplo de profissional e professor.

## RESUMO

DAROLD, S. Avaliação da resistência à corrosão de barras de aço galvanizados em grampos para obras de contenção. São Leopoldo, 2021. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2021.

A técnica de solo grampeado nos últimos anos está sendo cada vez mais empregada em obras de estabilização de taludes e escavações. Até o início de 2020 não existia uma norma brasileira para projeto e execução de estruturas de solo grampeado. Também não existindo recomendações técnicas em relação ao material de injeção (pasta de cimento<sup>1</sup>) ou a barra a ser utilizada e sua respectiva durabilidade, era de comum acordo a utilização de manuais ou normas internacionais. A durabilidade de uma estrutura é determinada por vários fatores e quando essa estrutura envolve componentes metálicos, um dos principais é a corrosão. Por este motivo, as barras de aço utilizadas no mercado atualmente possuem uma camada de galvanização, e, além da proteção galvânica a segunda camada de proteção é feita pela pasta de cimento, a qual precisa ser fluida para melhor execução da injeção, o que acaba por elevar a relação água/cimento (a/c) da mistura. Deste modo, nesse trabalho foram estudadas formas de mitigar características intrínsecas das pastas que poderiam de alguma forma acelerar o processo de corrosão. Foram realizados ensaios em estado fresco, endurecido e eletroquímicos em duas pastas com fluidez similar, mas com distintas relações a/c (0,50 e 0,35) com diferentes tipos de cura e expostas ou não a um ambiente agressivo com a presença de cloretos. Assim, foi possível perceber que as pastas com relação a/c 0,35 apresentaram resultados mais satisfatórios para porosidade, menor absorção e fissuração e maior resistência do que as pastas com a/c 0,50. Quando comparadas as pastas em relação a penetração de cloretos, obteve-se uma penetração média sete vezes superior para a pasta com relação a/c 0,50, em comparação à pasta com relação a/c 0,35 e aditivo.

**Palavras-chave:** solo grampeado, pasta de cimento, corrosão, cloretos, monitoramento, taxa de corrosão, galvanização

---

<sup>1</sup> Apesar dos termos *nata* ou *calda* de cimento serem comumente utilizados na área geotécnica, neste trabalho é adotada a nomenclatura *pasta* de cimento para descrever a mistura entre cimento e água (e, opcionalmente, aditivos químicos), conforme utilizado nas áreas de cimento e tecnologia de argamassas e concretos.

## ABSTRACT

The soil nail in recent years has been increasingly used in slope stabilization and excavation works. Until the beginning of 2020 there was no Brazilian standard for the design and execution of stapled soil structures. There were also no technical recommendations in relation to the injection material (cement paste) or the bar to be used and its respective durability, it was common agreement to use manuals or international standards. The durability of a structure is determined by several factors and when this structure involves metallic components, one of the main ones is corrosion. For this reason, the steel bars currently used in the market have a galvanizing layer, and, in addition to the galvanic protection, the second protection layer is made by cement paste, which needs to be fluid for better injection execution, which ends up by raising the water/cement ratio (w/c) of the mixture. Thus, in this work, ways to mitigate the intrinsic characteristics of the pastes that could somehow accelerate the corrosion process were studied. Fresh, hardened and electrochemical tests were carried out on two pastes with similar fluidity, but with different w/c ratios (0.50 and 0.35) with different types of cure and exposed or not to an aggressive environment with the presence of chlorides. Thus, it was possible to see that the pastes with w/c 0.35 presented more satisfactory results for porosity, less absorption and cracking and greater strength than the pastes with w/c 0.50. When the pulps were compared in relation to chloride penetration, an average penetration rate was seven times higher for the pulp with a relation w/c 0.50, compared to the pulp with a relation w/c 0.35 and additive.

**Palavras-chave:** soil nail, cement paste, corrosion, chlorides, monitoring, corrosion rate, galvanizing

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Superfícies de ruptura .....	22
Figura 2 – Aplicações do solo grampeado .....	23
Figura 3 – Elementos que compõem uma estrutura de solo grampeado .....	26
Figura 4 – Sequência executiva do solo grampeado.....	27
Figura 5 – Modelo de divisão das zonas de atuação da força dos grampos .....	28
Figura 6 – Mecanismo de transferência de força das forças de tração resultantes...29	29
Figura 7 – Distribuição de esforços ao longo do contato solo/grampo .....	30
Figura 8 – Relação porosidade x relação a/c .....	33
Figura 9 – Ciclo de ganho e perda de energia do ferro .....	35
Figura 10 – Pilha de corrosão .....	37
Figura 11 – Diagrama de Pourbaix para Fe-H <sub>2</sub> O .....	38
Figura 12 – Corrosão por pites.....	39
Figura 13 – Representação de uma curva de Tafel Genérica .....	41
Figura 14 – Resistência de Polarização Linear .....	42
Figura 15 – Isolamento das barras.....	46
Figura 16 – Esquema de isolamento da barra.....	47
Figura 17 – Estrutura do programa experimental .....	49
Figura 18 – Funil de Marsh a) dimensões internas b) funil acoplado .....	52
Figura 19 – Placa para análise de fissuração.....	53
Figura 20 - Corpos de Prova durante ensaio de absorção por capilaridade .....	54
Figura 21 – Corpo de prova para resistência à compressão .....	55
Figura 22 – Desenho esquemático do corpo de prova.....	56
Figura 23 – Corpo de Prova Montado .....	56
Figura 24 – Célula eletroquímica montada.....	58
Figura 25 – Corpo de prova para penetração de cloretos .....	59
Figura 26 – Fissuração produzida em pasta relação a/c 0,50 .....	63
Figura 27 – Fissuração produzida em pasta relação a/c 0,50 .....	64
Figura 28 – Resumo dos resultados para absorção por capilar. ....	65
Figura 29 – Amostras curadas em forma por 28 dias, após a aspersão de Nitrato de Prata (AgNO <sub>3</sub> ) .....	68
Figura 30 – Amostras curadas em forma por 1 dia, após a aspersão de Nitrato de Prata (AgNO <sub>3</sub> ) .....	70

Figura 31 – Variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos.....	72
Figura 32 – Variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma com exposição à cloretos.....	74
Figura 33 -Variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas sem exposição à cloretos .....	76
Figura 34 - Variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos .....	78
Figura 35 – Comparação do Potencial de Corrosão ( $E_{corr}$ ).....	81
Figura 36 - Curvas de polarização ao final de 42 dias em solução (curadas previamente em formas).....	83
Figura 37 - Curvas de polarização ao final de 42 dias em solução (curadas submersas).....	85
Figura 38 - Curvas de polarização ao final de 42 dias em solução para pastas curadas submersos .....	86
Figura 39 – Resistência de polarização ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos.....	88
Figura 40 – Resistência de polarização ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma com exposição à cloretos.....	90
Figura 41 - Resistência de polarização ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos .....	94
Figura 42 – Comparação da Resistência de Polarização (RP) .....	96
Figura 43 - Variação do $I_{corr}$ e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos.....	98
Figura 44 - Variação do $I_{corr}$ e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas em forma com exposição à cloretos.....	100
Figura 45 - Variação do $I_{corr}$ e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas submersas e sem exposição à cloretos .....	101
Figura 46 - Variação do $I_{corr}$ e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas submersas e com exposição à cloretos .....	103
Figura 47 – Comparação do $I_{corr}$ .....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros relacionados por Steinrath para avaliação de corrosividade do solo.....	32
Tabela 2 – Índice total da agressividade do solo segundo Steinrath.....	32
Tabela 3 – Probabilidade de corrosão a partir do $E_{corr}$ .....	40
Tabela 4 – Relação de valores de corrente de corrosão e a durabilidade da armadura.....	44
Tabela 5 – Níveis de estudo.....	50
Tabela 6 – Resumo das siglas utilizadas .....	50
Tabela 7 – Resumo das siglas utilizadas .....	51
Tabela 8 - Resumo das siglas utilizadas no ensaio de absorção.....	54
Tabela 9 - Amostras para ensaios Eletroquímicos .....	57
Tabela 10 - Resumo das siglas utilizadas no ensaio de penetração de íons cloreto	59
Tabela 11 – Presença de cloretos em corpos de prova .....	60
Tabela 12 – Resumo dos tempos para Funil de Marsh.....	62
Tabela 13 – Tabela resumo dos resultados referentes a ABNT NBR 9778:2005 .....	66
Tabela 14 – Resistência à compressão para 7, 14 e 28 dias.....	67
Tabela 15 -Resumo da variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos.....	72
Tabela 16 -Resumo da variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma com exposição à cloretos.....	74
Tabela 17 -Resumo da variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas sem exposição à cloretos .....	77
Tabela 18 -Resumo da variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos .....	79
Tabela 19 – Constantes de Stern-Geary (B) para pastas curadas em forma.....	83
Tabela 20 – Constantes de Stern-Geary (B) para pastas curadas submersas .....	85
Tabela 21 -Resumo do potencial de corrosão (RP) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos .....	88
Tabela 22 -Resumo do potencial de corrosão (RP) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma com exposição à cloretos .....	90
Tabela 23 -Resumo do potencial de corrosão (RP) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas sem exposição à cloretos.....	92

Tabela 24 -Resumo do potencial de corrosão (RP) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos.....	94
Tabela 25 – Resumo da variação do $I_{corr}$ e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos .....	99
Tabela 26 – Resumo da variação do $I_{corr}$ e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas em forma com exposição à cloretos .....	100
Tabela 27 – Resumo da variação do $I_{corr}$ e da Taxa de Corrosão anual para pastas submersas e sem exposição à cloretos .....	102
Tabela 28 - Resumo da variação do $I_{corr}$ e da Taxa de Corrosão anual para pastas submersas e com exposição à cloretos .....	103

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	18
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>18</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>18</b>
1.2 JUSTIFICATIVA .....	18
1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	19
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>21</b>
2.1 SOLO GRAMPEADO .....	21
<b>2.1.1 Histórico</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1.2 Comportamento do Solo Grampeado</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.3 Aplicações</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.4 Considerações de Projeto</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.5 Elementos do Solo Grampeado</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1.6 Execução</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.7 Comportamento do Grampo</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1.8 Interação Solo e Grampo</b> .....	<b>29</b>
2.2 DURABILIDADE DO SOLO GRAMPEADO .....	30
<b>2.2.1 Agressividade do Solo</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2.2 Características da pasta de cimento</b> .....	<b>33</b>
2.3.2.1 Porosidade .....	33
2.3.2.2 Fissuração.....	34
<b>2.2.3 Corrosão nos Grampos</b> .....	<b>34</b>
2.3 CORROSÃO .....	35
<b>2.3.1 Mecanismo de Corrosão</b> .....	<b>36</b>
<b>2.3.2. Filme de Passivação</b> .....	<b>37</b>
<b>2.3.3. Penetração de Íons Cloreto</b> .....	<b>38</b>
<b>2.3.4 Monitoramento da Corrosão</b> .....	<b>40</b>
2.3.4.1 Potencial de Corrosão .....	40
2.3.4.2 Curvas de Tafel .....	41
2.3.4.3 Resistência de Polarização Linear .....	42
2.3.4.4 Taxa de Corrosão.....	44
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>45</b>

3.1 MATERIAIS .....	45
<b>3.1.1 Cimento CP IV 32 RS.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1.2 Água .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.3 Grampo.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.4 Galvanização .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.5 Aditivo Superplastificante .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.6 Soluções de Imersão.....</b>	<b>48</b>
3.2.6.1 Solução Água e Hidróxido de Cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) .....	48
3.2.6.1 Solução Água e Cloreto de Sódio ( $\text{NaCl}$ ) .....	48
3.2 MÉTODOS .....	48
<b>3.2.1 Planejamento do Programa Experimental.....</b>	<b>48</b>
3.2.1.1 Fatores de Controle e Níveis de Estudo.....	50
3.2.1.1 Variáveis de resposta .....	50
<b>3.2.2 Moldagem da Pasta .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.3 Ensaio no Estado Fresco da Pasta .....</b>	<b>51</b>
3.2.3.1 Funil de Marsh.....	52
3.2.3.3 Fissuração.....	52
<b>3.2.4 Ensaio No Estado Endurecido .....</b>	<b>53</b>
3.2.4.1 Absorção de Água por Capilaridade.....	53
3.2.4.2 Absorção de Água Total - Índice de Vazios e Massa Específica.....	54
3.2.4.3 Resistência à Compressão.....	55
<b>3.2.5 Ensaio De Corrosão .....</b>	<b>55</b>
3.2.5.1 Preparação das Amostras .....	55
3.2.5.2 Potencial de Corrosão e Resistência de Polarização Linear .....	57
3.2.5.3 Curvas de Polarização .....	58
3.2.5.4 Penetração de Íons Cloreto .....	59
<b>4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	61
<b>4.1.1 Funil de Marsh .....</b>	<b>61</b>
4.2 ESTADO ENDURECIDO.....	63
<b>4.2.1 Fissuração .....</b>	<b>63</b>
4.2.1.1 Relação a/c 0,50 .....	63
4.2.1.2 Relação a/c 0,35 .....	64
<b>4.2.2 Absorção de Água por capilaridade .....</b>	<b>65</b>

<b>4.2.3 Absorção de Água Total - Índice de Vazios e Massa Específica.....</b>	<b>66</b>
<b>4.2.4 Resistência à Compressão.....</b>	<b>67</b>
<b>4.2.5 Penetração de Cloretos .....</b>	<b>68</b>
4.2.5.1 Cura em forma .....	68
4.2.5.1 Cura submersa.....	69
<b>4.3 CORROSÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.1 Potencial de Corrosão .....</b>	<b>71</b>
4.3.1.1 Cura em forma sem exposição posterior à cloretos .....	71
4.3.1.2 Cura em forma com exposição posterior à cloretos .....	74
4.3.1.3 Cura submersa sem exposição à cloretos.....	76
4.3.1.4 Cura submersa com exposição à cloretos.....	78
4.3.1.5 Comparação entre os tipos de cura .....	80
<b>4.3.2 Curvas de Polarização .....</b>	<b>82</b>
4.3.2.1 Cura em forma .....	83
4.3.2.3 Cura submersa.....	84
4.3.2.5 Comparação entre os tipos de cura .....	86
<b>4.3.3 Resistência de Polarização Linear.....</b>	<b>87</b>
4.3.3.1 Cura em forma sem exposição à cloretos .....	88
4.3.3.2 Cura em forma com exposição à cloretos .....	90
4.3.3.3 Cura submersa sem exposição à cloretos.....	92
4.3.3.4 Cura submersa com exposição à cloretos.....	94
4.3.3.5 Comparação entre os tipos de cura .....	96
<b>4.3.4 Corrente de Corrosão e Taxa de Corrosão .....</b>	<b>98</b>
4.3.4.1 Cura em forma sem exposição posterior à cloretos .....	98
4.3.4.2 Cura em forma com exposição posterior à cloretos .....	99
4.3.4.3 Cura submersa sem exposição à cloretos.....	101
4.3.4.4 Cura submersa com exposição à cloretos.....	102
4.3.4.5 Comparação entre os tipos de cura .....	104
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>106</b>
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	108
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>121</b>

**ANEXO D ..... 122**  
**APÊNDICE A ..... 125**  
**APÊNDICE B ..... 173**

## 1 INTRODUÇÃO

A técnica de solo grampeado se originou na execução de reforços em túneis em rocha ou solos resistentes. Foi usada pela primeira vez como técnica de estabilização de taludes na França, no início da década de 1970, devido aos investimentos recebidos pelo governo francês. No decorrer dos anos, o solo grampeado ganhou espaço no restante do mundo (CLOUTERRE, 1991; BYRNE *et al.*, 1998).

Atualmente, o solo grampeado é muito utilizado para a estabilização de taludes, tanto naturais quanto de corte. Isso ocorre porque se trata de uma intervenção muito rápida, econômica e de pouca interferência no meio de instalação. A técnica de solo grampeado consiste basicamente na introdução de barras de aço que funcionarão como reforço para o solo, combinadas com um faceamento em concreto projetado ou tela metálica e drenagem (CLOUTERRE, 1991; GEOGUIDE 7, 2008; LAZARTE *et al.*, 2015).

As barras de aço usadas para a execução do solo grampeado comumente são chamadas de grampos. A adesão desta barra ao solo se dá, normalmente, pela injeção de uma mistura fluida de cimento e água, tipicamente denominada nata ou calda de cimento no meio geotécnico. Neste trabalho, será adotada a nomenclatura pasta de cimento para essa mistura, conforme definição adotada nas áreas de cimento e tecnologia de argamassa e concretos. A pasta de cimento muitas vezes também tem a finalidade de proteger a barra contra corrosão, evitando ou retardando a penetração de agentes agressivos até o grampo, e propiciando um ambiente alcalino que protege o aço da oxidação. (LAZARTE *et al.*, 2015).

Devido aos grampos estarem enterrados e em um ambiente muito favorável ao aparecimento de manifestações patológicas, Jayawickrama (2007) apontou uma problemática ligada a durabilidade e recuperação de problemas em estruturas de solo grampeado. Normalmente, as primeiras ações relacionadas à corrosão ocorrem devido a visualização da problemática. No caso do solo grampeado, a análise visual é praticamente impossível na grande maioria das vezes, já que grande parte dos elementos estão enterrados. Muitas vezes, após o colapso da estrutura, percebem-se grandes pontos de manifestações patológicas que poderiam ter sido minimizados.

A causa de colapso de estruturas de solo grampeado apontados por Jayawickrama (2007) é a soma de diversos fatores. Destaca-se a corrosão de

grampos pela ineficiência de injeção, falhas executivas, ineficiência de drenagem e falha na aderência entre o solo e a pasta de cimento. O problema abordado neste trabalho será a corrosão de grampos.

Em um contexto mundial, Mitchell e Villet (1987) abordaram pela primeira vez a durabilidade em obras de solo grampeado. Os autores destacaram a corrosão dos grampos e a sua importância na durabilidade dessas estruturas.

Já no Brasil, a problemática de durabilidade do solo grampeado ainda não é muito abordada. Isso ocorre, principalmente, porque a introdução do solo grampeado no Brasil se deu em meados dos anos 1970. Portanto, as primeiras estruturas de solo grampeado estão apenas completando cerca de 50 anos, sendo que estima-se a sua durabilidade de projeto entre 75 e 100 anos. (MITCHELL; VILLET, 1987; ORTIGÃO *et al.*, 1992). Assim, reforça-se a importância do desenvolvimento de estudos na área de corrosão desde já, a fim de haver base teórica para tratar da deterioração destas estruturas no futuro.

Sabe-se que os grampos apresentam alguns artifícios de proteção contra a corrosão. Um deles é o fato de estarem envoltos em uma camada de pasta de cimento, que apresentam um pH alto, entre 12,5 e 13,5. Um pH alto gera um ambiente alcalino, essencial para a formação do filme de passivação, o qual confere ao aço uma proteção à corrosão (CLOUTERRE, 1991; MINDESS *et al.*, 2003; CASCUDO, 1997; HELENE, 1986).

A pasta de cimento para injeção normalmente apresenta uma relação água cimento alta. Sabe-se que essa característica confere à pasta uma alta porosidade, retração plástica e fissuração como consequência da retração. Acredita-se que essas manifestações patológicas, juntamente com a corrosão, diminuem a durabilidade do grampo (CLOUTERRE, 1991; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A porosidade e a fissuração, quando em excesso, podem facilitar o contato do meio externo com a barra, fazendo com que agentes agressivos cheguem mais facilmente e, assim, acelerem o processo de corrosão. A corrosão muitas vezes compromete a estrutura e pode levá-la ao colapso, já que a barra é consumida pelo processo. Em consequência, a seção muda, deixando de ser aquela considerada inicialmente em projeto. (CAMPITELI, 1987; CLOUTERRE, 1991; QUARCIONI *et al.*, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Portanto, reforça-se a realidade nacional com falta de uma norma regulamentadora que ampare os profissionais de engenharia no momento do

projeto; falhas na execução, bem como a dificuldade do acompanhamento, vistoria e reparo dessas estruturas. Neste contexto, é importante a estimativa de uma durabilidade mais próxima da realidade, justificando assim a relevância do presente estudo.

## 1.1 OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho podem ser divididos em objetivos gerais e específicos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a resistência à corrosão de grampos galvanizados, utilizados para obras de contenção em solo grampeado.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) analisar o comportamento da porosidade da pasta
- b) analisar o comportamento de fissuração da pasta de cimento;
- c) avaliar eletroquimicamente a resistência à corrosão da camada de galvanização do grampo com as diferentes pastas de cimento e condições de exposição;
- d) determinar a partir dos ensaios de corrosão uma provável durabilidade para a camada de galvanização do grampo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As estruturas de solo grampeado ancoram grandes massas de solo e rocha, concentradas normalmente próximas de rodovias, ferrovias ou zonas urbanas. Quando seus elementos começam a apresentar falhas, não se pode descartar a chance de um possível colapso, já que a encosta ou talude em questão não está mais estável. Um colapso total ou parcial da estrutura pode gerar grandes problemas

econômicos, ambientais e sociais para o seu entorno (CLOUTERRE, 1991; ORTIGÃO *et al.*, 1992; MITCHELL; VILLET, 1987).

Para que o colapso das estruturas de solo grampeado possa ser previsto e impedido, deve-se ter uma atenção especial ao quesito durabilidade. Atualmente, quando se trata de durabilidade, usa-se como referência a NBR 5629 (ABNT, 2018). A normativa se refere a tirantes, que mesmo tendo uma estrutura relativamente parecida com os grampos, não apresentam a mesma função estrutural e nem os mesmos elementos (CLOUTERRE, 1991).

Por exemplo: mesmo a pasta sendo um bom material compósito, e que apresenta uma boa proteção contra a corrosão, pelo seu alto pH, ela ainda pode apresentar falhas. Essas falhas devem ser estudadas para que, no futuro, possam ser minimizadas, contribuindo assim para a uma maior durabilidade da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Em relação aos grampos, mesmo existindo a premissa de que os grampos devem ter uma camada de proteção contra a corrosão, isso se torna muito vago já que muitos manuais não trazem como essa camada deve de fato ser ou funcionar. Se a corrosão em concreto armado ainda é foco de muitos estudos, já que apresenta ainda muitas lacunas sobre seu comportamento, quando se trata de corrosão em solo grampeados, mais lacunas ainda existem, já que esse tipo de situação é raramente estudada (BROOMFIELD, 2007; MANCIO 2008; CLOUTERRE, 1991; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os pontos abordados anteriormente, o fato desta solução geotécnica ainda ser relativamente nova e a pouca ou quase nenhuma literatura referente a durabilidade de solo grampeado justificam a importância e a necessidade do estudo em questão.

### 1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A partir da definição dos objetivos gerais e específicos, é possível delimitar a pesquisa.

A durabilidade de uma estrutura de solo grampeado está atrelada a diversas variáveis, entre eles: o solo em que estrutura estará instalada, o clima da região, o tipo de cimento que será usado, a condição de cura, a relação água/cimento, presença ou não de aditivos, o tipo de aço para os grampos e, também, a forma

como a estrutura foi executada. Devido a todas essas variáveis apresentadas, é importante que o trabalho e o programa experimental sejam delimitados. Essa delimitação é feita a partir do tempo hábil, da matéria prima e dos equipamentos disponíveis. Esse trabalho levará em conta os seguintes itens:

- a) tipo de cimento: o cimento usado será o CP – IV, sendo ele o mais utilizado nesse tipo de obra e, também, o mais recomendado;
- b) relação água/cimento: para corpos de prova referência será de 0,50, valor já comumente usado em obras de solo grampeado; para corpos de prova com uso de aditivo será 0,35, conforme ensaios;
- c) será utilizado aditivo superplastificante para a relação água cimento 0,35, em 0,5% da massa do cimento.
- d) em relação à pasta, serão realizados ensaios no estado fresco de consistência e fissuração. No estado endurecido, serão realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, absorção de água total e resistência à compressão.
- e) a corrosão será avaliada apenas para situações que envolvem o grampo (barra de aço) e a pasta, sendo excluído do estudo as placas de fixação, pois elas têm fácil manutenção e podem ser trocadas.
- f) variáveis envolvidas no processo de corrosão: método de cura e presença de cloretos na solução.
- g) o trabalho não irá levar em consideração a corrosão sob tensão.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma contextualização geral sobre a técnica de solo grampeado, entre eles o histórico, formas de utilização, formas de execução, durabilidade e suas manifestações patológicas e a como monitorá-las.

### 2.1 SOLO GRAMPEADO

O solo grampeado é uma técnica utilizada para a estabilização de massas de solo ou blocos de rocha, onde um elemento passivo (barra de aço) nomeado de grampo é introduzido no solo, combinado com um faceamento de concreto projetado ou tela metálica. Esse sistema é uma derivação da técnica de suporte de escavação em túneis *New Austriac Tunneling Method* (NATM). A técnica NATM substitui o uso de revestimentos mais robustos e rígidos quando se trata de escavação, pela instalação de grampos no próprio maciço (CLOUTERRE, 1991).

Os grampos são alocados em um determinado espaçamento e usualmente inseridos em conjunto com a Pasta de cimento, uma vez que a mesma atua como ligação entre a barra e o solo e também como uma proteção contra a corrosão. Durante o dimensionamento deve se levar em conta o solo em que estão sendo instalados, a inclinação do talude e também a interação do solo com a pasta de cimento. Tais parâmetros são essenciais para determinação do comprimento do grampo. A interação solo versus pasta de cimento é a capacidade que um grampo tem de suportar uma carga, sendo em função da resistência de cisalhamento nessa interação, chamado de  $q_s$  (CLOUTERRE, 1991).

#### 2.1.1 Histórico

O método de solo grampeado surgiu a partir do método NATM, que começou sendo aplicado em rochas menos resistentes até a aplicação em solos, dando origem ao chamado solo grampeado. Assim o solo grampeado foi aplicado pela primeira vez na França em 1972 em um talude de aproximadamente 18,00 metros que foi utilizado, no alargamento de uma estrada de ferro próximo a Versalhes, com o sucesso dessa obra se expandiu para o restante da Europa (CLOUTERRE, 1991).

Nos Estados Unidos a técnica foi aplicada pela primeira vez na cidade de Portland, no estado do Oregon em 1979, em uma escavação de aproximadamente 15,00 metros, foi observado uma economia de oitenta e cinco por cento nos gastos e o tempo de execução reduzido pela metade (BYRNE *et al.*, 1998).

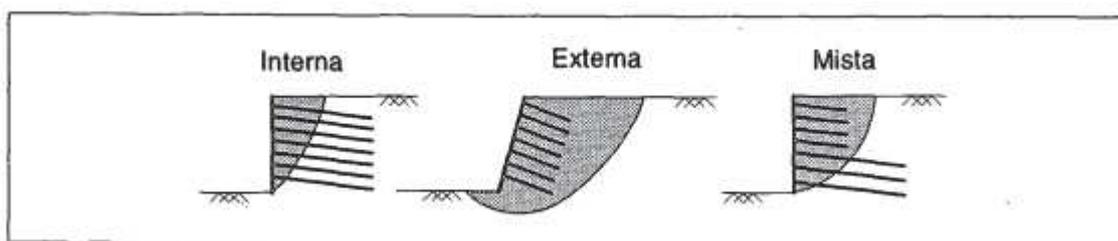
Com o crescimento do uso da técnica em meados dos anos 80, iniciou-se o Projeto CLOUTERRE, que visava estudar, promover e padronizar o uso do solo grampeado, publicando em 1991 várias recomendações sobre solo grampeado.

No Brasil a técnica foi usada de maneira intuitiva pela primeira vez em 1970 no Sistema Cantareira, a execução foi feita praticamente de forma empírica baseada em conhecimentos sobre túneis (ORTIGÃO *et al.*, 1992).

### 2.1.2 Comportamento do Solo Grampeado

Normalmente as estruturas de solo grampeado são dimensionadas através da técnica de equilíbrio limite, que leva em consideração as instabilidades local e global. Para entender a técnica do solo grampeado é importante entender como tal se comporta quando submetido a esforços (ORTIGÃO *et al.*, 1993). Esses esforços podem ser divididos em internos, externos e mistos como mostra Figura 1.

Figura 1 – Superfícies de ruptura



Fonte: Ortigão *et al.* (1993, p. 14).

As rupturas externas, são rupturas que ocorrem fora do comprimento dos grampos e envolvem a movimentação do talude como um todo (GEOGUIDE 7, 2008; LAZARTE *et al.*, 2015).

As rupturas internas são rupturas que ocorrem dentro do comprimento dos grampos. (GEOGUIDE 7, 2008; LAZARTE *et al.*, 2015).

As rupturas mistas podem ocorrer tanto na superfície do grampo como no solo onde o grampo não está localizado, esse caso é mais comum quando o

comprimento dos grampos varia ao longo da solução (GEOGUIDE 7, 2008; LAZARTE *et al.*, 2015).

### 2.1.3 Aplicações

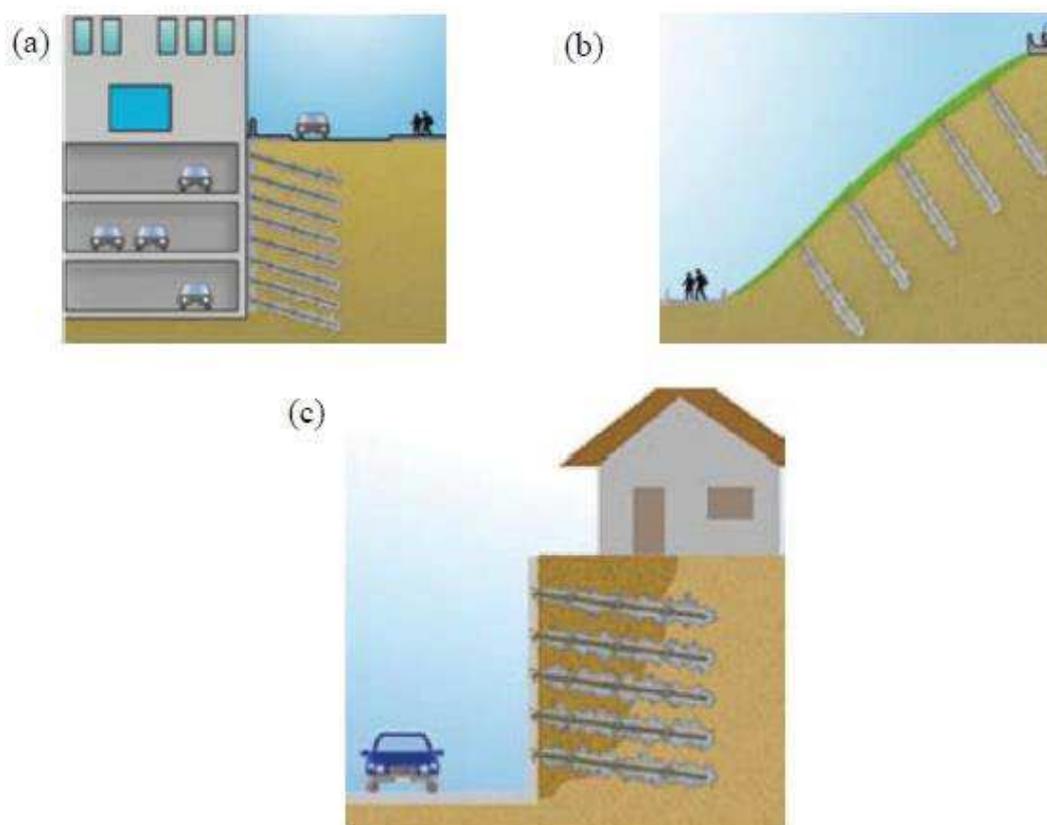
Segundo Lazarte *et al.* (2015) e Geoguide 7 (2008), as principais aplicações do solo grampeado são:

- a) em rodovias, principalmente em taludes de corte;
- b) atuando em como suporte para escavações por patamares;
- c) estabilização de entrada em tuneis;
- d) na redistribuição de tensões em taludes instáveis.

Através da Figura 2 é exemplificado outras aplicações para o solo grampeado.

Figura 2 – Aplicações do solo grampeado

Legenda: (a) escavação, (b) estabilização de taludes e (c) recomposição de talude



Fonte: Rosa (2015, p. 24).

Por ter se tornado uma técnica muito usada e importante ressaltar sobre as vantagens da aplicação da técnica, segundo Ortigão e Fannin (1992):

- a) flexibilidade, em função da execução relativamente simples;
- b) velocidade na execução do sistema;
- c) a economia em relação a outros métodos, nesse caso em cortinas atirantadas podem ser de até setenta por cento.

#### **2.1.4 Considerações de Projeto**

Segundo o Geoguide 7 (2008), um projeto de solo grampeado deve atender os requisitos de estabilidade, facilidade de manutenção, durabilidade, custo e também os impactos ambientais.

No que diz respeito à estabilidade é importante destacar que o projeto de solo grampeado deve garantir que haja uma margem de segurança para as possíveis falhas do sistema. Deve-se também avaliar a estabilidade interna e estabilidade externa, essa análise geralmente é feita pelo método do equilíbrio limite, método proposto por Fellenius e posteriormente aprimorado por outros autores (GEOGUIDE 7, 2008). Atualmente os recursos de *software* são muito explorados, tanto para análise de equilíbrio limite quanto para o cálculo de deformações.

Segundo Clouterre (1991), as bases de um projeto de solo grampeado devem ser o comprimento e inclinação dos grampos e os espaçamentos horizontais e verticais entre os eles. Esses fatores são dimensionados de acordo com a geometria do talude, propriedades do solo, característica da barra e da pasta de cimento.

#### **2.1.5 Elementos do Solo Grampeado**

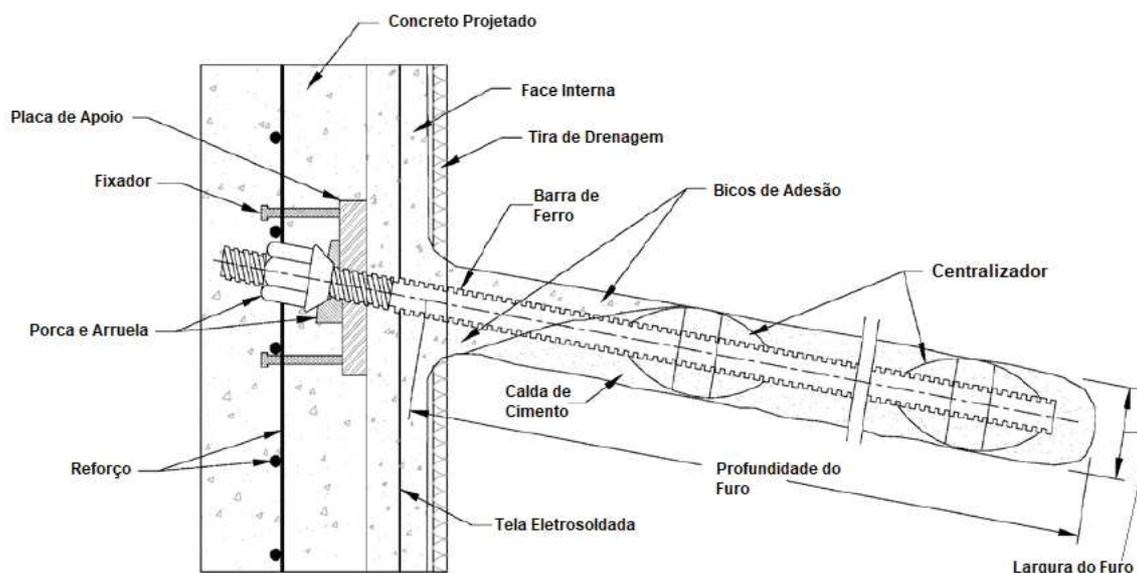
Segundo Lazarte *et al.* (2015), o sistema de solo grampeado é composto basicamente pelos seguintes elementos:

- a) barras de aço - são elementos de reforço do solo, recebendo tensões de tração em resposta a deformação do solo. As barras podem ser ocas ou sólidas;

- b) pasta de cimento - é a mistura de cimento Portland e água, com relação água/cimento entre 0,4 e 0,7, tendo como principais funções a transferência de tensão de cisalhamento entre o solo e as barras, as tensões de tração das barras e o solo estável ao redor das mesmas e fornecer uma pequena proteção contra corrosão;
- c) proteção contra a corrosão - o nível de proteção contra a corrosão vai depender do solo em que a barra está sendo inserida, sendo que barras inseridas em solo com maior potencial de corrosão devem estar mais protegidas. A proteção é variável, podendo ser apenas a pasta de cimento, também pelo encapsulamento da barra pela adição de uma bainha protetora ou a aplicação de um revestimento epóxi, galvanização ou aço sacrificial;
- d) faceamento - pode ser feito com a técnica de concreto projetado, porém deve ser associado aos grampos inseridos no solo, esses são conectados com placas de aço e armadura, de modo a transferir de forma adequada os esforços. Segundo Pokharel et al. (2011) pode-se também usar o faceamento com telas metálicas de alta resistência, essas são fixadas ao talude pelas placas de fixação instaladas nas cabeças dos grampos, transferindo assim os esforços do solo instável, fazendo com que a tela absorva os esses esforços, controlando a movimentação da massa;
- e) placas de fixação - as placas já citadas anteriormente têm formatos e tamanhos variáveis, dependendo do fabricante. Cabe ao projetista a indicação das especificações que melhorar vão atender os requisitos de projeto.

Na Figura 3 é possível ver todas as estruturas que compõe o sistema de solo grampeado.

Figura 3 – Elementos que compõem uma estrutura de solo grampeado



Fonte: Adaptada de Lazarte *et al.* (2015, p.74).

### 2.1.6 Execução

A execução de muros de solo grampeado segundo Ortigão (1993) consiste inicialmente na escavação se necessária ou regularização do terreno.

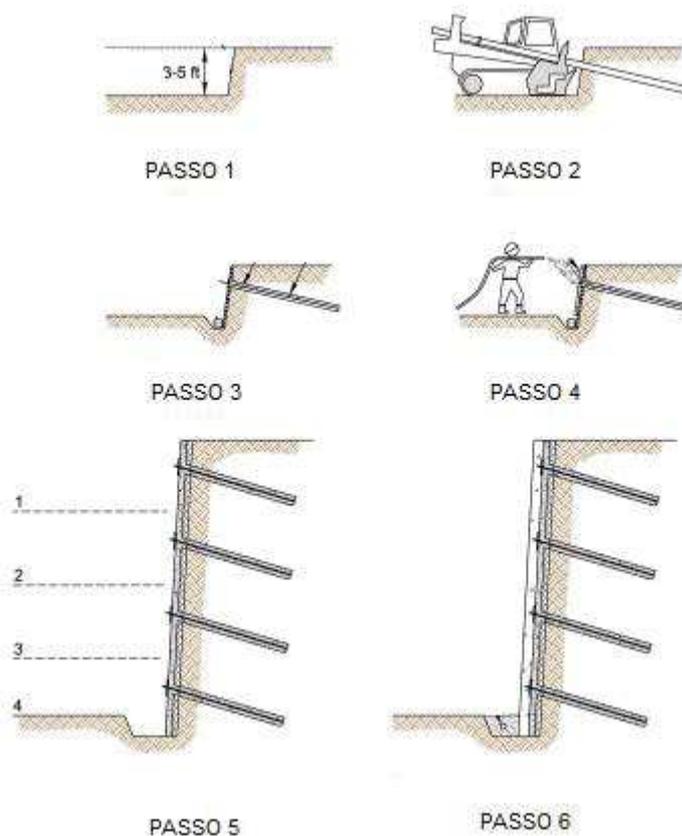
Após a escavação inicia-se a instalação dos grampos, esse podendo ser feita de duas maneiras, por percussão ou perfuração. A execução por percussão consiste na cravação da barra no solo, com um martelo, fazendo com que o projeto seja executado de forma muito rápida, porém a resistência do contato do grampo com o solo é normalmente pequena. Também é importante observar as características do solo em questão, levando em consideração que este não é um bom método para solo com pedregulhos ou muito argilosos. Já a execução por perfuração se assemelha a execução de tirantes, sendo uma técnica mais comum. O terreno é perfurado com determinado diâmetro, e só então as barras são introduzidas, juntamente com os tubos de injeção por onde a pasta de cimento é injetada com uma pressão baixa, os tubos de injeção variam com o número de etapas de injeção que serão executadas (ORTIGÃO, 1993).

O faceamento pode ser executado de duas maneiras, uma com o uso de concreto projeto, nesse caso é indispensável a execução de drenagem superficial com fitas drenos e barbacãs, como também a drenagem profunda com drenos sub-horizontais. A outra opção é a utilização de faceamento com telas metálicas de alta

resistência associadas a mantas anti-erosivas, essas mantas tem a finalidade de evitar a erosão na face do talude, nesses casos o sistema de drenagem superficial pode ser descartado, porém o de drenagem profunda deve ser mantido.

O andamento típico da execução de um solo grampeado pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Sequência executiva do solo grampeado

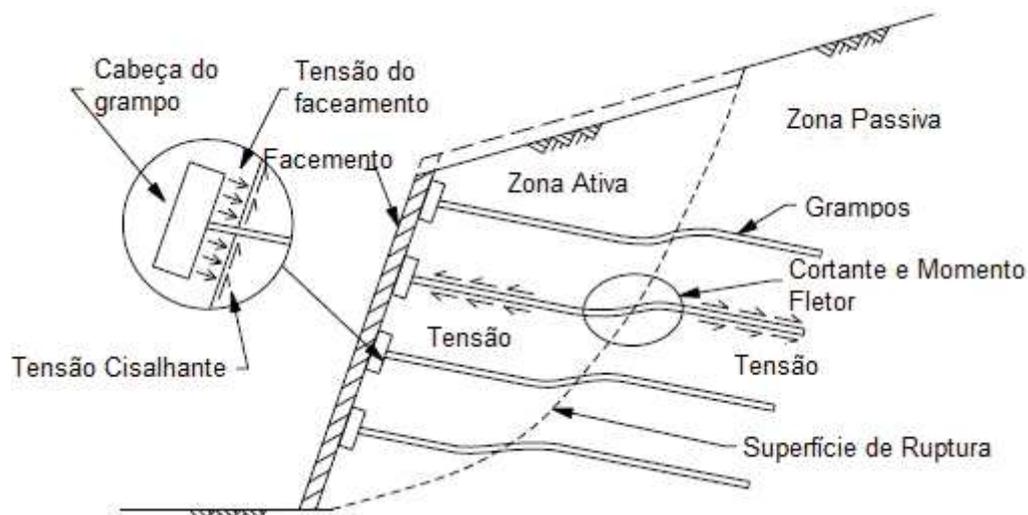


Fonte: Adaptado de Geoguide 7 (2008, p. 15).

### 2.1.7 Comportamento do Grampo

Segundo Geoguide 7(2008), os grampos têm a função de unir a zona passiva e a zona ativa. Sendo que zona passiva e a zona ativa são divididas por uma linha de falha, linha essa que é localizada onde a ocorrência de ruptura é mais provável, essa linha pode ser chamada de superfície de ruptura. A zona passiva se encontra após a superfície de ruptura na área que está estável, já a zona ativa está antes da superfície de ruptura e tende a se desprender do sistema, pois está na área instável.

Figura 5 – Modelo de divisão das zonas de atuação da força dos grampos

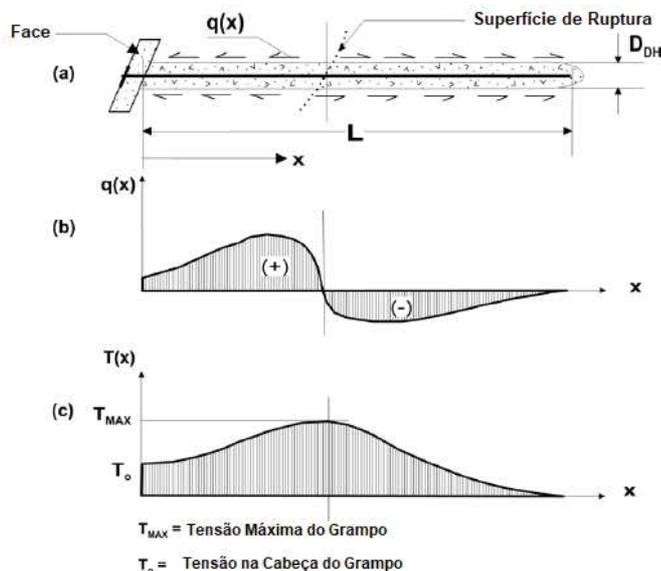


Fonte: Adaptada de Geoguide 7 (2008, p. 19).

Os esforços internos do grampo ocorrem em direções opostas dentro da zona passiva e zona ativa, como mostram as Figura 5 e a Figura 6, esses esforços provocam uma tensão normal de tração no grampo. A inversão do sentido de esforço de tração ocorre na superfície de ruptura, já que o solo da zona passiva tensiona o grampo em um sentido e a zona ativa o tensiona no sentido oposto. Nesse mesmo ponto, o grampo fica submetido a esforços de cisalhamento e momento fletor, devido a movimentação da massa ativa (GEOGUIDE 7,2008).

Lazarte *et al.* (2015) dizem que o fato de o grampo ter vínculos em duas regiões distintas (uma passiva e outra ativa) os esforços de tração se distribuem ao longo da barra, aumentando a partir da face do talude até o ponto de intersecção da zona ativa com a passiva (na superfície de ruptura). A distribuição das forças pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 – Mecanismo de transferência de força das forças de tração resultantes



Legenda: (a) disposição dos grampos no solo, (b) distribuição das tensões de cisalhamento na argamassa/solo e (c) distribuição

Fonte: Adaptada de Lazarte (2015, p. 100).

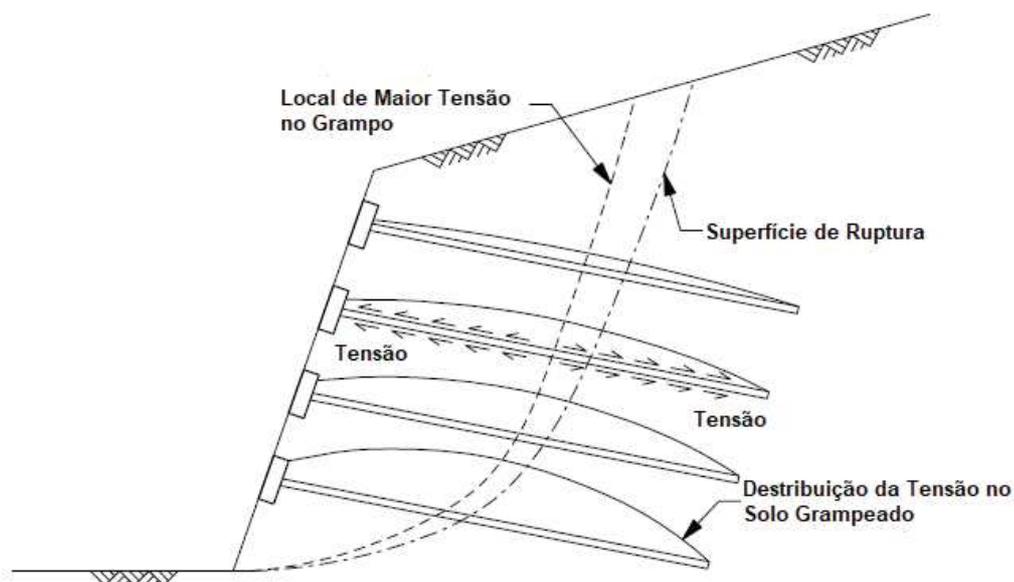
Os mecanismos citados anteriormente são mecanismos complexos que envolvem propriedades mecânicas do solo, considerações de projeto (inclinação, orientação e comprimento dos grampos), a resistência ao cisalhamento do solo e o atrito entre o solo e o grampo. Isso dificulta o desenvolvimento de metodologias para determinação dos mesmos, por isso ainda é imprescindível a realização dos ensaios de campo (LAZARTE, 2015).

### 2.1.8 Interação Solo e Grampo

A interação do solo vs. grampo tem a função de transmitir os esforços absorvidos pelos grampos, devido as movimentações da zona ativa, para a parte estável do solo, zona passiva.

Segundo Lazarte *et al.* (2015) a interação entre o solo o grampo é complexa e causa uma redistribuição das forças ao longo do grampo, a tensão de cisalhamento é mobilizada ao longo da interface da pasta de cimento e o solo. Essa interface não é uniforme e muda de direção ao longo do comprimento grampo, conforme Figura 6 e esse comportamento depende de vários fatores, entre eles as propriedades do grampo, propriedades físicas do solo e o atrito entre o solo e o grampo.

Figura 7 – Distribuição de esforços ao longo do contato solo/grampo



Fonte: Adaptada de Geoguide 7 (2008, p. 23).

Conforme a Figura 7 o ponto máximo da tensão no grampo ocorre muito próximo ao ponto de cisalhamento máxima (superfície de ruptura), porém não necessariamente no mesmo ponto (GEOGUIDE, 2012).

## 2.2 DURABILIDADE DO SOLO GRAMPEADO

Uma estrutura de solo grampeado é uma solução projetada para a duração entre 75 e 100 anos, essa durabilidade evidencia a necessidade de um projeto adequado, onde devem ser levados em consideração vários fatores. Entre eles dois que serão abordados nesse trabalho: a qualidade da pasta de cimento e a corrosão dos grampos. Para que a durabilidade seja garantida é importante um olhar atento a elaboração do projeto, a qualidade dos materiais, a aplicação de técnicas adequadas e o acompanhamento no momento da execução. (MITCHELL; VILLET, 1987; SILVA, 2009).

Quando se fala em elaboração de projetos Silva (2009), considera que devido à falta de conhecimento técnico dos projetistas tanto quanto a de materiais de referência, como uma norma reguladora por exemplo, é necessário adotar o conservadorismo em soluções de solo grampeado, principalmente em aspectos ligados a corrosão do grampo. Em muitos casos a camada de proteção oferecida pela pasta de cimento é até desprezada, sobretudo porque a pasta pode apresentar

falhas executivas provenientes um processo de execução de má qualidade, outra situação bem típica é quando o grampo fica em contato com o solo ao longo da extensão do furo.

Clouterre (1991) também já abordava o assunto de corrosão como um ponto importante na durabilidade da técnica de solo grampeado, mesmo com o grampo não ficando em contato direto com o solo, já que é envolto por uma pasta de cimento, a corrosão não pode ser desprezada.

A pasta é pode apresentar microfissuras ao longo de sua durabilidade por dois motivos: é constantemente submetida a tração, esforço em que quase não tem nenhuma competência, também as microfissuras ocorridas no processo de hidratação do cimento. Além disso não se pode descartar problemas de execução dos grampos, já que na grande maioria das vezes precisam ser instalados em locais de difícil acesso SILVA (2009).

### **2.2.1 Agressividade do Solo**

O solo é formado por compostos minerais e orgânicos e sofre ações de agentes químicos físicos e orgânicos. A sua formação pode caracterizar um solo mais ou menos agressivo, influenciando diretamente na probabilidade de corrosão de um material quando em contato com ele.

A agressividade do solo pode ser classificada de duas formas, sendo ela a agressividade específica que está ligada a formação intrínseca do solo (físico-químicas e/ou biológicas) ou a agressividade relativa, que está relacionada a questões externas (mudanças climáticas e/ou presença de sais) que podem mudar a característica do solo após um tempo (COLE E MARNEY, 2012; TRABANELLI *et al.*, 1972).

Os principais fatores levados em consideração quando se pensa em agressividade do solo são: umidade resistividade, presença de íons, pH, potencial redox, presença de atividade microbiológica entre outros. Porém é importante ressaltar que um processo de corrosão normalmente não se desencadeia a partir de um único fator, normalmente ocorre da combinação deles (TRABANELLI *et al.*, 1972; WRANGLÉN, 1972).

Dessa forma Steinrath elaborou uma tabela comparativa, para que seja possível determinar os critérios para classificação do solo para corrosão, os

parâmetros apresentados em Tabela 1, são somos e a partir do seu total é possível determinar a agressividade do solo como apresentado em Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros relacionados por Steinrath para avaliação de corrosividade do solo

Parâmetro	Índice	Parâmetro	Índice
Resistividade (kΩcm)		Potencial redox (mV vs SHE)	
> 12	0	> 400	+2
12 - 5	-1	400 – 200	0
5 - 2	-2	200 – 0	-2
< 2	-4	< 0	-4
Parâmetro	Índice	Parâmetro	Índice
Sulfatos (mg Kg <sup>-1</sup> )		Cloretos (mg Kg <sup>-1</sup> )	
< 200	0	< 100	0
200 – 300	-1	100 – 1000	-1
> 300	-2	> 1000	-4
Parâmetro	Índice	Parâmetro	Índice
pH		HR (%)	
> 5	0	< 100	0
< 5	-1	> 20	-1

Fonte: Tabatelli *et. al.* (1972) apud Loureiro *et. al* (2007)

Tabela 2 – Índice total da agressividade do solo segundo Steinrath

Classificação do Solo	Índice Total
Não agressivo	0
Pouco agressivo	-1 a -8
Medianamente agressivo	-8 a -10
Altamente agressivo	< -10

Fonte: Tabatelli *et. al.* (1972) apud Loureiro *et. al* (2007)

Para o trabalho em questão serão analisados mais profundamente os parâmetros de íons presentes no solo e umidade.

Em relação a presença de cloretos, existem dois principais problemas além dos íons formarem produtos de corrosão, eles diminuem o pH e a resistividade do solo, aumentando os fluxos de corrosão. A sua concentração é diretamente ligada a mudança de condições do solo (como processos de molhagem e secagem) (CUNAT, 2001; NOOR, 2011)

Assim trazendo o segundo parâmetro, que é a umidade do solo, ela diminui a resistividade do solo, causa a ionização dos eletrólitos e aumentando as chances do ciclo de corrosão ocorra (SILVA E BRASIL, 2010).

## 2.2.2 Características da pasta de cimento

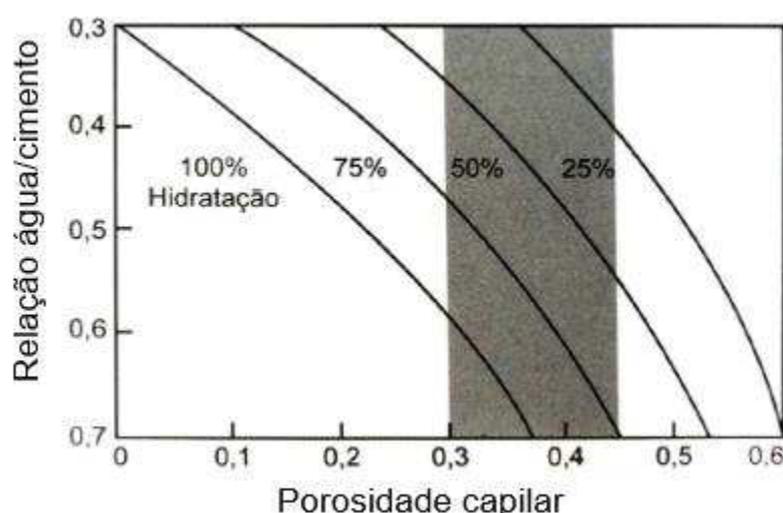
Nesse subitem serão discutidas características da pasta de cimento, essas características são resultado da escolha do traço da pasta (adições/ relação a/c) e das suas condições de cura (cura úmida/confinada/submersa/sem tratamento). Esses aspectos podem acelerar ou retardar o início do processo de corrosão da barra, sendo diretamente ligados a durabilidade da estrutura como um todo.

### 2.3.2.1 Porosidade

A porosidade é a propriedade de um material de apresentar poros ou vazios, a formação desses poros na pasta de cimento normalmente é ligada ao processo de hidratação do cimento e a presença de água livre na mistura (CAMPITELI,1987).

No processo de hidratação do cimento a água que não foi consumida está livre e ocupando espaço, logo ela evapora, aquele espaço fica vazio e a formação do poro acontece. Isso é comum quando se fala de pasta de cimento, porque a pasta necessita ser fluida e o principal recurso para isso nesse caso é a adição de água sendo comum relações de água/cimento entre 0,40 e 0,70. Sabe-se que em misturas com relações água cimento alta, nem toda a água é consumida, se tornando combustível para a formação de poros(CAMPITELI,1987; CLOUTERRE, 1991; QUARCIONI *et al.*, 2009). A Figura 8 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra a influência da relação água/cimento na presença de poros em uma estrutura.

Figura 8 – Relação porosidade x relação a/c



Fonte: Adaptada de Mehta e Monteiro (2008, p. 38).

Os vazios formados pela evaporação da água podem variar entre 10nm e 5µm, essa variação se dá conforme a variação da relação água/cimento como também o grau de hidratação que a pasta se encontra (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A porosidade é responsável pela permeabilidade de uma matriz cimentícia, a permeabilidade só ocorre quando existe a conexão entre os poros, já que a água prefere caminhos mais fáceis para percorrer, logo poros não interligados não se tornam atrativos (MEHTA; MONTEIRO, 2008; MINDESS *et al.*, 2003; NEVILLE, 1997; TRINDADE, 2011).

### 2.3.2.2 Fissuração

O surgimento de fissuras se dá principalmente pela retração plástica, quando a resistência a tração da amostra está muito próxima a zero, fazendo com que o esforço que a água causa, quando está em processo de evaporação gere pequenas rupturas no concreto (DINIZ, FERNANDES, KUPERMAN, 2011).

Segunda Neville & Brooks (2013), as fissuras por retração plástica se dão entre os 10 minutos e 6 horas iniciais, e que podem estar associadas a elevadas taxas de cimento, relação água cimento alta.

### 2.2.3 Corrosão nos Grampos

Dentro dos estudos e análises referentes a corrosão na aplicação de solos grampeados, os grampos são os componentes mais sucessíveis ao efeito da corrosão (MITCHELL; VILLET; 1987).

A corrosão dos grampos utilizados nas estruturas de solo grampeado pode ter uma grande variação, pois ela depende das características do solo em que o grampo está inserido, como: a permeabilidade desse solo, já que ela está ligada diretamente a penetração de água e oxigênio, a capacidade da água de agir como eletrólito, o pH do no solo (normalmente entre 3,0 e 9,0), presença de cloretos e bactérias (MITCHELL; VILLET; 1987; LAZARTE *et al.*, 2015).

Para Romanoff, (1957) não só ambiente em que a barra está inserida é importante, o tipo de material do grampo e as suas dimensões devem ser levadas em consideração. Por exemplo, barras com maior ductilidade apresentam uma corrosão uniforme e que acarreta em perdas diretas e consideráveis na resistência a tração, uma vez que o efeito reduz a espessura do material (LAZARTE *et al.*, 2015).

Mitchell e Villet (1987) apontam que a pasta de cimento é essencial para que a barra não tenha contato direto com o solo, postergando o início de uma possível corrosão, porém quando a pasta não apresenta uma boa qualidade pode acelerar o processo, já que suas microfissuras e a porosidade excessiva fazem uma ligação direta entre o solo e a barra, tornando-a exposta aos efeitos da água e sais presentes no solo.

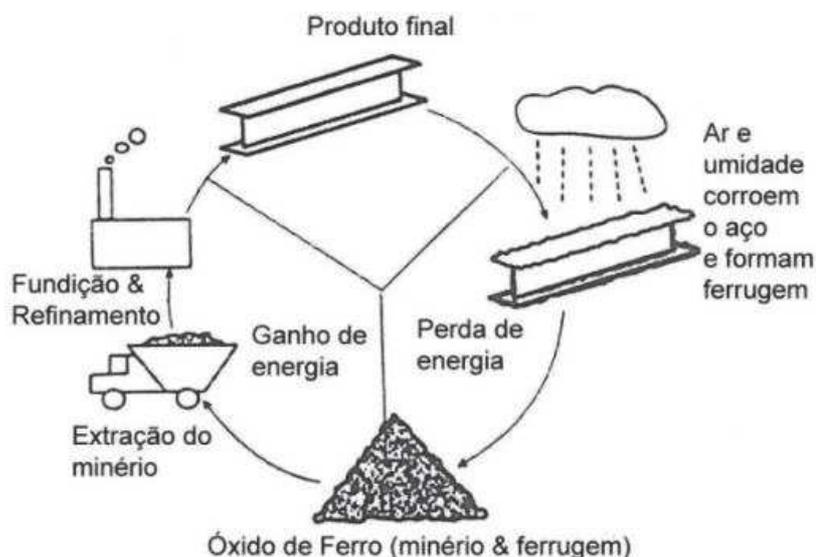
### 2.3 CORROSÃO

A corrosão é a deterioração de materiais metálicos ou não metálicos pela ação do meio, a partir de reações químicas ou eletroquímicas. (DAVIS, 2000).

A redução da energia livre dos elementos é a principal explicação termodinâmica para o processo de corrosão. As leis da termodinâmica dizem que os elementos devem buscar seu estado de equilíbrio energético em relação ao ambiente que estão inseridos (DAVIS, 2000) .

Elementos metálicos são encontrados na natureza na forma de óxidos e necessitam grande incremento de energia em sua fabricação, desde a extração até o seu beneficiamento, conforme Figura 9 (ANDRADE, 1999; CARINO, 2000; DAVIS, 2000; PANNONI, 2007).

Figura 9 – Ciclo de ganho e perda de energia do ferro



Fonte: Adaptada de Davis (2000, p. 1).

Quando no ambiente o ferro tende a liberar toda a energia que foi adicionada em seu processo fabril, através da sua combinação do hidrogênio, o oxigênio e a água presente no ambiente. O resultado dessas reações é a formação do óxido de ferro, sendo esse o estado em que o ferro é encontrado no ambiente. A liberação da energia que ocorre nesse processo reverso é conhecida como Energia Livre de Gibbs (UHLIG, REVIE, 2008).

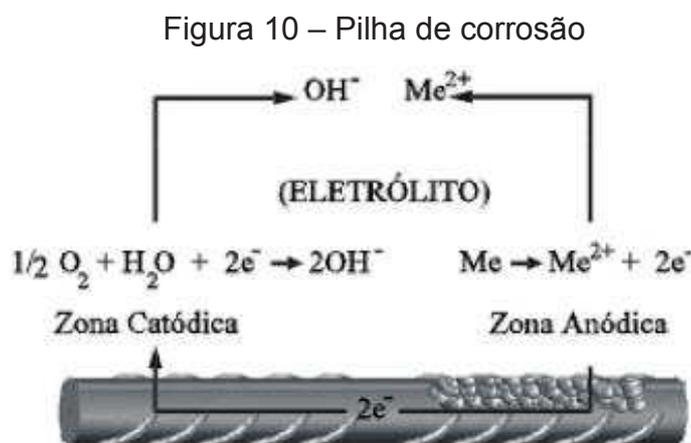
Para Gentil (1996), a única maneira de impedir essa reação espontânea de liberação de energia e volta do ferro ao seu estado inicial é a utilização de mecanismos de proteção a corrosão.

### 2.3.1 Mecanismo de Corrosão

Gentil (1996) e Wolynech (2003) afirmam que o processo corrosivo resulta na perda de seção e das propriedades originais do material, essa perda se dá pela troca de elétrons entre o material e o ambiente (Figura 10). Para entender a corrosão é necessário entender o mecanismo de funcionamento de uma reação eletroquímica.

A eletroquímica é uma ciência que estuda as interações elétricas e químicas, um dos fenômenos das reações eletroquímicas é a corrosão. (DAVIS, 2000; UHLIG; REVIE, 2008).

Essa interação e a troca ocorre em meio aquoso, chamado de eletrólito, esse ambiente é propício para a formação de uma pilha de corrosão (Figura 10) ela se dando pela diferença de potencial na superfície do grampo. Essa diferença faz com que os elétrons da região negativa (Zona anódica) migram para a região positiva (zona catódica) (BARD; FAULKNER, 2001; UHLIG; REVIE, 2008).



Fonte: Figueiredo (2011)

Para a ocorrência do fenômeno de corrosão é necessário que o ambiente esteja propício para isso, ambientes com alto pH e sem a presença de água não são atrativos (Figura 11).

### 2.3.2. Filme de Passivação

Metais termodinamicamente estáveis são imunes a corrosão em ambientes típicos, como é o caso de metais nobres. Metais não nobres, são suscetíveis a corrosão, passando pela formação de produtos de corrosão e acarretando a perda de massa. O ferro mesmo sendo um metal não nobre quando em ambientes alcalinos, apresenta uma fina camada (entre 1nm e 15nm) de proteção contra a corrosão, chamada de filme de passivação, esse filme faz com que o processo de corrosão seja desacelerado e muitas vezes até considerado desprezível (BROOMFIELD, 2007, DAVIS, 2000; MANCIO, 2008).

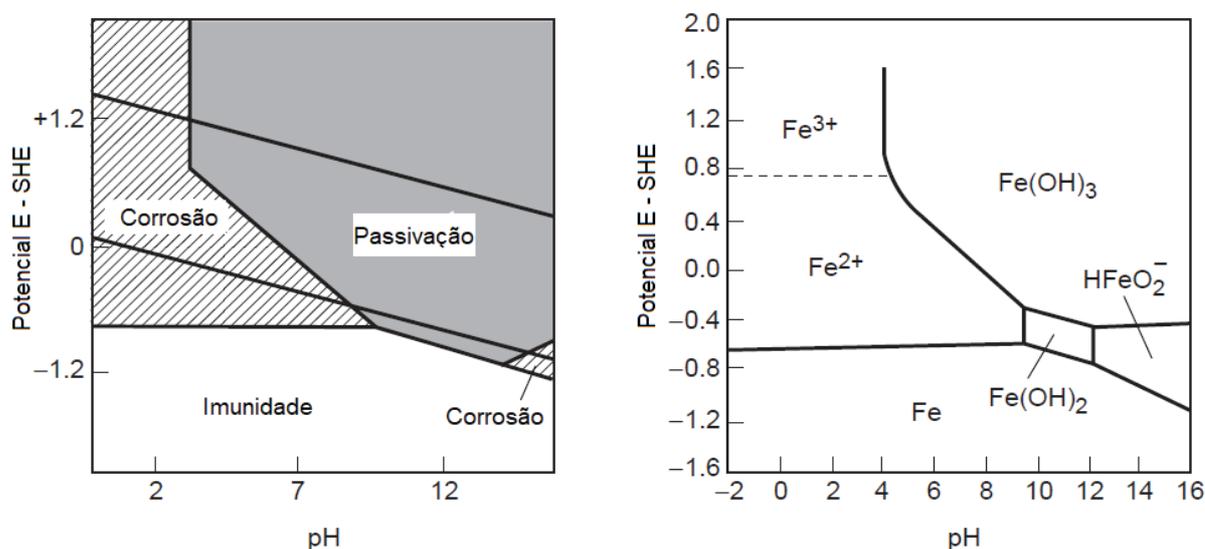
O filme de passivação é a principal proteção que o grampo pode ter para combater a corrosão a partir do ataque por cloretos, esse filme formado por óxidos e hidróxidos de ferro solúvel, começa a se formar a partir do primeiro momento da exposição do grampo com a solução alcalina (pasta de cimento), ele só atinge uma

estabilidade após o seu envelhecimento, fazendo com que o filme de passivação apresente maior densidade, diminuindo a possibilidade de pontos de falha no mesmo (BUCHANAN E STANSBURY, 2012, ELSENER, 2018)

O filme de passivação é formado por óxidos e hidróxidos de ferro solúvel, sendo uma fina camada interna de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , servindo como uma espécie de barreira e uma cama externa em contato com a matriz cimentícia de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{FeOOH}$ .

As matrizes cimentícias são um bom exemplo de ambiente alcalino e favorável para a formação do filme de passivação, normalmente com pH 12,5 e 14. O filme de passivação formado entre a pasta/ grampo gera um retardo no processo de corrosão. Contudo conforme o tempo passa e esse filme entra em contato com agentes agressivos, ele vai perdendo sua finalidade de proteção contra a corrosão, já que o pH começa a diminuir, tornando o ambiente propício para o início da corrosão. O diagrama de Pourbaix (Figura 11), dá uma visão geral da relação do pH com a corrosão da estrutura (CASCUDO, 2005; RILEM, 2003).

Figura 11 – Diagrama de Pourbaix para Fe-H<sub>2</sub>O



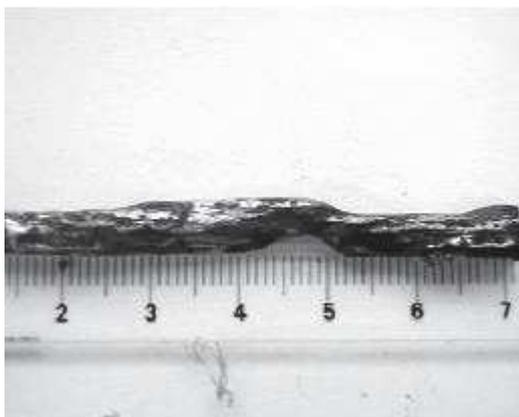
Fonte: Davis (2000, p. 68, tradução nossa).

### 2.3.3. Penetração de Íons Cloreto

Quando se fala em penetração de íons de cloreto, sempre refere-se a íons dissolvidos em solução aquosa, já que quando estão em sua forma sólida não possuem a capacidade de adentrar pela porosidade do concreto (HELENE, 1986).

A principal consequência da penetração de íons cloreto em pequenas proporções ou concentrada é a sua despassivação de forma localizada, gerando uma pequena zona anódicas próxima a uma zona catódicas, provocando uma corrosão localizada chama de pites (Figura 12). Porém quando uma estrutura é exposta a uma alta concentração de cloretos por longos períodos de tempo e de forma uniforme a corrosão pode ser homogênea (POUPARD et al, 2006; HELENE, 1986)

Figura 12 – Corrosão por pites



Fonte: Poupard et al (2006, p. 513).

Quando se fala de absorção de cloretos, ela pode ocorrer através dos capilares, e de forma rápida. Essa absorção está diretamente ligada a porosidade do concreto, quanto maior a porosidade maior a probabilidade de o concreto penetrar no ambiente (BROOMFIELD, 2006; CASCUDO, 1997, TUTTI, 1982).

Essa entrada de cloretos não se dá somente pela porosidade da matriz cimentícia, mas também pela difusão dos íons no interior da matriz, devido as diferenças de concentração dele, buscando um equilíbrio. Esse fenômeno independe da porosidade do concreto (BROOMFIELD, 2006; CASCUDO, 1997).

Quanto a concentração de cloretos não existe um consenso bibliográfico sobre qual o teor crítico ou quanto a quantidade de hidroxila para que se inicie um ataque. Sendo que o valor crítico depende de cada situação, envolvendo a forma de penetração, umidade, tipo de cimento usado, presença de sulfetos entre outros (ANGST *et al*, 2011; ALONSO *et al.*, 2000; CASCUDO, 1997; MANCIO, 2008)

### 2.3.4 Monitoramento da Corrosão

Para tornar possível o entendimento da corrosão em uma determinada estrutura é importante a utilização de mecanismos de monitoramento da mesma

#### 2.3.4.1 Potencial de Corrosão

O potencial de Corrosão ( $E_{corr}$ ) ou potencial de circuito aberto (OCP) é usado para determinar a probabilidade que um material tem de corroer num determinado meio. O potencial de corrosão é representação termodinâmica da chance de um determinado material sofrer corrosão (GONZÁLEZ *et al.*, 1994; MINDESS *et al.*, 2003). Essa probabilidade se dá pela aferição da diferença de potencial (ddp) entre o aço e o ambiente ao qual ele está exposto (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Segundo Figueredo *et al.* (2011), a diferença de potencial entre o aço e o ambiente é gerada a partir da formação de pilhas de corrosão.

Esse método consiste na medição da diferença de potencial entre um eletrodo de trabalho (grampo) e um eletrodo de referência (DEVALAPURA *et al.*, 1994). Ele é usado para avaliar qualitativamente o processo de corrosão em estruturas de aço, não podendo ser usado de forma isolado, pois ele apenas aponta a tendência que a estrutura tem de entrar em processo de corrosão, não fornecendo dados como a velocidade de corrosão. Também é importante salientar que muitas vezes podem ocorrer distorções nos potenciais medidos dependendo da condição do ambiente, assim as análises de corrosão não podem ser realizadas apenas com essa informação (RODRIGUEZ *et al.*, 1994; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A Tabela 3 apresenta a probabilidade de corrosão de armaduras a partir do  $E_{cor}$ , a ASTM C876 (2009) descreve o procedimento para esse ensaio. Percebe-se que quanto menor (mais negativa) for a tensão medida maior será a probabilidade de a armadura entrar em processo de corrosão (CARINO, 2000).

Tabela 3 – Probabilidade de corrosão a partir do  $E_{cor}$

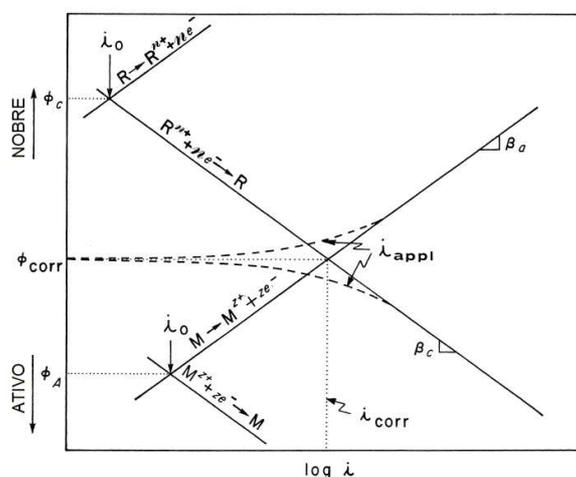
Potencial de corrosão (mV)	Probabilidade de corrosão (%)
Maior que -83	10
De -83 até -233	Incerta
Menor que -233	90

Fonte: Adaptada de ASTM C876 (2009).

### 2.3.4.2 Curvas de Tafel

Para se obter as curvas de Tafel são aplicados potenciais maiores de  $\pm 200\text{mV}$  em relação ao potencial de corrosão, elas descrevem a relação entre a corrente e o potencial do eletrodo. E são usadas para a leitura das inclinações das retas de Tafel, retas essas que indicam o processo anódico e catódico, já que ambas as reações ocorrem de forma simultânea (CASCUDO, 1997; DAVIS, 2000; UHLIG; REVIE, 2008).

Figura 13 – Representação de uma curva de Tafel Genérica



Fonte: Uhlig e Revie (2008, p. 67, tradução nossa).

Na Figura 13 é possível ver a representação das retas utilizadas para a determinação para a determinação do coeficiente Anódico ( $\beta_a$ ) e coeficiente Catódico ( $\beta_c$ ), para assim calcular o constante de Stern-Geary conforme (Equação 1):

$$B = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c)} \quad \text{Equação 1}$$

Em que,

$B$  = constante de Stern-Geary;

$\beta_a$  = coeficiente de inclinação anódico de Tafel;

$\beta_c$  = coeficiente de inclinação catódico de Tafel.

Quando realização desse ensaio não é possível podem ser utilizados valores estimados para a constante Stern-Gery quando considerado elementos de ferro,

sendo elas, 26mV para aços com corrosão ativa e 52mV para aços passivados (BROOMFIELD, 2006; CARINO 2000).

#### 2.3.4.3 Resistência de Polarização Linear

Segundo Figueiredo *et al.* (2011) a resistência de polarização linear é um método não destrutivo que permite determinar o mecanismo de corrosão, e o estado em a armadura se encontra. Essa técnica se torna prática e tem uma usabilidade alta, podendo ser usada inclusive em estruturas de difícil acesso ou as quais onde o aço não está exposto, caso do solo grampeado. Porém é importante ressaltar que ela apenas afere a corrosão instantânea, devido à isso muitas vezes a Resistência de Polarização Linear é conhecida como Taxa Instantânea de Corrosão. Para realizar um estudo mais completo, como por exemplo uma média da perda de seção da barra é necessário um monitoramento ao longo do tempo (ELSENER, 2015; AOKI;GUEDES; 2003)

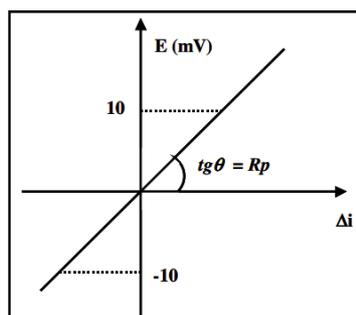
Para a execução deste método, existem duas diferentes formas, uma delas, é a variação potencial ( $\Delta E$ ) é controlado e a variação corrente verificada ( $\Delta I$ ), sendo esse o método do potenciostático a outra é quando o contrário é executado, sendo o método do galvanostático. Quando o método utilizado é o do potenciostato se utiliza uma de variação de potencial entre -10mV e +10mV, primeiro para que a amostra não seja danificada e também porque fora dessa faixa o gráfico  $E \times \Delta i$  já se torna pouco linear e não tão representativo para ser estudado (DAVIS, 2000; MARTÍNEZ; ANDRADE, 1999).

A partir da confecção do gráfico percebe-se que o valor da Resistência de Polarização Linear ( $R_p$ ), pode ser calculado de duas formas, uma delas é a partir da tangente do gráfico formado a partir da variação de potencial e a variação de corrente (Figura 14). Ou de forma simplificada pode-se dizer que  $R_p$  também pode ser determinada pelo quociente entre a variação de potencial ( $\Delta E$ ) e a variação corrente ( $\Delta i$ ) (Figura 14).

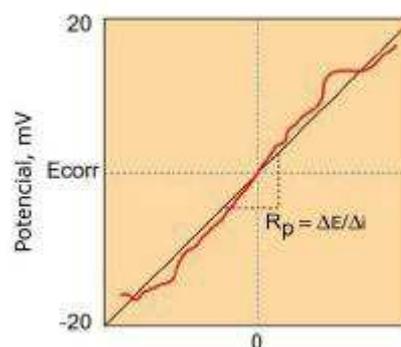
Figura 14 – Resistência de Polarização Linear

(a) Representação conceitual

(a) Representação real



Fonte: Aoki e Guedes (2003)



Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 432).

Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 432).

Depois do valor de  $R_p$  calculado é possível entender o que ele significa de fato para a corrosão do aço. Quanto maior for o valor de  $R_p$  menores serão as taxas de corrosão daquela situação, por exemplo: armaduras com um bom filme de passivação apresenta altos valores para  $R_p$  e índices de corrosão desprezíveis (CASCUDO, 1997).

Em 1950 Stern and Geary desenvolveram uma equação (Equação 2) que relaciona  $R_p$  com a densidade de corrente de corrosão (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p \cdot A} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$i_{corr}$ : densidade de corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$R_p$ : resistência de polarização ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )

$A$ : área polarizada ( $\text{cm}^2$ )

$B$ : Constante de Stern-Geary

Para a realização cálculo utiliza-se a constante de Stern-Geary, ela tem seu valor dependente das constantes de Tafel, seu valor pode ser determinado experimentalmente com a aplicação de polarizações maiores do que as realizadas no ensaio de resistência de polarização, dessa maneira de dados mais reais em relação ao experimento.

Tabela 4 – Relação de valores de corrente de corrosão e a durabilidade da armadura

$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Taxa de corrosão instantânea $V_{corr}$ (mm/ano)	Nível de corrosão
$\leq 0,1$	$\leq 0,001$	Desprezível
0,1 – 0,5	0,001 – 0,005	Baixo
0,5 - 1	0,005-0,01	Moderado
$> 1$	$> 0,01$	Alto

Fonte: RILEM TC 154-EMC (2004).

#### 2.3.4.4 Taxa de Corrosão

Segundo Carino (1999) e Jones (1996) é um dado quantitativo que representa o balanço líquido entre os quatro elementos que compõe a célula de corrosão: oxidação, redução, passagem de elétrons através do metal e circulação de íons no eletrólito.

Para a determinação da taxa de corrosão a ASTM G102 (2015), padroniza uma equação onde é possível determinar a taxa de corrosão anual em  $g/m^2/dia$ , conforme Equação 3:

$$MR = k_2 I_{corr} EW \quad \text{Equação 3}$$

Em que,

MR = Taxa de corrosão ( $g/m^2/d$ )

$K_2$  = Constante de conversão  $8,954 \times 10^{-3} gcm^2/\mu Am^2d$ ;

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

EW = M/ N

EW= no caso do zinco, M= 68,35 (g/Mol) e n = 2 elétrons (na última camada) = 34,175

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo apresentará os materiais e os métodos utilizados para a execução do programa experimental desse trabalho.

#### **3.1 MATERIAIS**

Os materiais usados para o desenvolvimento do programa experimental serão apresentados a seguir.

##### **3.1.1 Cimento CP IV 32 RS**

Para o trabalho optou-se pelo cimento CP-IV RS 32 por se tratar do tipo de cimento mais utilizado em obras de solo grampeado. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) o Cimento Portland Pozolânico CP IV, apresenta adição pozolânica em massa entre 15% e 50%. O teor alto de pozolana dá aos materiais cimentícios produzidos com esse cimento uma impermeabilidade, gerando uma durabilidade maior e normalmente é indicado para ambientes expostos à umidade e agressivos.

Essa impermeabilidade se dá pela presença de materiais pozolânicos, já que eles reagem com o CH produzindo mais cristais de C-S-H, aumentando a resistência e diminuindo a porosidade, já que o CH apresenta dimensões grandes e podem produzir muitos vazios intralamelares quando comparados com C-S-H. Esse tipo de reação torna a matriz cimentícia mais refinada, a porosidade diminui e conseqüente aumenta a impermeabilidade, ganhos importantes quando se deseja que o contato entre o ambiente externo e interno seja o mínimo possível. As reações pozolânicas ocorrem após a hidratação do cimento, já que o CH é um produto decorrente dela, é necessário que ele esteja pronto e livre para interagir com as pozolanas. Isso justifica o porquê desse tipo de cimento apresentar um ganho de resistência mecânica em idades maiores (CASCUDO 2011, NEVILLE, 1997, TAYLOR, 1997).

Neste trabalho foi utilizado cimento de um mesmo lote, com as suas características Físicas, Químicas e Mecânicas apresentadas no ANEXO A.

### 3.1.2 Água

Para a produção da pasta foi utilizada a água distribuída pela rede pública de São Leopoldo.

### 3.1.3 Grampo

Para esse estudo foram utilizadas barras de aço galvanizados com GW ST 520/690 25MM, a escolha dessa barra se deu pela sua alta aceitação para obras geotécnicas, sendo a mais utilizada. As informações técnicas da barra estão descritas no ANEXO B.

Para fins de melhor realização do ensaio a barra de 15cm de comprimento foi isolada com fita isolante líquida (camada de 1mm), conforme Figura 15. Para preservar as aberturas necessárias foi utilizado fita crepe, que foi retirada após a secagem.

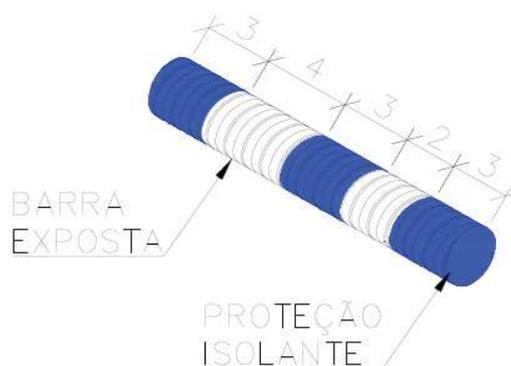
Figura 15 – Isolamento das barras



Fonte: Registrada pela autora.

Para acesso do equipamento foi deixado uma abertura com 2cm de altura, para que as medições realizadas durante os ensaios eletroquímicos fossem precisas, todas as barras tiveram uma área exposta de 31,91cm<sup>2</sup>, derivando de uma abertura de 4cm, conforme Figura 16.

Figura 16 – Esquema de isolamento da barra



Fonte: Elaborada pela autora.

### 3.1.4 Galvanização

Como a barra de ferro é inserida em solo que é considerado um ambiente agressivo, ela já vem com uma camada de proteção de galvanização de Zinco SHG, com uma espessura média de 133,90 $\mu$ m. Mais detalhes podem ser verificados no ANEXO C.

### 3.1.5 Aditivo Superplastificante

Aïtcin (2000) afirma que os aditivos superplastificantes agem dispersando as moléculas de cimento e impedindo a floculação, garantindo o melhor aproveitamento das mesmas. A floculação ocorre quando o cimento entra em contato com a água, essa estrutura aprisiona a água, diminui a fluidez, aumenta a porosidade e conseqüentemente acarreta na diminuição da durabilidade da pasta.

Os aditivos super plastificantes dão uma alta fluidez a mistura, eles aumentam a sua consistência sem que seja necessário acréscimo de água, acredita-se que eles possam reduzir até 12% da quantidade de água de amassamento quando se trata de concretos (HARTMANN, 2002; ABNT, 1992). Também melhoram a trabalhabilidade de todos os tipos de cimento, quanto mais finos são os grãos do cimento melhor é a sua eficiência (BUCHER, 1989).

Para o trabalho foi utilizado o aditivo superplastificante Glenium 51®, que é livre de cloretos, com um teor de 0,5% da massa de cimento, com o intuito de observar um tempo de passagem pelo funil de Marsh próximo à 145s (ANEXO D).

### **3.1.6 Soluções de Imersão**

Para os ensaios eletroquímicos é necessário que a amostra esteja imersa em uma solução aquosa. Logo foram escolhidas duas soluções, uma que consiste em água e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), normalmente utilizada para curas submersas e de concretos, argamassas e pastas e outra de água e cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) criando assim um ambiente propício para o ataque de cloretos.

#### **3.2.6.1 Solução Água e Hidróxido de Cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ )**

Para a solução de imersão em que as amostras estarão em condições ideais e que não favoreçam a corrosão preparou-se uma mistura de 12 litros de água deionizada e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).

#### **3.2.6.1 Solução Água e Cloreto de Sódio ( $\text{NaCl}$ )**

Para a solução de imersão em que as amostras serão submetidas a ataques de cloreto preparou-se uma mistura de 12 litros de água deionizada e 420 gramas de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), com pureza de 99,75% e em uma concentração de 3,5% do volume de água.

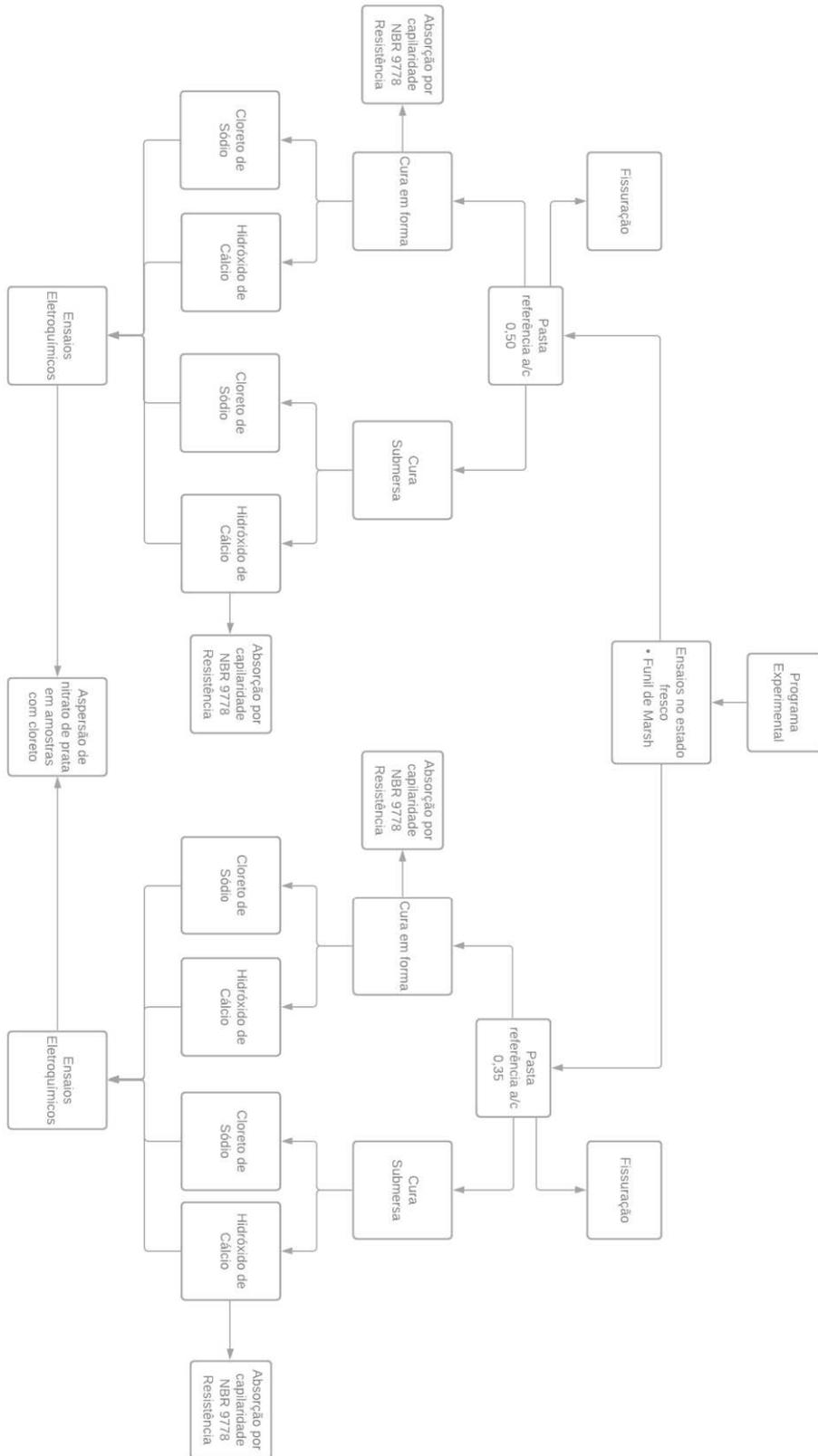
## **3.2 MÉTODOS**

Nesse subcapítulo serão apresentados os métodos utilizados para a realização do programa experimental

### **3.2.1 Planejamento do Programa Experimental**

Este capítulo apresenta as etapas do programa experimental, que será realizado para que os questionamentos abordados nos objetivos sejam sanados. A Figura 17 traz um fluxograma resumo do programa experimental.

Figura 17 – Estrutura do programa experimental



Fonte: Elaborada pela autora.

### 3.2.1.1 Fatores de Controle e Níveis de Estudo

Para a elaboração de um programa experimental conciso é importante avaliar os fatores de controle e os níveis de estudo. Dessa forma é possível observar o trabalho de forma global e melhor entender a escolha e execução dos ensaios.

Os fatores de controle são divididos em fixos e variáveis, no estudo em aqui apresentado terá como fatores fixos a barra (ver 3.1.3 Grampo ) e o cimento (3.1.1 Cimento CP IV ) utilizados. Para fatores variáveis terá: a presença de cloreto de sódio (no período de 42 dias de monitoramento), tempo em forma, a relação de água/cimento, presença de aditivo, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Níveis de estudo

Condição	Níveis de Estudo	
NaCl (%)	0,0%	3,5%
Tempo em forma (dias)	28	1
Relação a/c	0,50	0,35
Presença de aditivo	Não	Sim

Fonte: Elaborada pela autora

### 3.2.1.1 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta contemplam os estudos da pasta de cimento no estado fresco e endurecendo, também os ensaios relacionados a corrosão, conforme Tabela 6:

Tabela 6 – Resumo das siglas utilizadas

Tipo de Ensaio	Valores de Resultado	Unidade de Medida	Número de Repetições
Fresco	Funil de Marsh	segundos	1
	Consistência	mm	1
Endurecido	Fissuração	mm <sup>2</sup>	1
	Absorção por capilaridade	g/cm <sup>2</sup>	3
	Absorção total	%	3
	Índice de Vazios	%	3
	Resistência à Compressão	MPa	3
Corrosão	Potencial de Corrosão	mV vs Ag/AgCl	3
	Curvas de Polarização	-	1
	Resistência de Polarização Linear	(kΩcm <sup>2</sup> )	3
	Penetração de Íons Cloreto	mm	1

Fonte: Elaborada pela autora

Os resultados para Corrente de Corrosão e Taxa de Corrosão são calculados a partir dos dados da Curva de Polarização e da Resistência de Polarização Linear.

### 3.2.2 Moldagem da Pasta

Foi produzido um traço referência apenas com cimento CP IV RS 32 e água com uma relação água/cimento de 0,50, traço tipicamente usado em obras de contenção.

Também foi produzido um traço com relação água cimento menor e aditivo super plastificante . Para atingir a mesma fluidez do traço referência foi necessária a moldagem de várias pastas testes.

O traço com relação água/cimento 0,35 e aditivo , com 0,5% de aditivo em relação à massa de cimento, foi o que melhor se adequou à fluidez do traço referência.

A cura de ambos os traços foi realizada em três diferentes condições: 28 dias dentro da forma, após 24 horas na forma, cura por imersão em água saturada com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e cura por imersão em água com cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) em concentração de água do mar (3,5%).

A Tabela 7 apresenta um resumo das siglas de identificação que serão utilizadas no decorrer desse trabalho.

Tabela 7 – Resumo das siglas utilizadas

<b>Sigla</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Cura</b>
050CMF	0,5	Não	Forma
050CMA	0,5	Não	Água e $\text{Ca}(\text{OH})_2$
050CMC	0,5	Não	Água e $\text{NaCl}$
035ADF	0,35	Sim	Forma
035ADA	0,35	Sim	Água e $\text{Ca}(\text{OH})_2$
035ADC	0,35	Sim	Água e $\text{NaCl}$

Fonte: Elaborada pela autora

### 3.2.3 Ensaios no Estado Fresco da Pasta

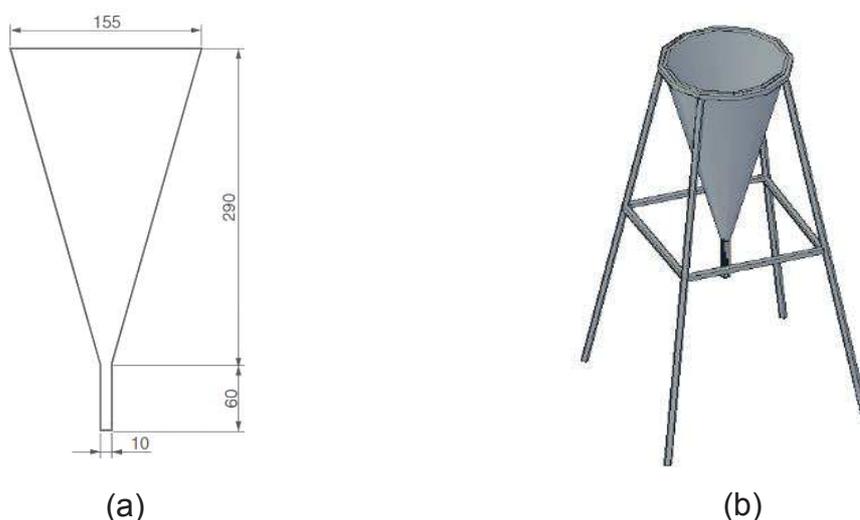
Nesse subitem serão apresentados os ensaios que foram realizados com a pasta em estado fresco.

### 3.2.3.1 Funil de Marsh

O Funil de Marsh é um método considerado simples e tem como objetivo controlar a fluidez e o ponto de dosagem dos aditivos em pastas, argamassas e grautes (CASTRO, 2007). Esse ensaio é regulamentado pela NBR 7681-2 (ABNT, 2013), o funil de Marsh é representado na Figura 18. E consiste na medição do tempo para que  $1000\text{cm}^3$  (1 litro) passe pelo orifício.

Esse ensaio será utilizado como parâmetro para a escolha da pasta que apresentar fluidez semelhante ou igual da pasta referência.

Figura 18 – Funil de Marsh a) dimensões internas b) funil acoplado



Fonte: ABNT (2013, p. 2).

### 3.2.3.3 Fissuração

Para a avaliação de fissuração em estado fresco foi feita uma adaptação dos métodos utilizados por Girotto, Barbosa e Maciel (2014) e Koppe (2016). Para a realização desse ensaio é necessário que ocorra a moldagem da pasta em placas quadrada de 20cm de lado e espessura de 1cm (Figura 21). O fundo da placa apresenta ranhuras de 0,5cm, essas ranhuras servem para que a fissuração seja induzida. A atividade de fissuração será observada após 24 horas a partir de imagens fotográficas. Essas imagens foram avaliadas no “AutoCAD” para identificação das fissuras.

Figura 19 – Placa para análise de fissuração



Fonte: Koppe (2016, p. 87).

Essa avaliação será realizada para todas ambas os dois traços de pasta. Para melhor adensamento será utilizado uma mesa vibratória por 5 segundos.

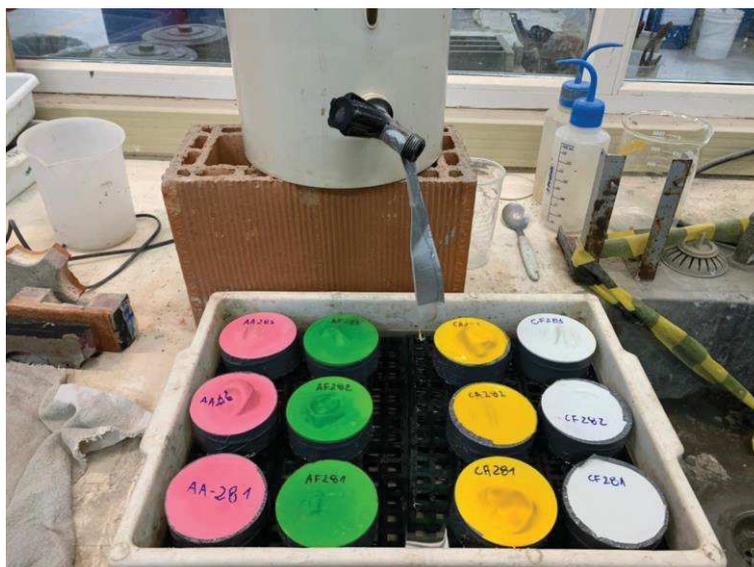
### 3.2.4 Ensaios No Estado Endurecido

Nesse subitem serão apresentados os ensaios que serão realizados com a pasta em estado endurecido.

#### 3.2.4.1 Absorção de Água por Capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade foi utilizada as diretrizes da norma na RILEM TC 116 PDC (1999), estando de acordo com a mesma é necessário que o fluxo de água ocorra apenas por uma face, sendo ela a inferior, as demais foram impermeabilizadas nas laterais com fita adesiva resistente à água e na face superior foi utilizado balão, conforme Figura 20. As amostras são circulares e com diâmetro  $(72 \pm 1)$  mm e altura  $(30 \pm 1)$  mm. As amostras foram colocadas sobre uma lâmina de aproximadamente 2 milímetros de água deionizada. As medições do peso foram realizadas nos tempos de 1min, 2min, 5min, 10 min, 15min, 30 min, 60min, 2h, 6h, 8h, 48h, 72h e 7 dias.

Figura 20 - Corpos de Prova durante ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Registrada pela autora.

Devido à grande gama de idades utilizadas e pela dificuldade de estabilizar a porosidade em corpos de prova com idade inferiores a 28 dias optou-se apenas por avaliar a idade de 28 dias. Optou-se pelos corpos de prova para ambos os traços com 28 dias de cura imerso em água e hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e 28 dias de cura dentro da forma, conforme Tabela 8. Para possibilitar a análise estatística foram utilizados 3 blocos por condição.

Tabela 8 - Resumo das siglas utilizadas no ensaio de absorção

Sigla	Relação a/c	Aditivo	Cura	Tempo de Cura
050CMF	0,5	Não	Forma	28 dias
050CMA	0,5	Não	Água e $\text{Ca}(\text{OH})_2$	28 dias
035ADF	0,35	Sim	Forma	28 dias
035ADA	0,35	Sim	Água e $\text{Ca}(\text{OH})_2$	28 dias

Fonte: Elaborada pela autora.

#### 3.2.4.2 Absorção de Água Total - Índice de Vazios e Massa Específica

Para os ensaios de absorção total de água foram seguidas as métricas de ensaio apresentadas na NBR 9778 (ABNT, 2015). Da mesma forma que no ensaio de absorção de água por capilaridade, optou-se por corpos de prova curados em forma e em água e cal com idade de 28 dias.

Foram utilizadas 3 amostras cilíndricas para cada situação, com diâmetro ( $72 \pm 1$ ) mm e altura ( $30 \pm 1$ ) mm.

### 3.2.4.3 Resistência à Compressão

O ensaio de resistência a compressão foi realizado para todas as pastas a partir do método normatizado pela NBR 7681-4 (ABNT, 2013). Os corpos de prova foram moldados e ensaiados com base em uma adaptação da NBR 7215 (ABNT, 2019).

Os corpos de prova deverão obedecer às seguintes especificações: diâmetro ( $16,5 \pm 0,5$ ) mm e altura ( $31,5 \pm 0,5$ ) mm, conforme Figura 21.

Figura 21 – Corpo de prova para resistência à compressão



Fonte: Registrada pela autora.

Foram realizados três ensaios por tipo de pasta, nas idades de 7 dias, 14 dias e 28 dias.

### 3.2.5 Ensaio De Corrosão

Nesse subitem serão apresentados os ensaios que realizados com a barra (grampo) referentes a corrosão.

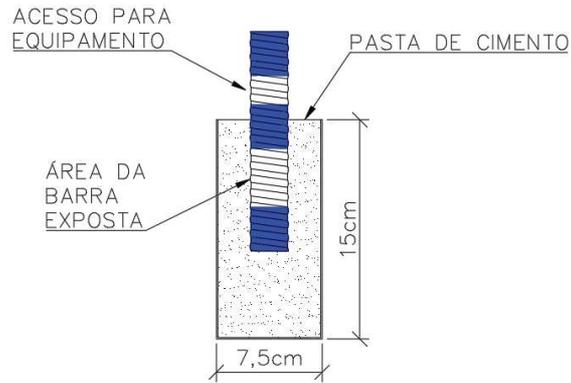
#### 3.2.5.1 Preparação das Amostras

Para a moldagem dos corpos de provas usados no presente trabalho for seguido as orientações da NBR 7681 (ABNT, 2013).

Para que as amostras sejam mais próximas da realidade possível será utilizada o método Lollipop (Figura 22), mesmo utilizado por (ZHU *et al.*,2015; WHEAT, 2002) esse método consiste na moldagem dos copos de prova como se

fossem pirulitos, as dimensões desses corpos de prova serão as mais próximas da realidade o possível.

Figura 22 – Desenho esquemático do corpo de prova



Fonte: Elaborada pela autora.

As barras utilizadas possuem 25mm de diâmetro e o corpo de prova que será preenchido com pasta de cimento terá 75mm de diâmetro e 150mm de comprimento, conforme Figura 23, as medidas de diâmetro da barra e do corpo de prova (representando o furo) são as recomendadas por Clouterre (1992).

Figura 23 – Corpo de Prova Montado



Fonte: Registrada pela autora.

Para os ensaios foram preparadas dezesseis amostras como a apresentada na Figura 23, sendo metade delas produzidas com o traço referência: Cimento Portland CP IV RS 32, relação água/cimento 0,5 e sem aditivos. A outra metade com o traço teste, sendo: Cimento Portland CP IV RS 32, relação água cimento 0,35 e aditivo Glenium 51 ® (0,5% da massa do cimento). A cura foi realizada em três diferentes situações, para ambas as pastas: 28 dias em forma, 1 dia em forma e imersão em água + hidróxido de cálcio e 1 dia em forma e imersão em água + cloreto de sódio.

Tabela 9 - Amostras para ensaios Eletroquímicos

<b>Sigla</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Aditivo</b>	<b>Tempo em Forma (dias)</b>	<b>Solução de Imersão</b>
050CMFA	0,50	Não	28	Água e Ca(OH) <sub>2</sub>
050CMFC	0,50	Não	28	Água e NaCl
035ADFA	0,35	Sim	28	Água e Ca(OH) <sub>2</sub>
035ADFC	0,35	Sim	28	Água e NaCl
050CMA	0,50	Não	1	Água e Ca(OH) <sub>2</sub>
050CMC	0,50	Não	1	Água e NaCl
035ADA	0,35	Sim	1	Água e Ca(OH) <sub>2</sub>
035ADC	0,35	Sim	1	Água e NaCl

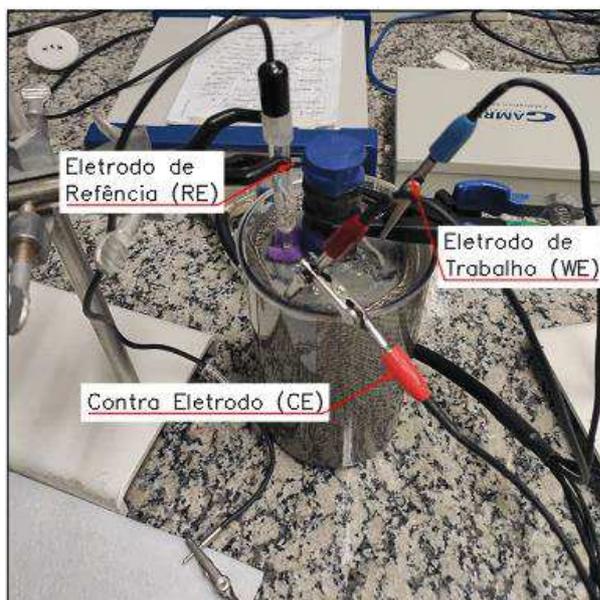
Fonte: Elaborada pela autora

Para garantir que a imersão em solução fosse completa e que não ocorresse a perda de solução para o ambiente, optou-se por recipientes fechados.

### 3.2.5.2 Potencial de Corrosão e Resistência de Polarização Linear

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em um potenciostato/galvanostato Gamry Interface 1010E. Para as medições, a amostra é imersa em solução (de água e cal ou água e cloreto de sódio, conforme a condição de exposição), e envolta por uma tela de aço inoxidável, local onde será fixado o contra eletrodo (CE); o eletrodo de trabalho (WE) é conectado à parte sem isolamento da barra, e o eletrodo de referência (RE) é conectado ao corpo de prova. Para garantir que a base do eletrodo de referência esteja em contato na sua totalidade com a amostra utilizou-se uma esponja úmida. O arranjo do ensaio é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Célula eletroquímica montada



Fonte: Registrada pela autora.

Para a estabilização do corpo de prova foram adotadas as seguintes premissas: variação de medição menor que 0,01 mV/s ou 900s (15 minutos) de ensaio. O valor adotado será o primeiro valor que atender a variação de 0,01mV/s ou o último valor aferido ao final dos 900s, sendo esse o potencial de corrosão. Para os ensaios de resistência de polarização linear será aplicado  $\pm 0,020$  V (20 mV) a partir do valor aferido para o potencial de corrosão. Os ensaios foram realizados em duas amostras diferentes e em triplicata para os ensaios, com os seguintes tempos de imersão: 1, 7, 15, 21, 28, 35 e 42 dias.

### 3.2.5.3 Curvas de Polarização

Para o ensaio das curvas de polarização o arranjo e a estabilização ocorrem da mesma forma que para os de potencial de corrosão, o primeiro valor mensurado após estabilização de 900s ou variação inferior 0,01mV/s é usado para a aplicação de uma variação de potencial de  $\pm 0,2$  V. O ensaio foi realizado ao fim dos 42 dias de imersão.

### 3.2.5.4 Penetração de Íons Cloreto

Para a realização da verificação da penetração de íons de cloreto livre, usa-se o método de aspersão de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ). Conforme a UNI 7928 (1978), deve se usar uma solução de nitrato de prata 0,1 M em água, a solução foi preparada pelo laboratório da Unisinos e permaneceu guardada em ambiente escuro e de temperatura aproximada de 25°C, garantindo que não perderia sua usabilidade.

Os ensaios foram realizados nas mesmas amostras utilizadas para os ensaios de potencial de corrosão e resistência de polarização linear, sendo cilíndricos com 150mm ( $\pm 10$ mm) de altura e 75mm ( $\pm 3$ mm) de diâmetro, conforme Figura 25 .

Figura 25 – Corpo de prova para penetração de cloretos



Fonte: Registrada pela autora.

Para os ensaios foram utilizadas duas amostras por situação (relação água/cimento, aditivo e tipo de cura), conforme Tabela 10:

Tabela 10 - Resumo das siglas utilizadas no ensaio de penetração de íons cloreto

Sigla	Relação a/c	Aditivo	Tempo em forma	Solução de imersão	Tempo em solução
050CMFA1	0,5	Não	28 dias	42 dias	Água e Hidróxido de cálcio
050CMFA2	0,5	Não	28 dias	42 dias	Água e Hidróxido de cálcio
050CMFC1	0,5	Não	28 dias	42 dias	Água e Cloreto de Sódio
050CMFC2	0,5	Não	28 dias	42 dias	Água e Cloreto de Sódio
050CMA1	0,5	Não	1 dia	42 dias	Água e Hidróxido de cálcio
050CMA2	0,5	Não	1 dia	42 dias	Água e Hidróxido de cálcio
050CMC1	0,5	Não	1 dia	42 dias	Água e Cloreto de Sódio
050CMC2	0,5	Não	1 dia	42 dias	Água e Cloreto de Sódio
0035ADFA1	0,35	Sim	28 dias	42 dias	Água e Hidróxido de cálcio
035ADFA2	0,35	Sim	28 dias	42 dias	Água e Hidróxido de cálcio
035ADFC1	0,35	Sim	28 dias	42 dias	Água e Cloreto de Sódio
035ADFC2	0,35	Sim	28 dias	42 dias	Água e Cloreto de Sódio
035ADA1	0,35	Sim	1 dia	42 dias	Água e Hidróxido de cálcio

035ADA2	0,35	Sim	1 dia	42 dias	Água e Hidróxido de cálcio
035ADC1	0,35	Sim	1 dia	42 dias	Água e Cloreto de Sódio
035ADC2	0,35	Sim	1 dia	42 dias	Água e Cloreto de Sódio

Fonte: Elaborada pela autora.

Após 42 dias imerso em solução a amostra for partida ao meio, onde foi aspergido a solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ). Para se verificar a presença de íons de cloreto, deve se aguardar no mínimo 15 minutos. A partir da penetração de cloretos será possível realizar a comparação com os ensaios de eletroquímicos. A Tabela 11 apresenta o critério adotado pela UNI 7928 (1978) para a identificação da presença de cloretos:

Tabela 11 – Presença de cloretos em corpos de prova

Coloração da Superfície do Corpo de Prova	Designação
Branca	Presença de Íons de Cloreto Livre
Marrom	Ausência de Íons de Cloreto Livre

Fonte: Adaptada de UNI 7928 (1978)

## **4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Nesse capítulo, são apresentados os resultados de todos os ensaios realizados durante o programa experimental. Os resultados obtidos a partir do ensaio do funil de Marsh foram decisivos para a tomada de decisão do traço teste. Logo, sempre que se tratar da pasta teste, será o traço apresentado como o mais adequado conforme este ensaio. Para os ensaios eletroquímicos citados no presente trabalho, vale ressaltar que o Eletrodo de Referência (RE) utilizado no trabalho é o Ag/AgCl sat. KCl. Assim, todos os valores de referência para o potencial de corrosão são referentes a esse eletrodo. Para as soluções de imersão, a solução neutra é composta por água e hidróxido de cálcio, a solução para o ataque de cloretos é água com cloreto de sódio (NaCl).

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em duas amostras diferentes e em triplicata em relação ao ensaio. Logo, cada situação apresenta 6 resultados. Para fins de melhor apresentação, serão mostrados os resultados médios de cada ensaio e respectivos desvios padrões, de cada amostra.

Todos os resultados aqui apresentados podem ser consultados em sua totalidade no APENDICE A.

### **4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO**

Nesse subitem, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em estado fresco na pasta referência e na pasta teste.

#### **4.1.1 Funil de Marsh**

Segundo Ortigão (1993), a pasta deve ser injetada em baixa pressão, usualmente apenas sob pressão gerada pela força gravitacional. O Funil de Marsh tem uma estrutura que permite a aplicação desse tipo de pressão. Este método foi utilizado na tomada de decisão para a escolha do traço que mais se assemelha à pasta referência, em relação ao tempo de escoamento pelo funil.

Na Tabela 12, são mostrados os valores de tempo transcorrido para que seja atendido o volume 1000cm<sup>3</sup> de pasta passante pelo Funil de Marsh.

Tabela 12 – Resumo dos tempos para Funil de Marsh

Amostra	Relação a/c	Aditivo (%) em relação a massa de cimento	Tempo de Passagem (s)
<b>C (referência)</b>	<b>0,5</b>	<b>0</b>	<b>145</b>
A1	0,2	1	263
A2	0,25	1	257
A3	0,3	1	241
A4	0,3	0,8	223
A5	0,3	0,5	236
<b>A6</b>	<b>0,35</b>	<b>0,5</b>	<b>170</b>
A7	0,35	0,45	112
A8	0,3	3	240

Fonte: Elaborada pela autora

Tratando-se de pequenos volumes de pastas produzidos para esses ensaios, percebeu-se uma maior sensibilidade ao aditivo. Além disso, não houve relação clara entre o teor de aditivos e a mudança de tempo de passagem pelo funil. Como no exemplo A3, A4 e A5 mesmo com relação a/c iguais (0,3) entre as duas primeiras (A3 e A4), a diminuição do teor de aditivo levou a diminuição do tempo de passagem, já entre as duas últimas (A4 e A5), o tempo de passagem aumentou, mostrando assim uma não linearidade.

Percebeu-se que pastas com uma concentração maior de aditivos apresentam uma viscosidade mais alta. Mesmo sendo mais fluidas, as mesmas mostravam dificuldade de escoar pelo funil e apresentaram um tempo maior de escoamento. Esse resultado também foi encontrado por Agilló (1999), que notou a diminuição do tempo de passagem com o aumento da relação água/cimento, mas nem sempre com o aumento da dosagem de superplastificante.

Também é possível notar que misturas com baixa relação água/cimento (inferior a 0,35), mesmo com grandes quantidades de aditivo, não apresentavam bom desempenho no funil de Marsh. Esse comportamento também foi observado por Agulló (1999). Segundo o autor, pastas com relação água/cimento entre 0,40 e 0,33 não se beneficiaram de dosagem de aditivos maiores 0,5%, assim corroborando com os resultados apresentados na Tabela 12.

Por fim, para a escolha da pasta teste, utilizou-se o tempo de passagem da pasta referência (145 segundos). Escolheu-se uma pasta que apresentava o tempo mais próximo, de 170 segundos: pasta com relação água/cimento 0,35 e 0,5% da

massa de cimento em aditivo Glenium 51. Após esse item, esta pasta será representada pela letra A na sigla da amostra.

## 4.2 ESTADO ENDURECIDO

Nesse subitem serão apresentados os resultados dos ensaios realizados em estado endurecido na pasta referência e na pasta teste.

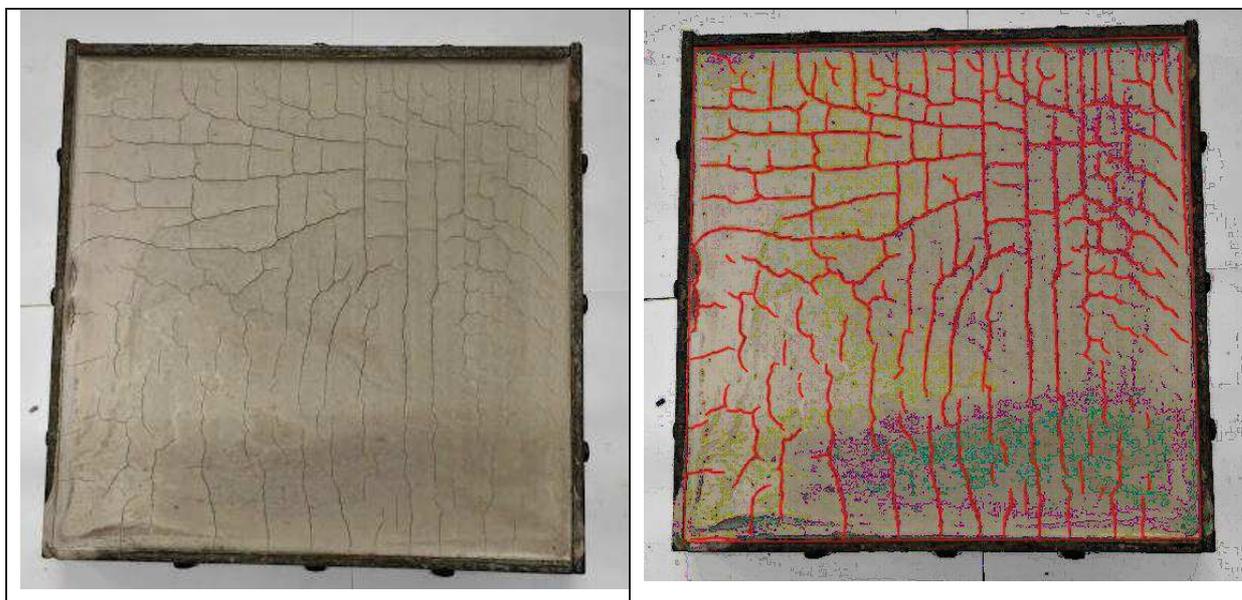
### 4.2.1 Fissuração

Nesse item serão apresentados os ensaios de fissuração para as pastas com relação a/c 0,50 e 0,35 respectivamente.

#### 4.2.1.1 Relação a/c 0,50

Nesse item serão apresentados os resultados de fissuração para a pasta de cimento produzida com relação água cimento 0,50, curada por 24hs em estufa.

Figura 26 – Fissuração produzida em pasta relação a/c 0,50



Fonte: Registrada pela autora.

A pasta de cimento produzida com relação a/c 0,50 e que é utilizada em todos os corpos de prova iniciado em:050CM, apresentada na Figura 26. Esse traço evidência um número elevado de fissuras, fissuras menores e as fissuras mais

espessas estão no sentido das ranhuras da forma, as fissuras menores e menos espessas estão no sentido contrário as ranhuras da forma, trazendo uma aparência de couro de crocodilo. As fissuras possuem espessura média de 0,06mm e área fissurada é de aproximadamente 1,78% da área total, 712,56mm<sup>2</sup>, sendo aproximadamente 16% maior que a com relação a/c 0,35.

#### 4.2.1.2 Relação a/c 0,35

Figura 27 – Fissuração produzida em pasta relação a/c 0,50



Fonte: Registrada pela autora.

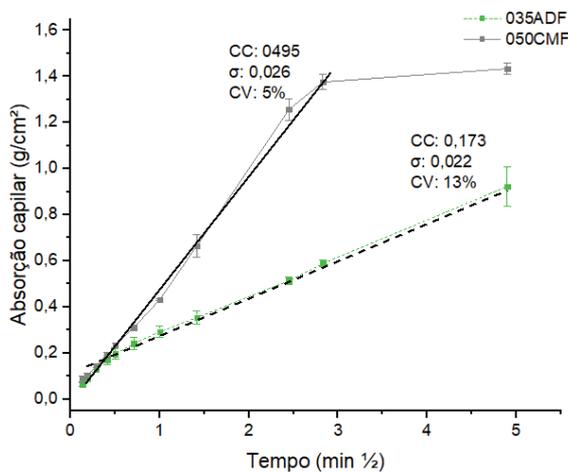
A pasta de cimento produzida com relação a/c 0,35 e que é utilizada em todos os corpos de prova iniciado em:035AD, apresentada na Figura 27. Esse traço evidência um número elevado de fissuras, fissuras mais espessas e em forma de meia lua, as fissuras menores e menos espessas estão no sentido de meia lua também, trazendo também uma aparência de couro de crocodilo. As fissuras possuem espessura média de 0,08mm e área fissurada é de aproximadamente 1,53% da área total, 612,33mm<sup>2</sup>, sendo 86% do total de fissuras na pasta relação a/c 0,50.

#### 4.2.2 Absorção de Água por capilaridade

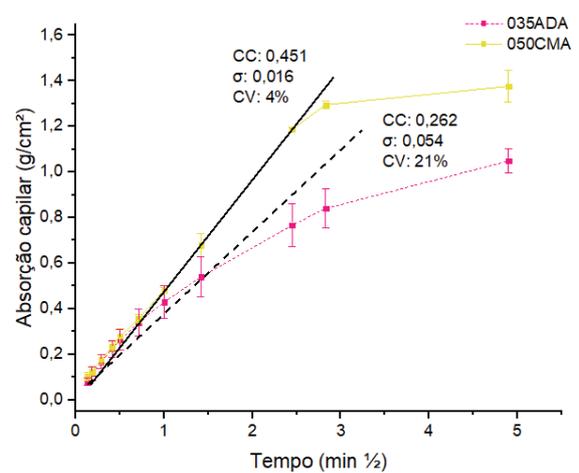
A Figura 28 mostra as curvas médias para absorção por capilaridade, para corpos de prova produzidos com relação a/c 0,50 e 0,35, curados em forma ou submersos por 28 dias, os ensaios foram realizados em triplicata.

Figura 28 – Resumo dos resultados para absorção por capilar.

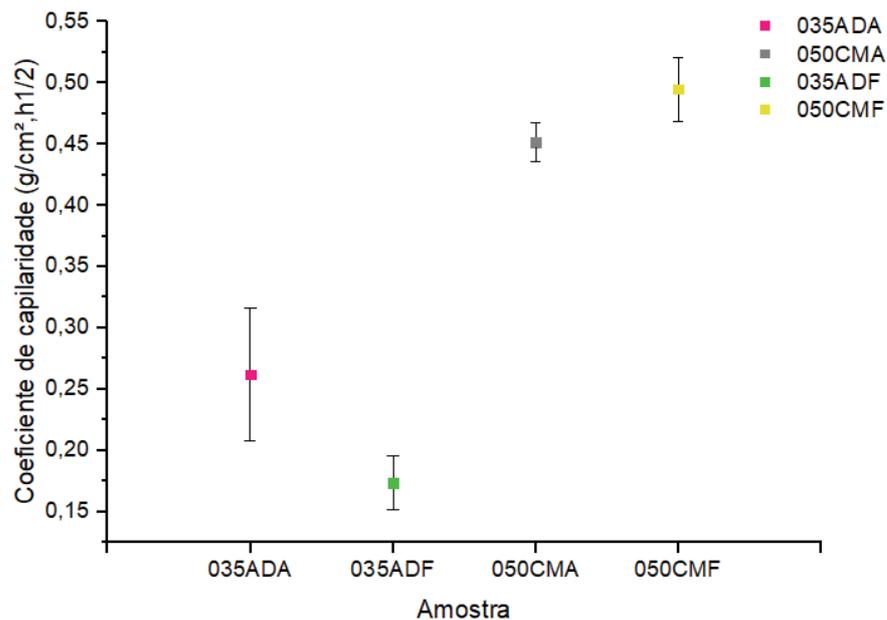
a) Absorção de água por capilaridade em amostras curadas em forma por 28 dias



b) Absorção de água por capilaridade em amostras curadas imersas.



c) resumo com as médias do coeficiente de capilaridade para todas as amostras



Fonte: Elaborada pela autora

De acordo com a Figura 28 (a e b) é possível perceber que as pasta de cimento produzidas com relação a/c mais baixas apresentaram inclinações menores, tanto para as curadas em água como para as curadas em formas. Como consequência dessa baixa inclinação o coeficiente de absorção menor.

Quando comparadas somente as pastas curadas em forma (a) o coeficiente de capilaridade é de 0,495 para a produzida apenas com cimento e relação a/c 0,50 e de 0,173 para a produzida com aditivo e relação a/c 0,35, sendo 3 vezes menor que a primeira mencionada.

Quando analisadas as amostras curadas em submersão (b), o corpo de prova produzido com relação a/c 0,50 apresentou valor de 0,451 para absorção por capilaridade, sendo 1,7 vezes maior que o coeficiente de capilaridade para o corpo de prova com relação a/c 0,45, que foi 0,262.

Mesmo não sendo possível aferir a quantidade de poros presentes nas amostras, os resultados obtidos são significativos e obedecem a Lei de Abrams, onde o excesso de água na mistura produz poros capilares, justificando os maiores valores obtidos pelas pastas produzidas com relação a/c 0,50.

Os bons resultados obtidos pelas pastas com relação a/c 0,35 se dão pela hidratação total ou praticamente total do cimento, e o consumo de toda a água durante as reações, desencadeado de forma menor a formação de poros capilares.

Vale lembrar que as amostras curadas em cloreto de sódio (NaCl), não foram ensaiadas, já que a penetração de íons cloretos pode ocasionar a formação de Sais de Friedel, sais esses que podem preencher os poros e produzir resultados distorcidos quando aplicados a absorção de água por capilaridade (BIRNIN-YAURI, GLASSER, 1998; PAUL, G. *et al*, 2015).

#### 4.2.3 Absorção de Água Total - Índice de Vazios e Massa Específica

A Tabela 13 apresenta os resultados para absorção total, índice de vazios e massa específica seca e saturada.

Tabela 13 – Tabela resumo dos resultados referentes a ABNT NBR 9778:2005

Amostra	Absorção Total (%)		Índice de Vazios (%)		Massa Específica Seca (g/cm <sup>3</sup> )		Massa Específica Saturada (g/cm <sup>3</sup> )	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão

035ADA	24,25	1,2	37,35	1,46	1,54	0,018	1,91	0,04
035ADF	28,52	0,5	42,87	0,43	1,50	0,013	1,93	0,01
050CMA	41,90	2,5	52,74	3,61	1,26	0,063	1,79	0,09
050CMF	35,14	1,7	47,05	1,67	1,34	0,017	1,81	0,01

Fonte: Elaborada pela autora

Em relação à absorção total, percebe-se que as amostras com relação água/cimento de 0,35 (035ADA e 035ADF) apresentaram resultados mais satisfatórios que as amostras com relação água/cimento 0,50 (050CMA e 050CMF). O índice de vazios da amostra com aditivo (035ADA), quando curada em água, é aproximadamente 42% menor do que a amostra sem aditivo (050CMA). Já quando curadas em forma a amostra com aditivo (035ADF) apresenta um índice de vazios 18% menor do que a sem aditivo (050CMF).

Para o índice de vazios, as amostras também seguiram o mesmo padrão. As pastas com aditivo curadas em forma (035CMF) e em água (035CMA) apresentaram 9% e 29% menos índice de vazios que as amostras sem aditivo curadas em forma (050CMF) e em água (035CMA), respectivamente.

Esse tipo de comportamento já era esperado para ambos os casos, devido a diminuição de poros. As amostras com relação água/cimento menor não terão excesso de água após a hidratação do cimento, desfavorecendo a formação de poros.

As amostras imersas em cloreto de sódio não foram ensaiadas, devido aos motivos citados anteriormente em 4.2.2 Absorção de Água por capilaridade.

#### 4.2.4 Resistência à Compressão

A Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão das amostras com relação água/cimento 0,35 e 0,50, curadas em água e hidróxido de cálcio, água e cloreto de sódio e forma.

Tabela 14 – Resistência à compressão para 7, 14 e 28 dias.

Amostra	Resistência à compressão 7 dias (MPa)			Resistência à compressão 14 dias (MPa)			Resistência à compressão 28 dias (MPa)		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Média	Desvio Padrão	CV (%)
035ADA	17,92	1,65	9,20	24,04	5,01	20,85	35,58	4,49	12,62
035ADF	23,64	7,42	31,37	26,58	3,08	11,59	36,84	3,21	8,72
050CMA	8,25	8,25	30,96	12,94	3,65	28,25	32,70	3,51	10,72
050CMF	9,19	3,68	40,02	13,86	0,94	6,81	34,31	6,68	10,71

Fonte: Elaborada pela autora

A resistência a compressão não é um ponto tão relevante na escolha da pasta, já que normalmente a ruptura ocorre por cisalhamento na interface entre a pasta e o solo. A resistência nessa interface é consideravelmente menor que em outros pontos, sendo o ponto de maior fragilidade do sistema (CLOUTERRE, 1991; LAZARTE et. al.,2003).

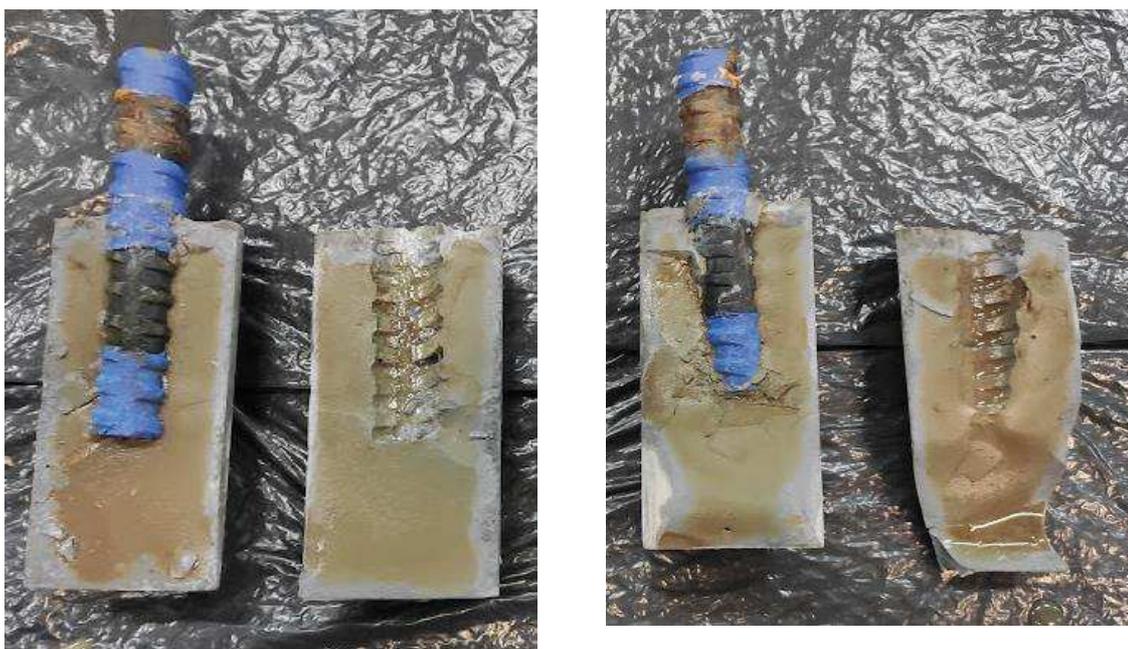
Porém é possível perceber que ao final dos 28 dias as amostras com relação a/c 0,35 apresentaram valores mais altos para resistência a compressão, sendo em torno de 10% das pastas produzidas com relação a/c 0,50, independentemente do tipo de cura. Isso corrobora o exposta na Lei de Abrams, onde menor a relação a/c maior a resistência.

#### 4.2.5 Penetração de Cloretos

Nesse subitem serão apresentados os ensaios realizados a partir da aspersão de Nitrato de Prata ( $\text{AgNO}_3$ ) em todas as amostras submetidas a exposição à cloretos, após 28 dias em forma e 42 dias em solução.

##### 4.2.5.1 Cura em forma

Figura 29 – Amostras curadas em forma por 28 dias, após a aspersão de Nitrato de Prata ( $\text{AgNO}_3$ )



(a) 050CMFC1



(b) 050CMFC2



(c) 035ADFC1

(D) 035ADFC2

Fonte: Registrada pela autora.

As amostras da Figura 29 produzidas com relação  $a/c$  0,50 (a e b) apresentaram uma penetração de forma homogênea por toda a borda amostra de em torno 7,0mm, bem inferior ao cobrimento de 25mm. Mostrando que o cloreto não penetrou até a barra de forma integral. As amostras com relação  $a/c$  0,35 (c e d) mostram uma penetração lateral de aproximadamente 2,0mm, também bem inferior aos 25mm de cobrimento da barra. Essa diferença de é esperada pela relação  $a/c$  diferente, maior relação  $a/c$  maior a quantidade de poros e maior a penetração.

Por isso é importante lembrar que a principal forma de movimento da água e do cloreto é por micro poros capilares e não de forma total, logo os cloretos podem estar atingindo a barra de forma pontual, através dos pontos de capilaridade gerando assim a diferença entre os resultados em ambiente não agressivo e o agressivo.

#### 4.2.5.1 Cura submersa

Nesse subitem serão apresentados os ensaios realizados a partir da aspersão de Nitrato de Prata ( $\text{AgNO}_3$ ) em todas as amostras submetidas a exposição à cloretos, após 1 dia em forma e 42 dias em solução.

Figura 30 – Amostras curadas em forma por 1 dia, após a aspersão de Nitrato de Prata ( $\text{AgNO}_3$ )



(a) 050CMC1



(b) 050CMC2



(c) 035ADFC1



(D) 035ADFC2

Fonte: Registrada pela autora.

As amostras da Figura 30 apresentam uma concentração maior de cloretos no interior e próximas a barra, provavelmente pela cura em contato com a solução de cloreto de sódio, logo a absorção ocorreu de forma mais ágil facilitada pela grande presença de poros e umidade dentro da amostra, essas características facilitam a penetração.

Amostras com relação a/c 0,50 tiveram um desempenho ruim, com os íons de cloreto alcançando a barra e perturbando as interações barra/pasta de cimento, isso

explica os resultados piores dessas amostras, em alguns pontos os íons de cloreto alcançaram os 25mm de cobrimento ao longo de toda a barra e em ambas as amostras (a e b).

Já as com relação a/c 0,35 tiveram um desempenho um pouco melhor, não tendo o alcance de íons de cloreto ao longo de toda a barra nas amostras, o alcance das amostras varia entre 15mm e 22mm, mostrando que a composição da pasta gera uma proteção mais efetiva para a corrosão da barra.

### 4.3 CORROSÃO

Nesse item, serão apresentados todos os resultados referentes aos ensaios de corrosão: potencial de corrosão, curvas de Tafel, resistência de polarização linear, corrente de corrosão, taxa de corrosão e penetração de cloretos.

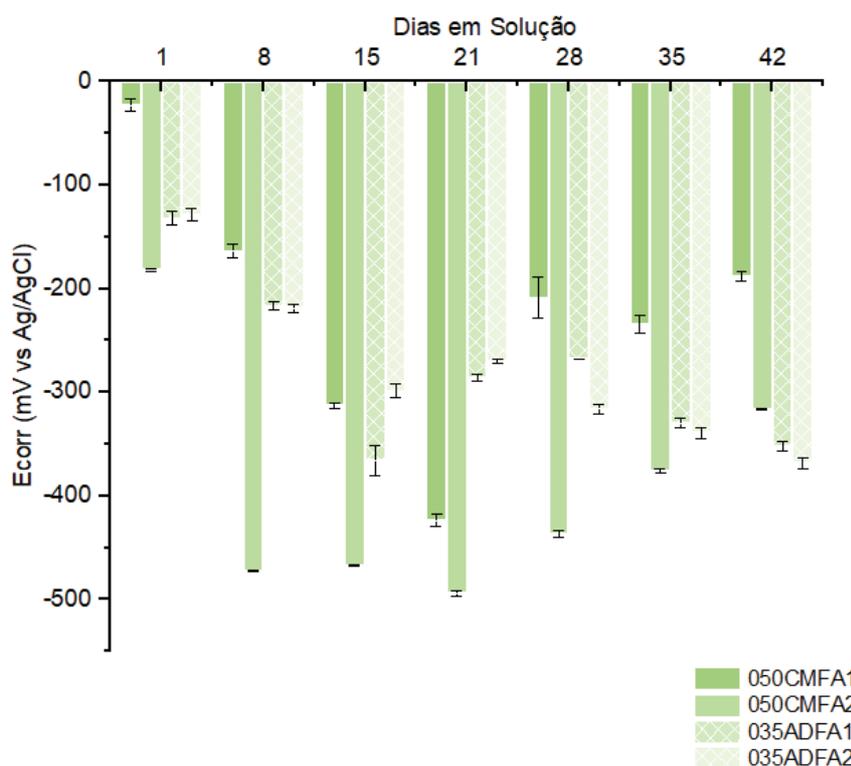
#### 4.3.1 Potencial de Corrosão

O potencial de corrosão tem como finalidade avaliar qualitativamente a possibilidade de ocorrência de corrosão em uma estrutura. Sendo ele um método apenas qualitativo, não deve ser o único utilizado para avaliar a corrosão de uma estrutura. Vale ressaltar que o eletrodo de referência utilizado para os ensaios foi de Ag/AgCl sat. KCl, e que o aço é galvanizado. Logo, valores de potencial mais negativos são esperados, em comparação ao aço carbono.

##### 4.3.1.1 Cura em forma sem exposição posterior à cloretos

O Figura 31 e a Tabela 15 apresentam a variação do potencial de corrosão para as amostras produzidas com e sem aditivo e curadas por 28 dias em forma. As amostras foram monitoradas semanalmente por 6 semanas (42 dias) a partir da imersão em solução não agressiva (água + hidróxido de cálcio).

Figura 31 – Variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 15 -Resumo da variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos

Amostra	Tempo de exposição (dias)	Potencial de Corrosão (mV vs Ag/AgCl)					
		1	2	3	Média	Desvio Padrão	CV (%)
050CMFA1	1	-30	-22	-16	-23	5,73	24,91
	8	-173	-163	-156	-164	6,98	4,26
	15	-317	-313	-310	-313	2,87	0,92
	21	-431	-424	-417	-424	5,72	1,35
	28	-232	-212	-184	-209	19,69	9,42
	35	-245	-233	-224	-234	8,60	3,68
	42	-194	-187	-182	-188	4,92	2,62
050CMFA2	1	-184	-181	-180	-182	1,70	0,93
	8	-472	-472	-473	-472	0,47	0,10
	15	-468	-467	-466	-467	0,82	0,18
	21	-497	-494	-491	-494	2,45	0,50
	28	-441	-437	-433	-437	3,27	0,75
	35	-379	-375	-373	-376	2,49	0,66
	42	-316	-315	-315	-315	0,47	0,15
035ADFA1	1	-140	-132	-125	-132	6,13	4,64
	8	-222	-216	-213	-217	3,74	1,72
	15	-386	-359	-353	-366	14,35	3,92
	21	-290	-282	-286	-286	3,27	1,14
	28	-268	-268	-267	-268	0,47	0,18
	35	-336	-329	-325	-330	4,55	1,38

	42	-358	-352	-347	-352	4,50	1,28
035ADFA2	1	-137	-127	-122	-129	6,24	4,84
	8	-223	-218	-214	-219	3,68	1,68
	15	-306	-301	-290	-299	6,68	2,23
	21	-274	-270	-268	-270	2,49	0,92
	28	-321	-315	-310	-316	4,50	1,42
	35	-346	-339	-333	-339	5,31	1,57
	42	-375	-368	-362	-368	5,31	1,44

Fonte: Elaborada pela autora

Na Figura 31, percebe-se uma grande discrepância entre as amostras, principalmente nas amostras 050CMFA1 e 050CMFA2. Os resultados variam do normalmente esperado quando amostras irmãs são ensaiadas, não sendo resultados semelhantes. Quando se depara com esse tipo de situação, existem duas prováveis causas: erros de execução do ensaio ou variedade nas amostras.

Através da Tabela 15, percebe-se que os ensaios foram realizados em triplicata e possuem um desvio padrão aceitável, logo descarta-se a hipótese se problemas durante a execução dos ensaios.

Assim, um problema de variação entre amostras é o mais provável fator responsável pela alteração de resultados. Quando se fala em matriz cimentícia, ambas foram moldadas no mesmo dia, em ambiente controlado e curadas juntas, novamente sendo uma possibilidade rejeitada. Resta apenas a variabilidade nas amostras de aço ou na galvanização, variabilidade essa que, posteriormente, foi observada nas barras.

De forma geral, potenciais de corrosão mais baixos são esperados para elementos galvanizados (referência), geralmente superiores aos tratados na ASTM C876 (2009). Na normativa, para o eletrodo de referência Ag/AgCl, o ideal e que indica pouca probabilidade de corrosão é acima de -83mV.

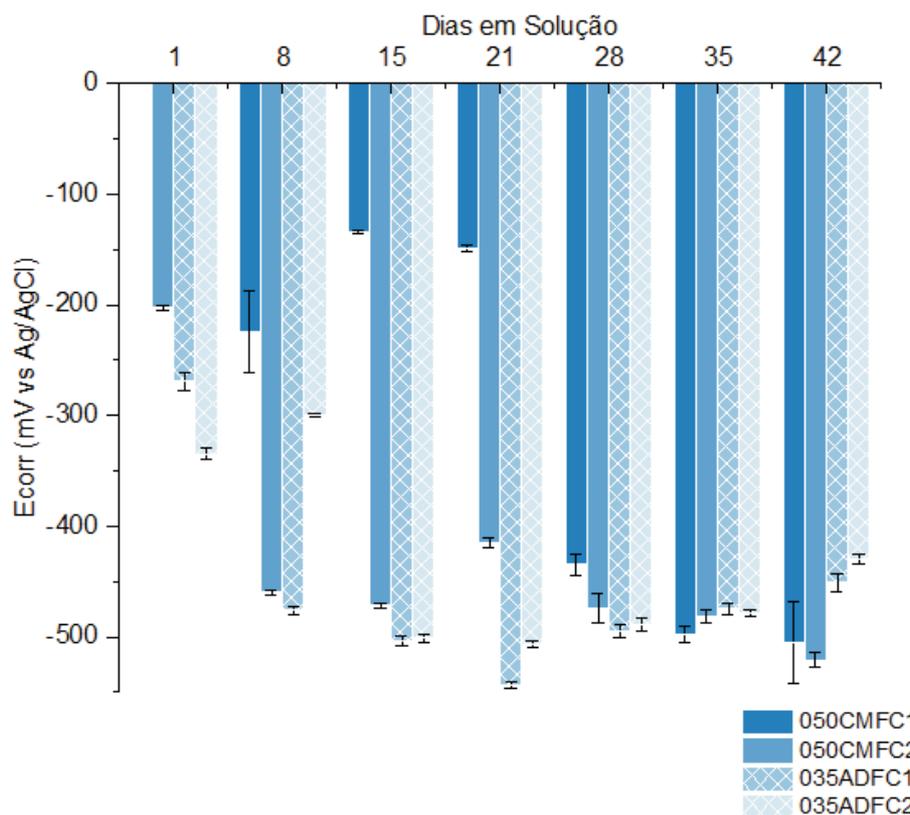
Percebe-se que as amostras com relação a/c 0,50 apresentaram um pior desempenho no decorrer das semanas em relação às amostras com relação 0,35. Porém, ao final do ciclo de monitoramento, os resultados para ambos os traços foram semelhantes (exceto 050CMFA1, como já citado). Entre o corpo de prova 050CMFA1 e os corpos de prova 035ADFA1 e 035ADFA2, a diferença foi de respectivamente -15mV e -53mV. Assim, foi inconclusiva a relação da composição da pasta com o aumento ou diminuição do potencial de corrosão. Isso pode ser explicado pelo fim da hidratação antes da exposição à solução. Provavelmente 42 dias não foram suficientes para a chegada de umidade até a barra, como mostrado

por Tavares (2006) e Rivera-Corral *et al* (2017), que observaram valores superiores a 100 dias.

#### 4.3.1.2 Cura em forma com exposição posterior à cloretos

A Figura 32 e a Tabela 16 apresentam a variação do potencial de corrosão para as amostras produzidas com e sem aditivo e curadas por 28 dias em forma. As amostras foram monitoradas semanalmente por 6 semanas (42 dias) a partir da imersão em solução agressiva (água + cloreto de sódio).

Figura 32 – Variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma com exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 16 -Resumo da variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma com exposição à cloretos

Amostra	Tempo de exposição (dias)	Potencial de Corrosão (mV vs Ag/AgCl)					
		1	2	3	Média	Desvio Padrão	CV (%)
050CMFC1	1						
	8	-249	-251	-171	-224	37,25	16,63
	15	-135	-135	-132	-134	1,41	1,05

	21	-152	-148	-146	-149	2,49	1,67
	28	-452	-429	-424	-435	12,19	2,80
	35	-510	-496	-488	-498	9,09	1,83
	42	-513	-504	-496	-504	6,94	1,38
050CMFC2	1	-203	-199	-199	-199	1,89	0,95
	8	-463	-459	-458	-459	2,16	0,47
	15	-474	-471	-470	-471	1,7	0,36
	21	-420	-415	-409	-415	4,5	1,08
	28	-492	-468	-462	-468	12,96	2,77
	35	-490	-480	-475	-480	6,24	1,30
	42	-530	-513	-520	-520	6,98	1,34
035ADFC1	1	-280	-264	-261	-268	8,34	3,11
	8	-481	-475	-472	-476	3,74	0,79
	15	-510	-503	-499	-504	4,55	0,90
	21	-547	-543	-541	-544	2,49	0,46
	28	-502	-494	-489	-495	5,35	1,08
	35	-482	-475	-469	-475	5,31	1,12
	42	-462	-449	-442	-451	8,29	1,84
035ADFC2	1	-341	-335	-329	-335	4,90	1,46
	8	-302	-300	-298	-300	1,63	0,54
	15	-505	-500	-496	-500	3,68	0,74
	21	-511	-507	-503	-507	3,27	0,64
	28	-496	-489	-483	-489	5,31	1,09
	35	-483	-479	-475	-479	3,27	0,68
	42	-436	-428	-426	-430	4,32	1,00

Fonte: Elaborada pela autora

Ressalta-se que o ensaio do dia 1 da amostra 050CMFC1 apresentou erros e foi descartado da análise de resultados, estando documentado no APÊNDICE A.

Até a terceira semana de imersão (21 dias), a 050CMFC1 apresentou um comportamento não esperado, tendo valores maiores em comparação as outras três amostras e principalmente em comparação com a 050CMFC2, que possui as mesmas características. Provavelmente, isso se deve a uma possível dificuldade de penetração da solução, podendo ser uma matriz com poros capilares mais fechados.

Para o restante das amostras, os dados das duas primeiras semanas de medição também se mostraram bastante instáveis e até de difícil compreensão. Isso pode ter ocorrido pelas amostras terem sido curadas em um ambiente seco (forma), logo não estavam saturadas o suficiente para que a medição ocorresse com sucesso, conforme orientado por RILEM (2003).

As amostras com relação água/cimento 0,35 (035ADFC1 e 035ADFC2), inicialmente, mostram um comportamento de potencial mais negativo e mais constante, criando uma estabilidade a partir da terceira medição (15 dias) e um aumento na última medição. Esse comportamento também foi observado por Modesti (2014) em amostras submetidas a ataque por cloretos. Vale destacar que o

trabalho citado foi realizado em concreto, com relação água/cimento de 0,45; e o tempo para o início do aumento de potencial observado foi maior que 42 dias, provavelmente pela diferença na matriz cimentícia (agregados podem retardar o processo, já que dificultam a penetração por capilaridade).

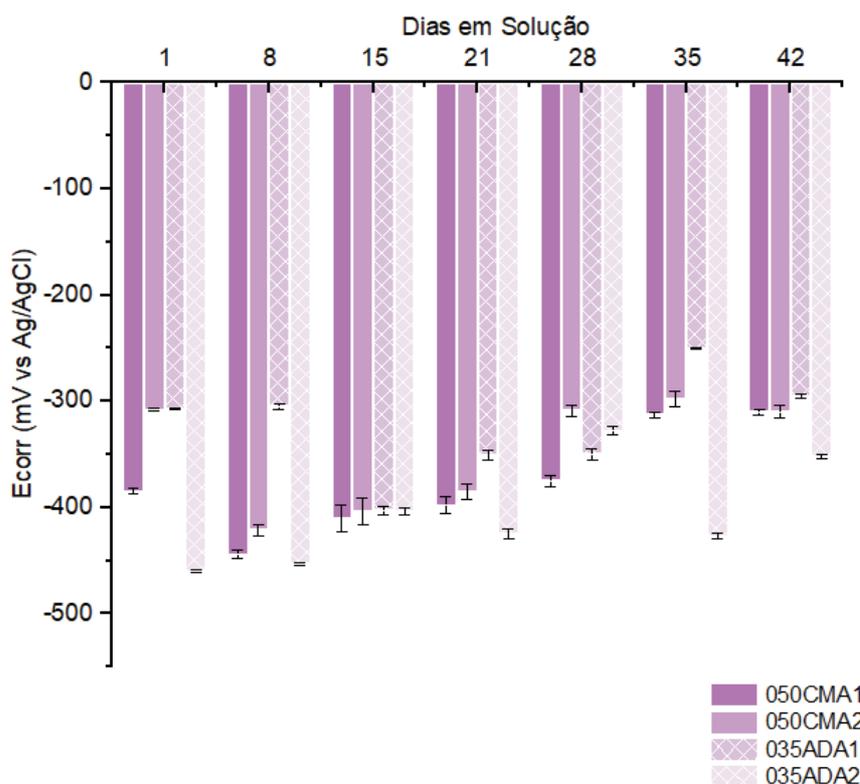
Quando comparadas ao final dos 42 dias, percebe-se que as amostras com relação a/c 0,50 apresentaram valores entre 50mV e 90mV, maiores do que as de relação a/c de 0,35. Mesmo sendo uma diferença considerável, chegando a 20% de ganho de  $E_{corr}$  em algumas amostras, o ideal seria realizar um acompanhamento mais longo das amostras para entender o comportamento a longo prazo. Dessa forma, seria possível afirmar com maior precisão a influência da relação a/c para a corrosão.

É importante lembrar que o  $E_{corr}$  não deve servir como única forma de análise para determinar a probabilidade de corrosão de uma amostra, sendo apenas qualitativa e dependendo de outros ensaios para determinar a velocidade em que essa corrosão irá de fato ocorrer (CASCUDO, 1997).

#### 4.3.1.3 Cura submersa sem exposição à cloretos

A Figura 33 e a Tabela 17 apresentam a variação do potencial de corrosão, para as amostras produzidas com e sem aditivo e curadas submersas. As amostras foram monitoradas semanalmente por 6 semanas (42 dias) a da desmoldagem (1 dias após a moldagem) em solução agressiva (água + hidróxido de cálcio).

Figura 33 -Variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas sem exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 17 -Resumo da variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas sem exposição à cloretos

Amostra	Tempo de exposição (dias)	Potencial de Corrosão (mV vs Ag/AgCl)					
		1	2	3	Média	Desvio Padrão	CV (%)
050CMFC1	1	-381	-386	-387	-385	2,62	0,68
	8	-450	-444	-439	-444	4,5	1,01
	15	-427	-406	-398	-410	12,23	2,98
	21	-408	-397	-389	-398	7,79	1,96
	28	-382	-375	-369	-375	5,31	1,42
	35	-309	-314	-315	-313	2,62	0,84
	42	-313	-310	-306	-310	2,87	0,93
050CMFC2	1	-310	-308	-307	-308	1,25	0,41
	8	-428	-421	-415	-421	5,31	1,26
	15	-421	-400	-390	-404	12,92	3,20
	21	-394	-384	-377	-385	6,98	1,81
	28	-315	-308	-303	-309	4,92	1,59
	35	-308	-296	-291	-298	7,13	2,39
	42	-317	-309	-303	-310	5,73	1,85
035ADFC1	1	-308	-306	-306	-307	0,94	0,31
	8	-309	-305	-302	-305	2,87	0,94
	15	-409	-403	-398	-403	4,5	1,12
	21	-357	-350	-346	-351	4,55	1,30
	28	-357	-349	-345	-350	4,99	1,43
	35	-250	-250	-249	-250	0,47	0,19
	42	-297	-295	-293	-295	1,63	0,55
035ADFC2	1	-461	-460	-459	-460	0,82	0,18
	8	-454	-453	-451	-453	1,25	0,28

	15	-409	-403	-400	-404	3,74	0,93
	21	-431	-424	-419	-425	4,92	1,16
	28	-333	-327	-324	-328	3,74	1,14
	35	-430	-426	-424	-427	2,49	0,58
	42	-350	-352	-354	-352	1,63	0,46

Fonte: Elaborada pela autora

As amostras apresentadas na Tabela 17 foram curadas submersas. Percebe-se que elas começaram a apresentar valores de  $E_{corr}$  muito próximos a partir da 2ª semana. Nas amostras 050CMA1 e 35ADA2, percebeu-se uma maior variabilidade nos resultados, como já citado em 4.3.1.1 Cura em forma sem exposição posterior à cloretos. A qualidade da camada de galvanização pode estar influenciando no pior desempenho de uma ou outra amostra.

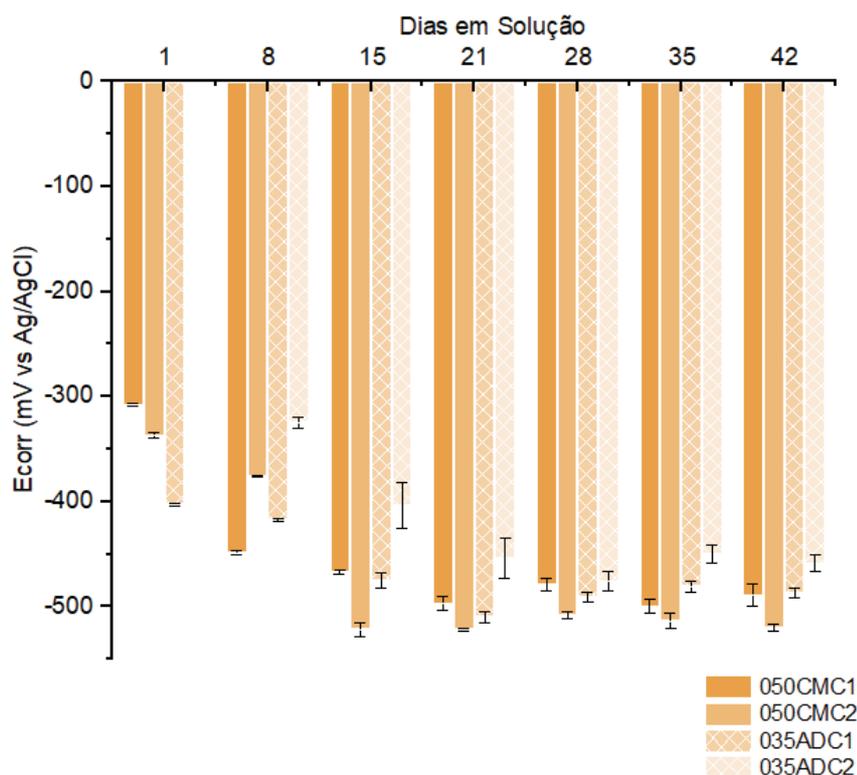
A partir da medição de 15 dias em solução, percebe-se uma estabilização/melhora nos resultados. Uma explicação é porque nos primeiros 7 dias ocorre o pico de hidratação do cimento, tornando o ambiente cada vez mais alcalino e então favorecendo a formação do filme de passivação. Esse filme torna o sistema mais nobre e tende a estabilizar  $E_{corr}$  e torná-lo menos negativo (BROOMFIELD,2007; GENTIL,2011; 2007; TAYLOR, 1997).

Novamente, não se percebem diferenças significativas entre as amostras moldadas com relação água/cimento 0,50 e 0,35, provavelmente por ainda estarem em processo de cura e hidratação do cimento. Diferenças mais significativas talvez ocorram em idades maiores, como observado por Modesti (2014), onde o concreto com maior relação água/cimento apresentava uma chance consideravelmente maior de correr que aquele com relação menor. Isso também pode ser explicado pela menor tendência de absorção de água por capilares como mostrado em 4.2.2 Absorção de Água por capilaridade.

#### 4.3.1.4 Cura submersa com exposição à cloretos

O Figura 34 e a Tabela 18 apresentam a variação do potencial de corrosão, para as amostras produzidas com e sem aditivo e curadas submersas. As amostras foram monitoradas semanalmente por 6 semanas (42 dias) a da desmoldagem (1 dias após a moldagem) em solução agressiva (água + cloreto de sódio).

Figura 34 - Variação do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 18 -Resumo da variação do potencial de corrosão (Ecorr) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos

Amostra	Tempo de exposição (dias)	Potencial de Corrosão (mV vs Ag/AgCl)					
		1	2	3	Média	Desvio Padrão	CV (%)
050CMFC1	1	-310	-308	-307	-308	1,25	0,41
	8	-451	-449	-447	-449	1,63	0,36
	15	-470	-467	-465	-467	2,05	0,44
	21	-505	-497	-489	-497	6,53	1,31
	28	-487	-478	-473	-479	5,79	1,21
	35	-509	-499	-493	-500	6,6	1,32
	42	-500	-492	-475	-489	10,42	2,13
050CMFC2	1	-335	-337	-340	-337	2,05	0,61
	8	-376	-376	-375	-376	0,47	0,13
	15	-531	-521	-515	-522	6,6	1,26
	21	-524	-521	-520	-522	1,7	0,33
	28	-512	-507	-505	-508	2,94	0,58
	35	-524	-513	-506	-514	7,41	1,44
	42	-524	-520	-516	-520	3,27	0,63
035ADFC1	1	-404	-402	-404	-403	0,94	0,23
	8	-419	-417	-416	-417	1,25	0,30
	15	-485	-473	-468	-475	7,13	1,50
	21	-517	-509	-504	-510	5,35	1,05
	28	-497	-490	-485	-491	4,92	1,00
	35	-488	-481	-474	-481	5,72	1,19
	42	-493	-486	-481	-487	4,92	1,01
035ADFC2	1						
	8	-331	-325	-319	-325	4,9	1,51
	15	-433	-399	-380	-404	21,92	5,43

	21	-480	-447	-435	-454	19,03	4,19
	28	-488	-473	-467	-476	8,83	1,86
	35	-462	-447	-440	-450	9,18	2,04
	42	-469	-457	-450	-459	7,85	1,71

Fonte: Elabora pela autora

O ensaio realizado no primeiro dia da amostra 035ADC2 apresentou erros e foi descartado da análise de resultados, estando documentado no APÊNDICE A.

Percebe-se que todas as amostras tiveram comportamento semelhantes no decorrer dos 42 dias de imersão, comportamento esse também encontrado por e Tavares (2006) e Rivera-Corral *et al* (2017), onde amostras com relações água cimento apresentavam valores próximos de  $E_{corr}$  para exposições mais baixas. Importante destacar que em ambos os casos as barras analisadas, são galvanizadas, assim como nesse estudo.

No caso de Tavares (2006), que acelerou a penetração de cloretos, a matriz cimentícia com menor relação água cimento apresentou uma diferença de potencial mais significativa no ciclo 8 (72 dias), último ciclo por ela monitorado. Logo não é possível saber qual foi o comportamento após esse período de tempo.

Segundo Rivera-Corral *et al.* (2017), as suas amostras de concreto começaram a apresentar valores com diferenças mais consideráveis a partir do dia 200, mantendo-se até o dia 1000.

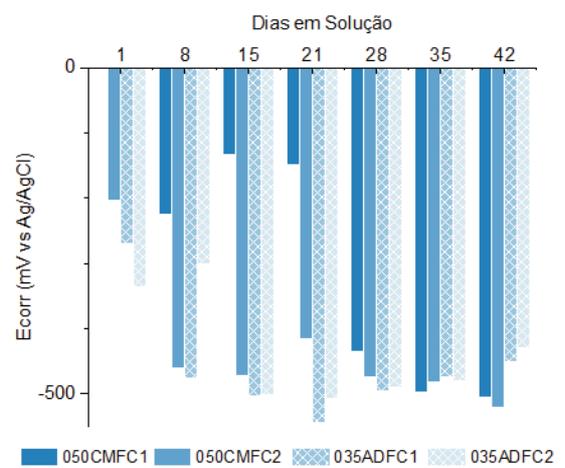
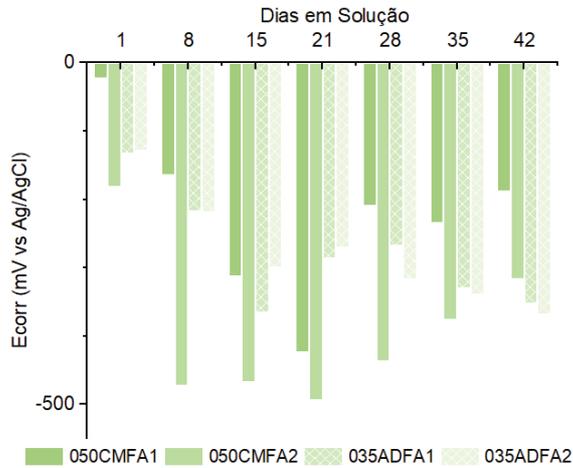
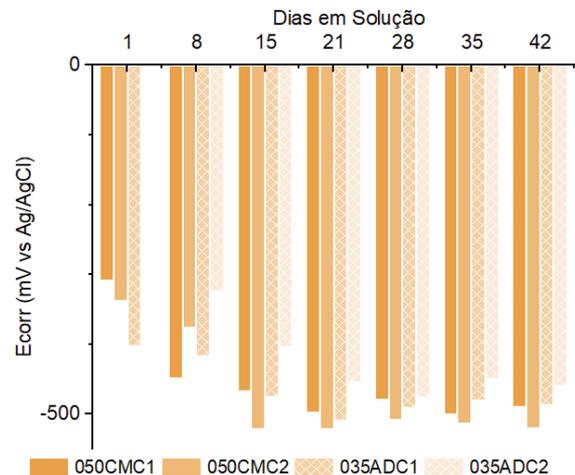
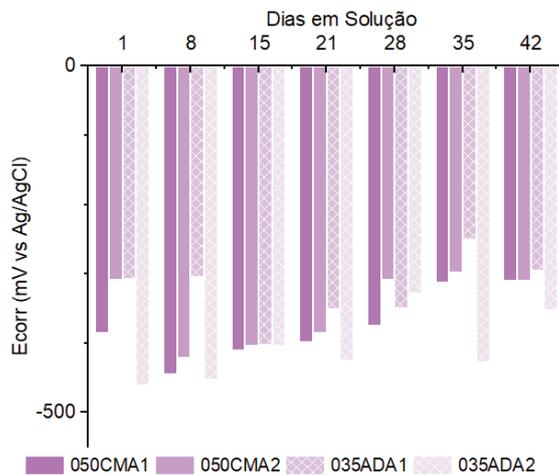
Tavares (2006) e Rivera-Corral *et al.* (2017) utilizaram o eletrodo de referência SCE e as conversão a critério de comparação foram realizadas a partir da RILEM (2003):

- a) Calomel (Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) KCL sat.                    SCE                    +0,241V SHE
- b) Silver Chloride (Ag/AgCl) KCL sat.            SSCE                    +0,199V SHE.

Dessa forma, novamente a relação a/c não foi determinante para o início do processo de corrosão em até 42 semanas.

#### 4.3.1.5 Comparação entre os tipos de cura

A Figura 35 apresenta as quatro situações estudadas durante esse trabalho : corpos de prova moldados com aditivo (a/c 0,35) e sem (a/c 0,50), exposto à ataque de cloretos ou não, após a cura (28 dias em forma) ou durante a cura (1 dia em forma).

Figura 35 – Comparação do Potencial de Corrosão ( $E_{corr}$ )(a) curadas em forma imersas em  $H_2O+Ca(OH)_2$ ,(b) curadas em forma imersas em  $H_2O+NaCl$ (c) curadas imersas em  $H_2O+Ca(OH)_2$ (d) curadas em imersas em  $H_2O+NaCl$ 

Fonte: Elaborada pela autora

Quando se fala em amostras que foram curadas em forma e submetidas à ataques de cloretos após o fim da hidratação do cimento, conforme os cloretos tinham êxito na penetração, o potencial foi diminuindo, como esperado: Amostras submetidas a cloretos apresentaram maior tendência à corrosão independente da sua composição microestrutural.

Quando comparadas amostras com a relação  $a/c$  0,5, as que estavam expostas a cloretos tinham entre 60% e 65% a mais de chance de corroer do que as que não estavam. Já as com relação  $a/c$  0,35 quando expostas a ataque de cloretos tinham entre 16% e 26% de chance de corroer do que as que não estavam. Dessa forma, evidencia-se que, quando analisado o  $E_{corr}$  de forma comparativa entre

amostras expostas a ambientes agressivos ou não, as que tinham relação a/c menor e aditivo apresentam um desempenho superior.

Quando comparadas as amostras submersas um dia após a confecção, aquelas com relação a/c de 0,35 e que foram expostas a ataques por cloretos mostravam-se com maior probabilidade de corrosão a partir a avaliação do  $E_{\text{corr}}$  entre 58% e 68% do que as curadas em água e hidróxido de cálcio. Quando analisadas as amostras com relação a/c 0,35 percebe-se uma tendência de corrosão nas amostras submetidas a cloreto, sendo 30% e 65% do que as curadas apenas em água, mostrando novamente que a pasta confeccionada com relação água cimento mais baixa é mais efetiva para retardar a corrosão.

É importante destacar que a comparação entre as amostras com curas diferentes não é relevante para esse trabalho, pois trata-se de condições distintas. Uma delas simula um ambiente que se tornou agressivo após a cura da pasta de cimento e a outra quando a pasta de cimento já foi introduzida em ambiente agressivo a partir do seu primeiro momento.

#### **4.3.2 Curvas de Polarização**

As curvas de Tafel ou curvas de polarização foram obtidas a partir da aplicação de um potencial de  $\pm 200\text{mV}$  a partir do  $E_{\text{corr}}$  da amostra, a uma velocidade  $0,1667\text{mV/s}$ . Pela maior aplicação de potencial, o ensaio pode causar algum tipo de dano na amostra e foi realizado apenas após os 42 dias de imersão (ASTM G59, 2014).

Com as curvas de polarização, é possível determinar os valores de  $\beta_a$  (coeficiente de inclinação do lado anódico) e  $\beta_c$  (coeficiente de inclinação do lado catódico). A partir  $\beta_a$  e  $\beta_c$  é possível determinar a constante de Stern-Geary (B), utilizada para o cálculo da densidade da corrente ( $I_{\text{corr}}$ ).

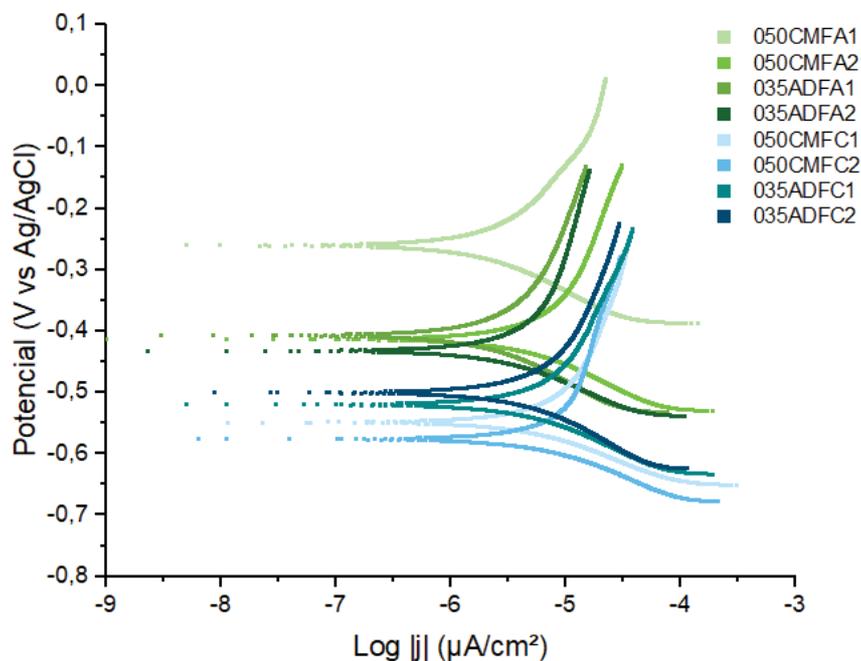
Esse ensaio em alguns casos é dispensado e são utilizadas constantes padronizadas sendo de  $26\text{mV}$  para aços com corrosão ativa e  $52\text{mV}$  para aços passivados (BROOMFIELD, 2006; CARINO 2000). A utilização dessas constantes gera divergência na comunidade científica e não são indicadas para aços galvanizados como os empregados nesse estudo, logo não serão usadas para comparações.

Por exemplo, Michel *et al.* (2016) encontrou valores para a constante de Stern-Geary entre 13mV e 1570mV para amostras de concreto armado e Grub *et al.* (2006) constatou valores de B para amostras imersas em NaCl variando entre 13,4mV e 76,5mV. Ou seja, os valores não seguem padrão específico. Prezando pela qualidade dos resultados, o indicado é que a constante B seja calculada a partir da inclinação do ramo catódico e anódico das curvas de polarização.

#### 4.3.2.1 Cura em forma

A Figura 36 apresenta a comparação entre as curvas de polarização para amostras submetidas a imersão em solução não agressiva (água + hidróxido de cálcio) e solução agressiva (água + cloreto de sódio), para pastas com relação a/c 0,50 e 0,35 curadas em forma por 28 dias, pré-imersão.

Figura 36 - Curvas de polarização ao final de 42 dias em solução (curadas previamente em formas)



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 19 – Constantes de Stern-Geary (B) para pastas curadas em forma

Amostra	$\beta_a$ (mV)	$\beta_c$ (mV)	B (mV)	Ecorr (mV vs Ag/AgCl)
050CMA1	5547	3692	964	-188
050CMA2	2624	8817	279	-329
035ADA1	3596	8361	1093	-332

035ADA2	3596	10637	1168	-338
050CMC1	3555	10298	1149	-450
050CMC2	2063	9861	741	-477
035ADC1	2655	9185	895	-433
035ADC2	3013	7966	950	-424

Fonte: Elaborada pela autora

Assim como em 4.3.1.1 Cura em forma sem exposição posterior à cloretos, percebe-se que a curva de polarização 050CMFA1 apresenta um comportamento diferentes das demais. Como já citado anteriormente, acredita-se que a principal causa para esse comportamento seja alguma falha de galvanização.

Conforme Buchanan e Stansbury (2012), percebe-se que o ramo anódico das 4 curvas apresenta uma alteração. Esse tipo de comportamento pode se dar pela presença de algum processo de polarização por ativação ou concentração, como modificação na interface ou mudança na concentração de oxigênio.

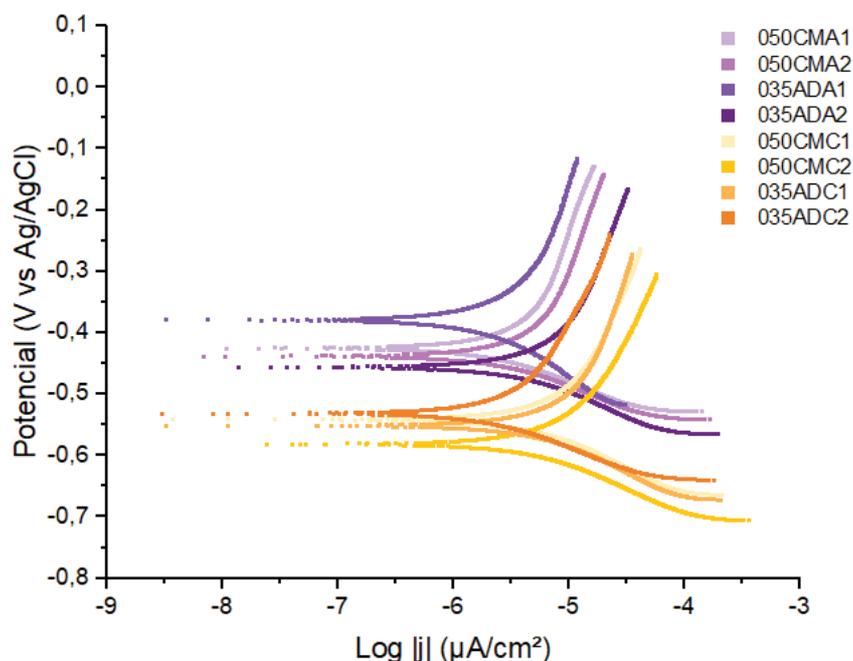
Ainda se percebe que as amostras que foram expostas ao cloreto de sódio têm potenciais mais negativos, mostrando comportamento esperado e semelhante às encontradas por Modesti (2020). No trabalho, as amostras foram ensaiadas a partir da simulação dos poros do concreto, sendo que as que foram expostas a soluções com mais presença de cloretos também apresentaram potenciais mais negativos.

Quanto à constante de Stern-Geary (B), não é possível identificar um padrão entre os valores encontrados. Ocorre disparidade entre amostras pares, podendo ser resultado de problemas intrínsecos do material, como pontos de falhas ou mudança de qualidade na galvanização. Também há a limitação na forma de análise das curvas, já que as retas de inclinação devem ser ajustadas de forma manual.

#### 4.3.2.3 Cura submersa

A Figura 37 apresenta a comparação entre as curvas de polarização para amostras submetidas a imersão em solução não agressiva (água + hidróxido de cálcio) e solução agressiva (água + cloreto de sódio), para pastas com relação a/c 0,50 e 0,35 curadas submersas.

Figura 37 - Curvas de polarização ao final de 42 dias em solução (curadas submersas)



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 20 – Constantes de Stern-Geary (B) para pastas curadas submersas

Amostra	$\beta_a$ (mV)	$\beta_c$ (mV)	B (mV)	$E_{corr}$ (mV vs Ag/AgCl)
050CMA1	2251	11971	824	-328
050CMA2	2600	13301	946	-341
035ADA1	3596	8361	1093	-332
035ADA2	3805	7346	1090	-317
050CMC1	2938	9681	980	-463
050CMC2	3055	9068	993	-505
035ADC1	2133	9068	751	-471
035ADC2	2796	11712	981	-439

Fonte: Elaborada pela autora

Novamente, percebe-se que as amostras curadas submersas, tanto em cloreto de sódio ou água e hidróxido de cálcio, apresentam o ramo anódico alterado e com valores de inclinação mais baixos.

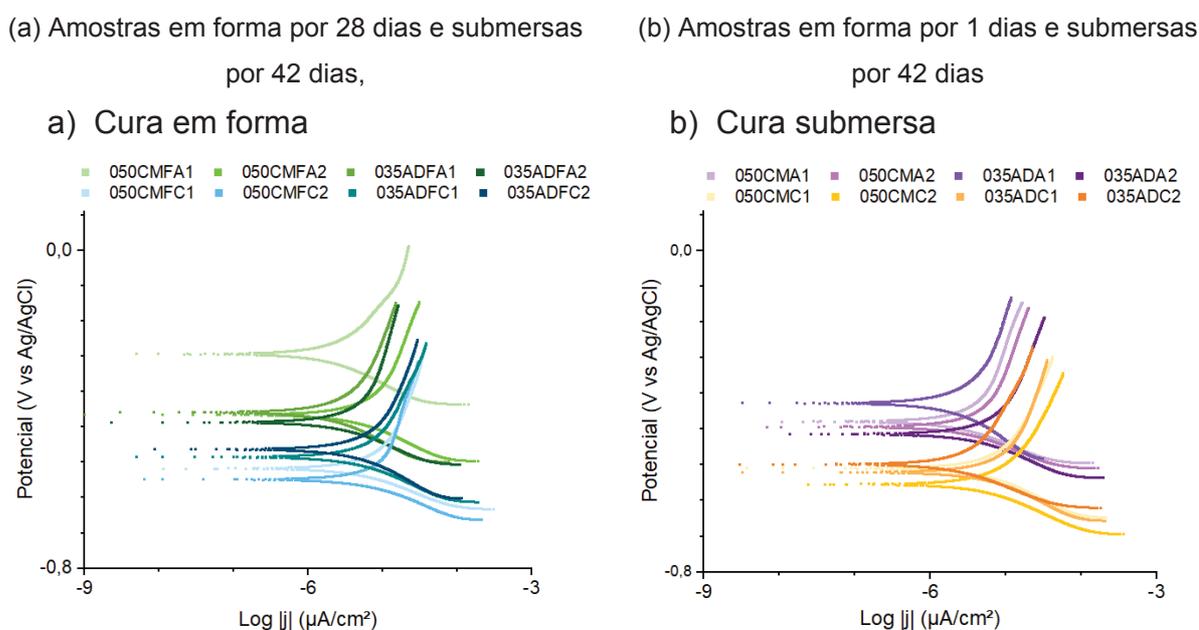
Como esperado, os grupos de amostras mostraram uma certa semelhança entre si. Amostras com relação a/c menor estão mais ao lado anódico do que as amostras com relação a/c mais alta. Isso é válido tanto para as imersas em água e hidróxido como nas em cloreto de sódio, corroborando o esperado. Com a diminuição da água na amostra, o meio externo tem menos chance de perturbar a interface entre a barra e a pasta de cimento.

Quando se analisa as amostras de forma geral, considerando apenas a solução de imersão, como esperado as amostras que foram imersas em água e cloreto de sódio estão mais ao lado catódico. Isso indica uma interferência do meio no resultado final, mesmo com o tempo reduzido de imersão.

#### 4.3.2.5 Comparação entre os tipos de cura

A Figura 38 exibe a comparação entre as amostras curadas em forma e submersas em solução após os 28 dias e as amostras que foram curadas em solução.

Figura 38 - Curvas de polarização ao final de 42 dias em solução para pastas curadas submersos



As amostras que passaram seu período de cura em submersão, tanto em água e hidróxido de cálcio como em água e cloreto de sódio, estão mais catódicas mostrando a interferência da cura em solução. Essa situação permitiu uma penetração/mistura das substâncias da amostra com as da solução de submersão resultando numa maior perturbação da interface barra/pasta de cimento.

Porém, a diferença não ocorre de forma significativa e não pode ser usada como parâmetro para afirmar que uma situação irá corroer mais que outra, considerando apenas as curvas de polarização. Elas permitem a determinação da

constante de Stern-Geary que é apenas uma das considerações para a determinação da Corrente de Corrosão e, em consequência, a Taxa de Corrosão.

Também é importante considerar que a constante de Stern-Geary muitas vezes é tratada como controversa como parâmetro para determinar a corrosão de aço galvanizados, principalmente pela forma como a corrosão galvânica acontece. Isso ocorre pela corrosão não ser uniforme neste caso, mas sim pontual. Angst e Büchler (2015) até desenvolveram um método de cálculo para esse tipo de corrosão, porém devido a dificuldade de aplicabilidade, grande parte da literatura ainda faz utilização da constante de Stern Geary.

Também Angst e Büchler (2015), para melhor conseguir contornar os problemas observados em relação a constante de Stern-Geary, foram revisados estudos experimentais e revisões teóricas sobre aços galvanizados e os impactos na Corrente de Corrosão. Percebeu que os dois grandes problemas apresentados por esse método, ao fim, se anulam e a equação continua adequada.

#### **4.3.3 Resistência de Polarização Linear**

A resistência de polarização foi determinada a partir da aplicação de uma corrente de  $\pm 20\text{mV}$  a partir do Potencial de Corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) de cada uma das amostras, o monitoramento foi semanal por 6 semanas (42 dias). O eletrodo de referência usado no ensaio é o Ag/AgCl sat. KCl. Os valores apresentados são absolutos e multiplicados pela área exposta da barra ( $31,91\text{ cm}^2$ ), garantindo que a comparação das amostras é válida (BERTOLINI *et al.*, 2004).

A determinação da resistência de polarização se dá pela inclinação da reta gerada a partir da corrente medida x potencial de eletrodo. Essa relação linear é válida apenas para pequenos potenciais aplicados, logo foram considerados os valores entre  $\pm 10\text{mV}$  (MATÍNEZ E ANDRADE, 2009; UHLIG, REVIE, 2008).

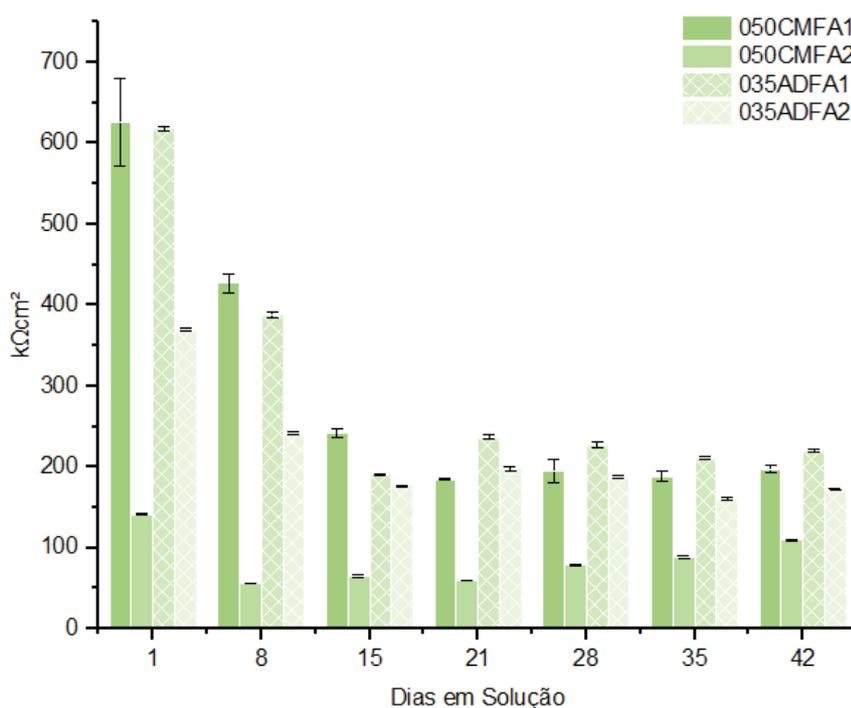
Vale ressaltar também que a resistência de polarização linear pode ser diretamente afetada pela matriz em que a barra está inserida, logo a mesma deve estar saturada para melhor condução da corrente (RILEM, 2003). A espessura e a composição da matriz devem ser levadas em consideração para a avaliação do potencial de corrosão. Para a matriz em questão (Muito úmido, submerso, zona de respingo, sala de cura e sem adição) RILEM (2000), diz que a interferência é de 50 – 200  $\Omega\cdot\text{m}$ .

Mesmo utilizando a faixa mais alta (200Ωm) como base para o cálculo a inferência seria de 0,16kΩcm<sup>2</sup> e foi desconsiderada para as avaliações.

#### 4.3.3.1 Cura em forma sem exposição à cloretos

A Figura 39 e Tabela 21 apresentam os valores para a resistência de polarização linear multiplicada pela área exposta, para as amostras produzidas com e sem aditivo e curadas por 28 dias em forma. As amostras foram monitoradas semanalmente por 6 semanas (42 dias) a partir da imersão em solução não agressiva (água + hidróxido de cálcio).

Figura 39 – Resistência de polarização ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 21 -Resumo do potencial de corrosão (RP) ao decorrer do tempo para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos

Amostra	Tempo de exposição (dias)	Resistência de Polarização Linear (kΩcm <sup>2</sup> )					
		1	2	3	Média	Desvio Padrão	CV (%)
050CMFA1	1	611	569	699	626	54,17	8,65
	8	411	441	428	427	12,28	2,88
	15	241	236	248	242	4,92	2,03

	21	186	183	185	185	1,25	0,68
	28	211	197	177	195	13,95	7,15
	35	194	191	179	188	6,48	3,45
	42	204	195	194	198	4,50	2,27
050CMFA2	1	140	141	142	141	0,82	0,58
	8	56	55	56	56	0,47	0,84
	15	63	67	66	65	1,70	2,62
	21	60	60	61	60	0,47	0,78
	28	78	79	79	79	0,47	0,59
	35	90	87	90	89	1,41	1,58
	42	110	109	111	110	0,82	0,75
035ADFA1	1	615	620	618	618	2,05	0,33
	8	384	389	391	388	2,94	0,76
	15	193	191	190	191	1,25	0,65
	21	239	240	233	237	3,09	1,30
	28	228	223	232	228	3,68	1,61
	35	212	211	208	210	1,70	0,81
	42	220	217	222	220	2,05	0,93
035ADFA2	1	370	368	371	369	1,25	0,34
	8	239	245	243	162	2,49	1,54
	15	175	179	176	119	1,70	1,43
	21	201	196	196	133	2,36	1,77
	28	189	190	185	127	2,16	1,70
	35	163	162	158	109	2,16	1,98
	42	174	171	172	116	1,25	1,08

Fonte: Elaborada pela autora

É possível perceber uma diminuição na resistência de potencial das amostras ao longo da primeira semana, alcançando uma estabilidade apenas a partir da segunda semana. Provavelmente, isso se deu por dois motivos, ambos ligados a saturação das amostras.

Conforme RILEM (2003) a amostra deve estar saturada para melhor aferição dos dados do ensaio. Assim, a confiança para os primeiros dois ensaios é baixa, já que elas estavam curando em forma e tinham disponibilidade apenas da água usada para a moldagem.

O segundo motivo tem ligação com a forma como a resistência de polarização é relacionada com a probabilidade de corrosão. Quanto mais alta a resistência de polarização, menor é a chance que aquele material sofra o processo de corrosão (CASCUDO, 1997). Acredita-se que, em 8 dias, não seria possível a penetração da água até a barra, principalmente nas amostras com relação água/cimento 0,35. Sabendo da necessidade de umidade para que o processo de corrosão ocorra, é possível associar os valores altos para resistência de polarização a uma barra que ainda não iniciou o processo de corrosão (DAVIS, 2000; UHLIG, REVIE, 2008).

Por fim, todas as amostras (exceto a 050CMFA2), apresentaram resultados semelhantes ao decorrer do tempo e também mostraram uma queda esperada. Isso



050CMFC1	1						
	8	104	124	256	161	67,44	41,89
	15	296	301	302	300	2,62	0,87
	21	273	264	263	267	4,5	1,69
	28	76	73	74	74	1,25	1,69
	35	66	68	69	68	1,25	1,84
	42	78	84	81	81	2,45	3,02
050CMFC2	1	247	252	252	252	2,36	0,94
	8	119	121	121	121	0,94	0,78
	15	129	132	128	129	1,7	1,32
	21	148	144	140	144	3,27	2,27
	28	97	95	93	95	1,63	1,72
	35	75	77	75	75	0,94	1,25
	42	73	86	78	78	5,35	6,86
035ADFC1	1	123	122	115	120	3,56	2,97
	8	74	74	71	73	1,41	1,93
	15	63	64	61	63	1,25	1,98
	21	59	62	60	60	1,25	2,08
	28	76	77	74	76	1,25	1,64
	35	79	86	84	83	2,94	3,54
	42	93	100	102	98	3,86	3,94
035ADFC2	1	142	145	144	144	1,25	0,87
	8	144	148	151	148	2,87	1,94
	15	77	77	77	77	0	0
	21	94	95	95	95	0,47	0,49
	28	92	93	92	92	0,47	0,51
	35	89	87	89	88	0,94	1,07
	42	117	119	119	118	0,94	0,8

Fonte: Elaborado pela autora

O primeiro ensaio da amostra 050CMFA1 apresentou problemas durante a execução e foi descartado, estando documentado no APÊNDICE A.

Durante a realização do ensaio percebeu-se uma disparidade entre amostras iguais, como 050CMFA1/050CMFA2 e 035ADFA1/035ADFA2 nos primeiros 21 dias, como mencionado em 4.3.1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, isso pode ser reflexo de uma falta de umidade/saturação na amostra, impedindo resultados mais assertivos. A maior proximidade entre as amostras começa a ocorrer de fato após o 5º ensaio, em que todos os resultados encontrados são em torno de 100kΩ.cm².

Essa diminuição provavelmente está ocorrendo pela penetração da água e do cloreto de sódio na amostra, perturbando a interface entre a barra e a pasta de cimento. Assim, resultando em valores menores de Resistencia de Polarização, evidenciando uma probabilidade de corrosão maior.

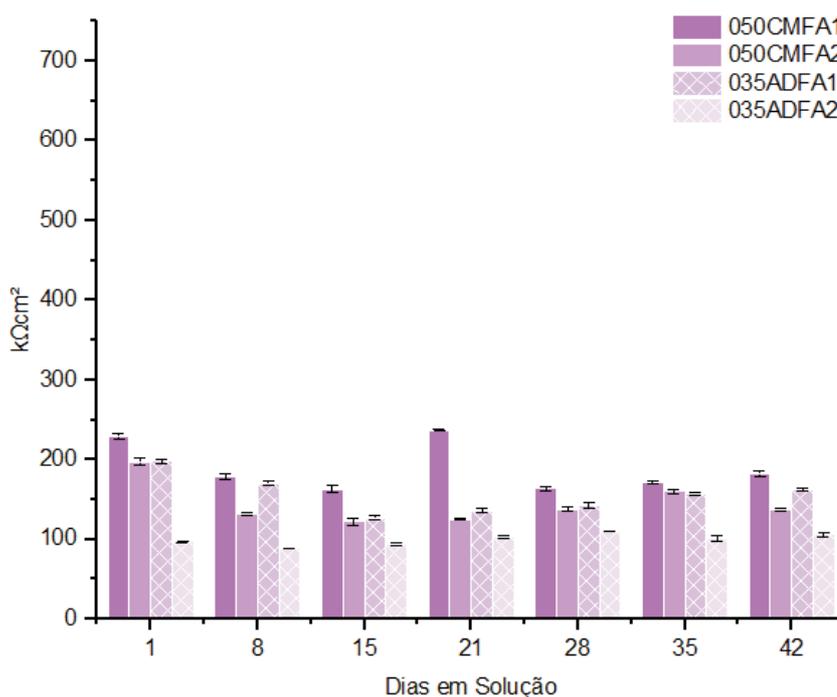
Quando comparadas as amostras com relação a/c 0,50 e 0,35, elas apontam resultados bem parecidos, mais uma vez evidenciando que a microestrutura da pasta não possui influência direta na probabilidade de corrosão até o final dos 42

dias de imersão. Mesmo com essa semelhança, é importante mencionar que a pasta com relação a/c 0,35 apresentou resistência de polarização mais altas, mas não a ponto de se tornar significativo numa avaliação geral.

#### 4.3.3.3 Cura submersa sem exposição à cloretos

O Gráfico 1 e a Tabela 23 apresenta a resistência de polarização linear multiplicada pela área exposta, para as amostras produzidas com e sem aditivo imersas em solução após 1 dia em forma. As amostras foram monitoradas semanalmente por 6 semanas (42 dias) a partir da imersão em solução não agressiva (água + hidróxido de cálcio).

Gráfico 1 - Resistência de polarização ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas sem exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 23 -Resumo do potencial de corrosão (RP) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas sem exposição à cloretos

Amostra	Tempo de exposição (dias)	Resistência de Polarização Linear (kΩcm²)					Desvio Padrão	CV (%)
		1	2	3	Média			
050CMA1	1	225	232	233	230	3,56	1,55	

	8	173	180	181	178	3,56	2,00
	15	168	164	157	163	4,55	2,79
	21	165	164	162	164	1,25	0,76
	28	168	162	163	164	2,62	1,6
	35	170	173	174	172	1,7	0,99
	42	177	185	185	182	3,77	2,07
050CMA2	1	203	197	192	197	4,5	2,28
	8	134	134	129	132	2,36	1,79
	15	126	124	115	122	4,78	3,92
	21	126	124	125	125	0,82	0,66
	28	138	139	133	137	2,62	1,91
	35	151	150	146	149	2,16	1,45
	42	152	157	154	154	2,05	1,33
035ADA1	1	197	196	202	198	2,62	1,32
	8	170	173	166	170	2,87	1,69
	15	126	131	126	128	2,36	1,84
	21	140	134	133	136	3,09	2,27
	28	145	144	137	142	3,56	2,51
	35	157	155	159	157	1,63	1,04
	42	162	162	166	163	1,89	1,16
035ADA2	1	97	98	95	97	1,25	1,29
	8	90	89	89	89	0,47	0,53
	15	97	92	94	94	2,05	2,18
	21	105	103	102	103	1,25	1,21
	28	110	111	110	110	0,47	0,43
	35	97	100	105	101	3,3	3,27
	42	102	107	109	106	2,94	2,77

Fonte: Elaborada pela autora

Diferentemente dos casos em que a saturação da amostra trazia uma variabilidade maior, esses casos o nível de água/saturação não é um problema já que a amostra foi colocada submersa 1 dias após a moldagem, isso se reflete diretamente nos ensaios que apresentam uma estabilidade, tanto olhando as amostras relação a/c 0,50 quanto as com relação 0,35.

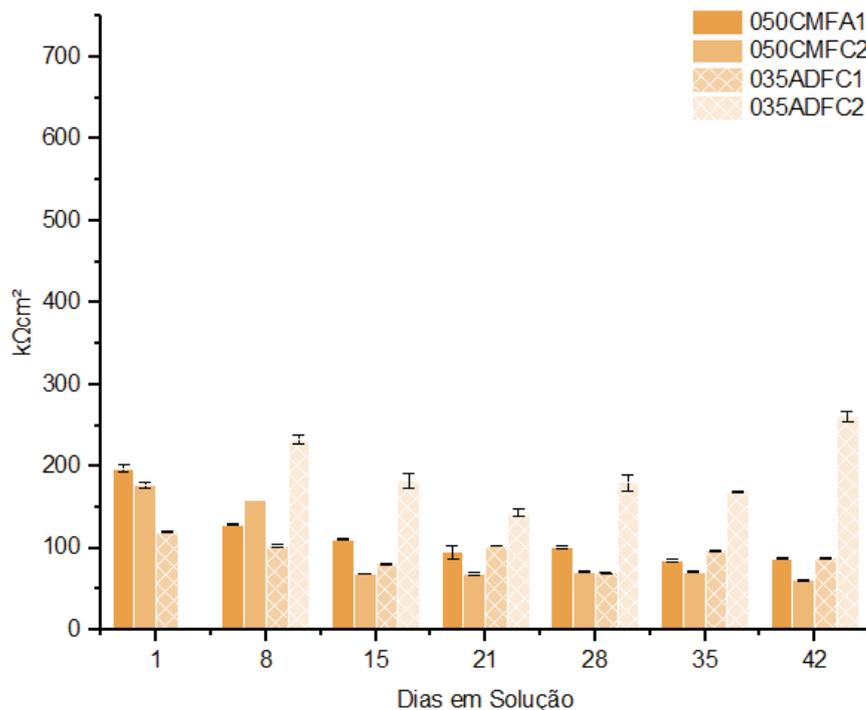
Não se percebeu uma perda de resistência de polarização em nenhuma das amostras. Evidencia-se assim que a umidade constante na amostra aumenta a perturbação na interface entre a barra e a pasta de cimento, fazendo com que os valores de resistência de potencial sejam mais baixos, mesmo sendo potenciais considerados altos quando comparados a aços CA-50.

Em relação à composição e microestrutura da pasta de cimento, não foi possível determinar de forma significativa se resultou em impactos no ganho ou perda de resistência de polarização, já que os resultados durante os 42 dias de monitoramento foram semelhantes, com pequenas variações que podem decorrer da variabilidade das amostras (pasta/barra/galvanização).

#### 4.3.3.4 Cura submersa com exposição à cloretos

A Figura 41 e Tabela 24 -Resumo do potencial de corrosão (RP) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos apresentam a resistência de polarização linear multiplicada pela área exposta, para as amostras produzidas com e sem aditivo imersas em solução após 1 dia em forma. As amostras foram monitoradas semanalmente por 6 semanas (42 dias) a partir da imersão em solução agressiva (água + cloreto de sódio).

Figura 41 - Resistência de polarização ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 24 -Resumo do potencial de corrosão (RP) ao decorrer do tempo para pastas curadas submersas com exposição à cloretos

Amostra	Tempo de exposição (dias)	Resistência de Polarização Linear (kΩcm²)					
		1	2	3	Média	Desvio Padrão	CV (%)
050CMC1	1	203	197	192	197	4,5	2,28
	8	130	129	129	129	0,47	0,36
	15	112	110	110	111	0,94	0,85
	21	85	95	103	94	7,36	7,83
	28	79	82	82	81	1,41	1,74
	35	84	87	84	85	1,41	1,66

	42	87	86	88	87	0,82	0,94
050CMC2	1	180	178	173	177	2,94	1,66
	8	158	158	158	158	0	0,00
	15	68	69	69	69	0,47	0,68
	21	67	69	71	69	1,63	2,36
	28	70	71	72	71	0,82	1,15
	35	72	72	70	71	0,94	1,32
	42	60	60	62	61	0,94	1,54
035ADC1	1	120	122	120	121	0,94	0,78
	8	105	102	103	103	1,25	1,21
	15	80	82	82	81	0,94	1,16
	21	76	75	77	76	0,82	1,08
	28	70	69	69	69	0,47	0,68
	35	98	97	97	97	0,47	0,48
	42	86	88	89	88	1,25	1,42
035ADC2	1						
	8	265	265	252	261	6,13	2,35
	15	239	234	226	233	5,35	2,30
	21	170	186	190	182	8,64	4,75
	28	140	150	140	143	4,71	3,29
	35	189	184	166	180	9,88	5,49
	42	171	168	169	169	1,25	0,74

Fonte: Elaborada pela autora

A amostra 035ADC2 no primeiro dia de medição apresentou problemas no ensaio e foi descartada da análise, os resultados podem ser conferidos no APÊNDICE A.

Verifica-se um comportamento semelhante entre as 3 primeiras amostras (050CMC1, 050CMC2 e 035ADC1) e durante o tempo observado. Provavelmente esse comportamento se dá pela presença de saturação/umidade na barra que faz com que os resultados sejam mais assertivos.

A amostra A35AFC2 acaba se destoando do restante das amostras, apresentando resistência de polarização mais altos e que sinalizam uma interface com menor chance de corrosão do que nas outras. Porém, não é possível identificar uma causa exata para esses resultados, já que na maioria dos ensaios observados, as amostras independentemente da sua composição microestrutural têm resultados semelhantes.

Uma especulação pode ser a variabilidade que nas amostras, como a barra ou a galvanização. Uma barra com uma espessura de galvanização maior resultará resultados mais positivos, como os apresentados pela barra 035ADC2.

De forma geral, os resultados são constantes ao longo do tempo de monitoramento. Ao fim dos 42 dias de ensaio, a variabilidade entre as amostras com relação a/c 0,50 e 0,35 fica em torno de 88 e 61, inclusive tendo amostras com pasta

de cimento diferente obtendo resultados semelhantes. Logo, não sendo possível determinar a influência da micro estrutura no melhor ou pior desempenho em relação a resistência de polarização.

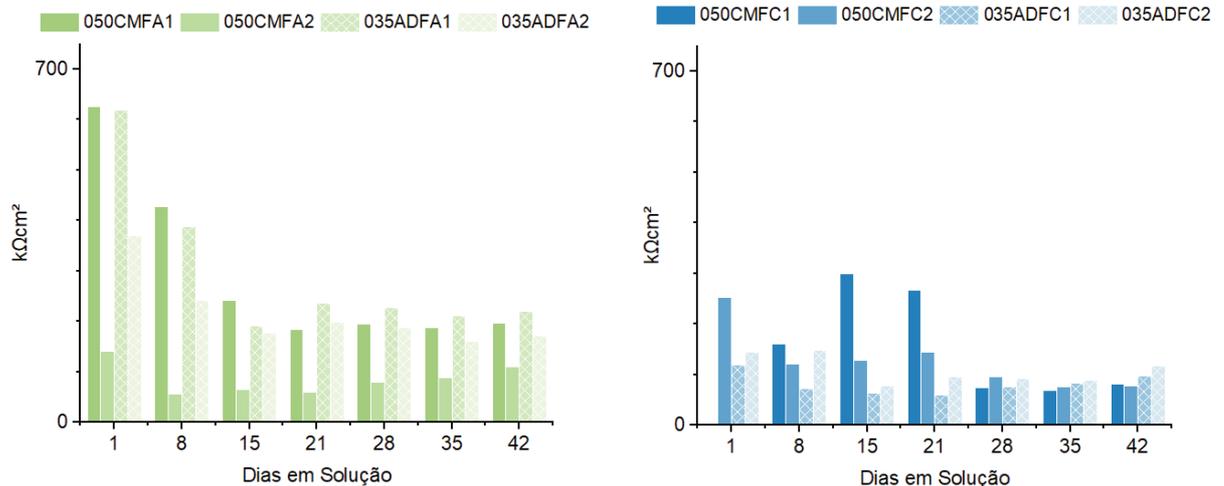
#### 4.3.3.5 Comparação entre os tipos de cura

A Figura 42 apresenta as quatro situações estudadas durante esse trabalho, corpos de prova moldados com aditivo (a/c 0,35) e sem (a/c 0,50), exposto à ataque de cloretos ou não, após a cura (28 dias em forma) ou durante a cura (1 dia em forma).

Figura 42 – Comparação da Resistência de Polarização (RP)

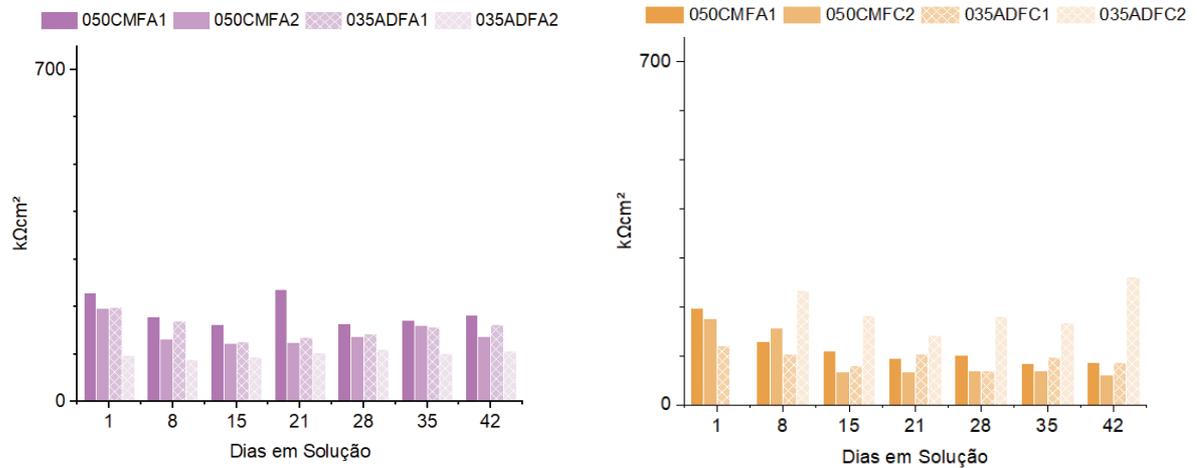
(a) curadas em forma imersas em  $H_2O+Ca(OH)_2$ ,

(b) curadas em forma imersas em  $H_2O+NaCl$



(c) curadas imersas em  $H_2O+Ca(OH)_2$

(d) curadas em imersas em  $H_2O+NaCl$



Fonte: Elaborada pela autora

Os maiores valores para a resistência de polarização linear ocorreram nas amostras que foram curadas primeiramente em forma e depois submetidas a solução. Isso ocorreu tanto no ambiente agressivo como no não agressivo, por dois motivos, sendo ambos deles ligados as suas condições de cura.

O primeiro deles se dá pela exposição do corpo de prova a umidade e/ou agentes agressivos após praticamente o processo de cura já estar finalizado. O cimento CP IV-RS 32 utilizado neste estudo já possui certa estabilidade nas reações cimentícias aos 28 dias, mudando pouco suas características. Logo, a solução quando em contato com a matriz cimentícia pode ter apresentado dificuldade de penetrar pelos poros capilares, resultando em uma perturbação menor da interface entre a barra e a pasta de cimento.

A outra razão é pela quantidade reduzida de poros. A presença de poros está diretamente ligada à água presente durante o processo de cura. Quando ocorre uma cura confinada, sabe-se que não se desenvolve uma transferência de água do interior da amostra para o ambiente externo e ambas, diminuindo a possibilidade de existência de poros pela perda de água e a não hidratação do cimento. Também fundamentada que uma relação mínima de a/c necessária para a hidratação total é 0,40, relação esse muito próxima as usadas nas amostras.

Já as amostras curadas na solução apresentaram valores mais baixos e mais constantes, pois durante seu processo de cura tanto a água quanto o cloreto de sódio foram se instalando nos poros da matriz. Isso pode ter levado à perturbação da interface barra/pasta de cimento, explicando os valores mais baixos.

Quando comparadas as amostras ao final dos 42 dias em imersão, as curadas em forma por 28 dias e com relação a/c 0,50, as expostas à agressão por cloretos obtiveram 26% e 61% do valor das curadas em água e hidróxido de cálcio. Já as com relação a/c apresentaram valores entre 16% e 55% menores quando expostas a cloretos e comparadas as não expostas.

Para as amostras curadas em formas por 1 dia e expostas a 42 dias de submersão, as amostras com relação a/c 0,50 e exposição a cloretos tiveram valores de resistência de polarização linear entre 66% e 43% menores do que as sem exposição. Já as com relação a/c 0,35 foram entre 17% e 46% menores.

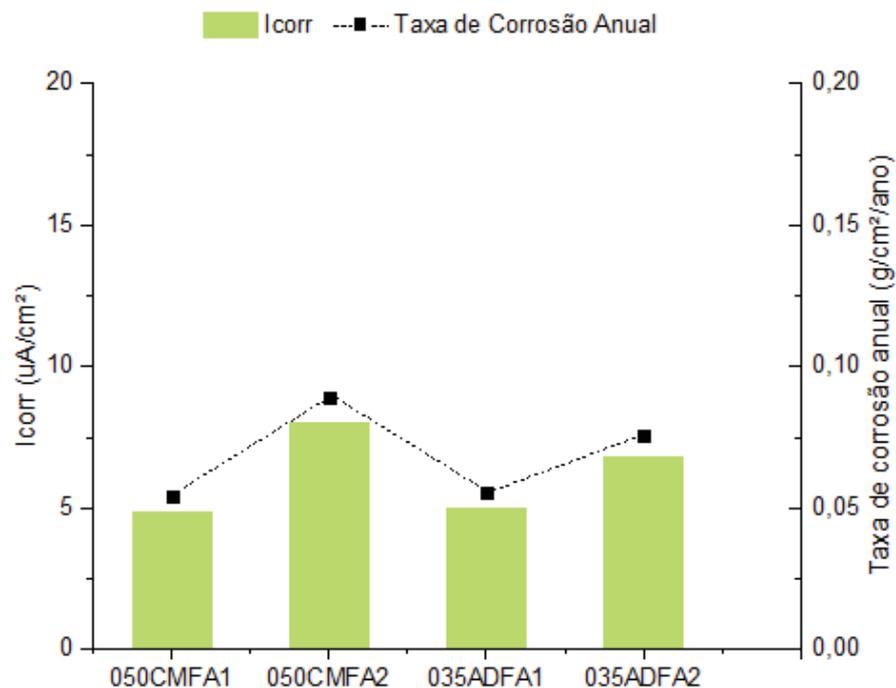
#### 4.3.4 Corrente de Corrosão e Taxa de Corrosão

Nesse item serão apresentados os dados para corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) e a Taxa de corrosão anual. Divido por tipo de cura e soluções de imersão. Como referência será usada para as comparações será usada a informação técnica disponibilizada pela empresa, considerando que a camada de galvanização possui um peso de  $956,05\text{g/m}^2$ . Os resultados de perda de massa serão apresentados em  $\text{g/cm}^2$ , logo o valor de referência de galvanização será de  $0,095605\text{ g/cm}^2$ .

##### 4.3.4.1 Cura em forma sem exposição posterior à cloretos

A Figura 43 e a Tabela 25, apresentam os resultados para corrente de corrosão e taxa de corrosão para as amostras produzidas com relação a/c 0,5 e 0,35, curadas em forma por 28 dias em forma e posteriormente expostas à água e hidróxido de sódio por 42 dias.

Figura 43 - Variação do  $I_{corr}$  e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 25 – Resumo da variação do  $I_{corr}$  e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas em forma sem exposição à cloretos

<b>Amostra</b>	<b><math>I_{corr}</math> (<math>\mu A/cm^2</math>)</b>	<b>Taxa de corrosão (<math>g/cm^2/ano</math>)</b>
050CMFA1	4,867	0,054370
050CMFA2	7,994	0,089293
035ADFA1	4,970	0,055510
035ADFA2	6,793	0,075883

Fonte: Elaborada pela autora

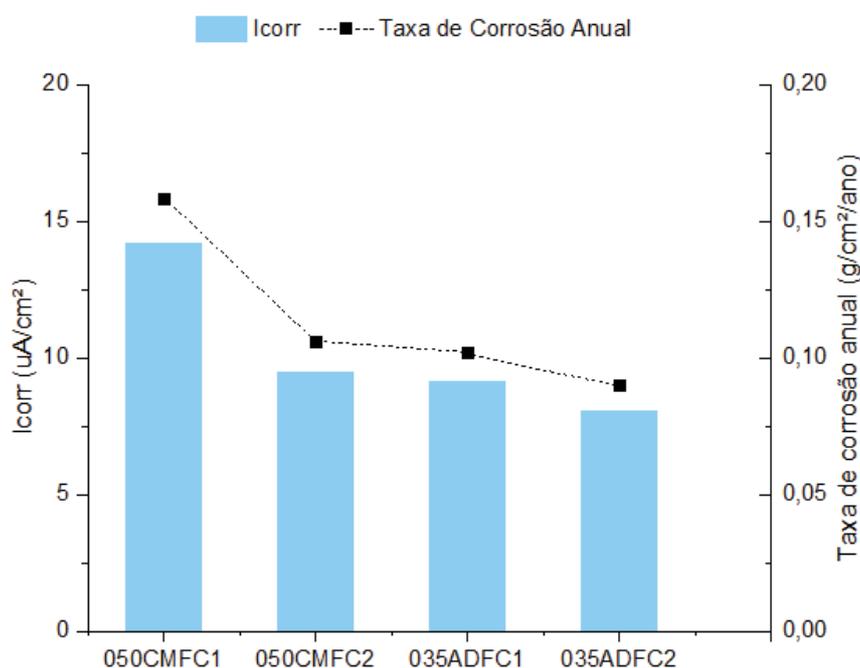
As amostras mostraram uma Taxa de corrosão anual variando entre 0,054g/cm<sup>2</sup>/ano e 0,089g/cm<sup>2</sup>/ano, valores abaixo do apresentado para a galvanização da barra que é de 0,095g/cm<sup>2</sup>.

Porém esses valores representam que a perda da camada de galvanização poderia ocorrer entre 13 meses e 23 meses, independentemente da microestrutura da matriz. Logo quando se considera uma durabilidade das soluções de solo grampeada em torno de 50 anos, a diferença entre os resultados é de menos de 1%, sendo pouco significativa nesse caso.

#### 4.3.4.2 Cura em forma com exposição posterior à cloretos

A Figura 44 e a Tabela 26, apresentam os resultados para corrente de corrosão e taxa de corrosão para as amostras produzidas com relação a/c 0,5 e 0,35, curadas em forma por 28 dias em forma e posteriormente expostas à água e cloreto de sódio por 42 dias.

Figura 44 - Variação do  $I_{corr}$  e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas em forma com exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 26 – Resumo da variação do  $I_{corr}$  e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas em forma com exposição à cloretos

Amostra	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Taxa de corrosão ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$ )
050CMFC1	14,184	0,158439
050CMFC2	9,510	0,106226
035ADFC1	9,138	0,102068
035ADFC2	8,054	0,089965

Fonte: Elaborada pela autora

A amostra 050CMFC1, apresentou uma taxa de corrosão anual variando entre 1,3 e 1,75 vezes a taxa das demais. Esse comportamento não foi observado em nenhum outro ensaio da amostra, podendo ser proveniente de uma possível falha na galvanização, fazendo com que a corrosão se inicie de forma acelerada. Quando considerada as outras três amostras, percebe-se uma pequena variação de taxa de corrosão anual, porém insuficiente para se dizer que a composição da pasta teve algum efeito, tanto para barrar como para acelerar a corrosão.

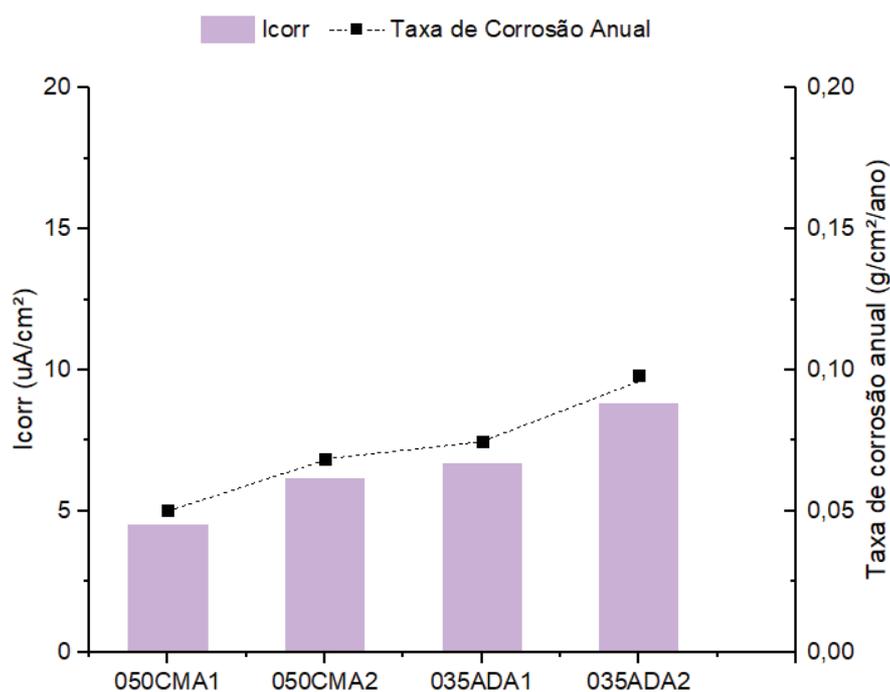
Quando comparada com a taxa de galvanização presente na amostra com a taxa de corrosão anual ensaiada, pode-se dizer que ela duraria entre 7 meses e 13 meses, tempo também considerada baixo em relação a durabilidade que deve ser de 50 anos. Porém é importante lembrar que o ambiente utilizado foi de

agressividade extrema e também pouco comum quando se fala em solos, e que a concentração de cloreto de sódio utilizada foi para que fosse possível que a penetração ocorresse de forma mais rápida.

#### 4.3.4.3 Cura submersa sem exposição à cloretos

A Figura 44 e a Tabela 27, apresentam os resultados para corrente de corrosão e taxa de corrosão para as amostras produzidas com relação a/c 0,5 e 0,35, curadas em forma por 1 dia em forma e posteriormente expostas à água e hidróxido de sódio por 42 dias.

Figura 45 - Variação do  $I_{corr}$  e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas submersas e sem exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 27 – Resumo da variação do  $I_{corr}$  e da Taxa de Corrosão anual para pastas submersas e sem exposição à cloretos

<b>Amostra</b>	<b><math>I_{corr}</math> (<math>\mu A/cm^2</math>)</b>	<b>Taxa de corrosão (<math>g/cm^2/ano</math>)</b>
050CMA1	4,527	0,050564
050CMA2	6,141	0,068596
035ADA1	6,687	0,074689
035ADA2	8,801	0,098306

Fonte: Elaborada pela autora

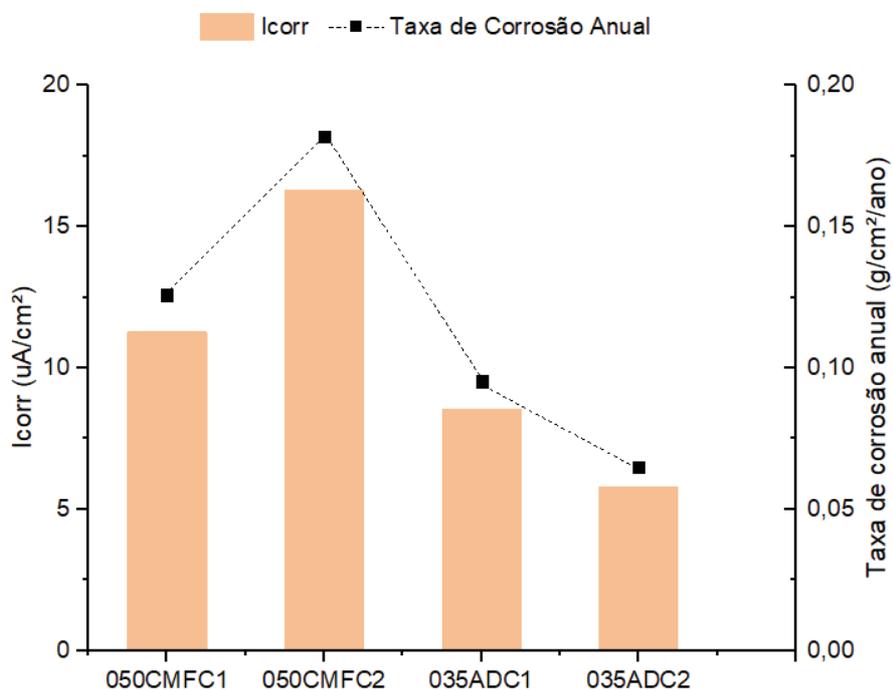
Os resultados apresentados pelas amostras variam entre 0,05g/cm<sup>2</sup>/ano e 0,09g/cm<sup>2</sup>/ano. As amostras produzidas com relação a/c 0,50 mostrando melhor desempenho do que as produzidas com 0,35, tendo uma taxa de corrosão até 50% menor. Evidenciando que uma quantidade menor de poros da matriz, quando em ambiente não agressivo, não confere maior proteção contra a corrosão.

Quando as taxas de corrosão anuais aferidas para as amostras são comparadas com a taxa de zinco da barra (0,095g/cm<sup>2</sup>), percebe-se que o tempo de duração da camada de galvanização será entre 12 e 23 meses.

#### 4.3.4.4 Cura submersa com exposição à cloretos

A Figura 46 e a Tabela 28, apresentam os resultados para corrente de corrosão e taxa de corrosão para as amostras produzidas com relação a/c 0,5 e 0,35, curadas em forma por 1 dia em forma e posteriormente expostas à água e cloreto de sódio por 42 dias.

Figura 46 - Variação do  $I_{corr}$  e da Taxa de Corrosão anual para pastas curadas submersas e com exposição à cloretos



Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 28 - Resumo da variação do  $I_{corr}$  e da Taxa de Corrosão anual para pastas submersas e com exposição à cloretos

Amostra	$I_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Taxa de corrosão ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$ )
050CMFC1	11,265	0,12583
050CMFC2	16,286	0,181913
035ADC1	8,533	0,09531
035ADC2	5,807	0,06487

Fonte: Elaborada pela autora

As taxas de corrosão para as amostras com relação a/c 0,50 quando comparadas as taxas de corrosão das amostras com a/c 0,35 se mostram entre 64% e 24% menores, evidenciando que a quantidade de poros e a composição da matriz cimentícia são muito relevantes quando as amostras são expostas a cloreto, principalmente durante a sua cura.

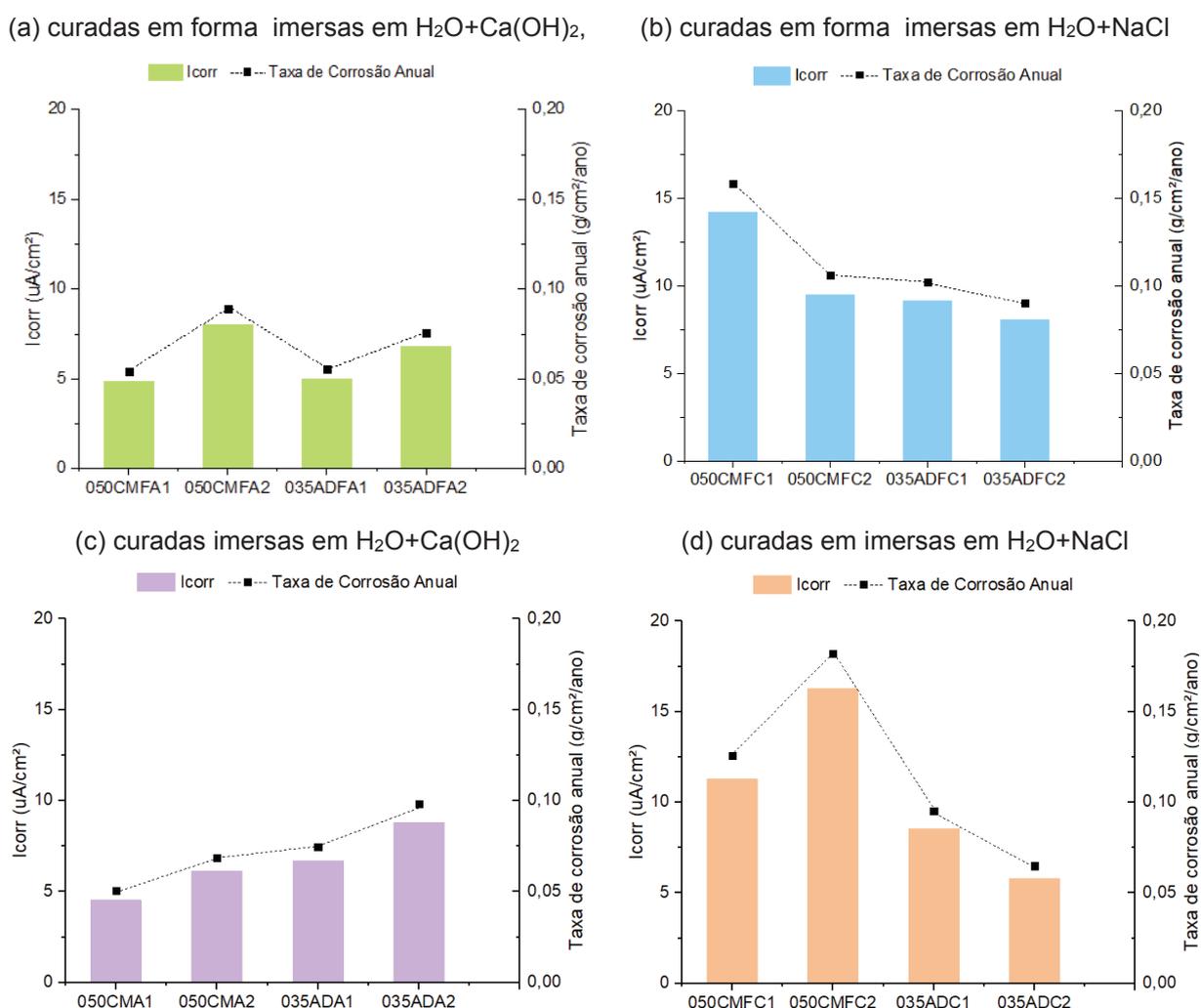
Quando comparadas com a taxa de galvanização da barra percebe-se que o zinco do processo de galvanização, com concentração de  $0,095\text{g}/\text{cm}^2$ , seria consumido entre 6 meses e 17 meses. Novamente um tempo pequeno quando comparado com a durabilidade da estrutura, porém como já citado em 4.3.4.2 Cura em forma com exposição posterior à cloretos, essa concentração de cloretos

normalmente não é encontrada em solos e foi utilizada para aceleração do processo de corrosão.

#### 4.3.4.5 Comparação entre os tipos de cura

A Figura 47 apresenta uma visão geral de todos os valores de Corrente de Corrosão e Taxa de Corrosão anual, para que assim se possa fazer uma análise comparativa.

Figura 47 – Comparação do Icorr



Fonte: Elaborada pela autora

Como esperado as amostras que não foram submetidas a cloretos obtiveram melhores resultados em relação a conservação da barra contra a corrosão. Para esses casos espera-se uma corrosão entre  $0,0505g/cm^2/ano$  e  $0,089g/cm^2/ano$ , considerando que esse valor mais alto foi obtido de uma amostra com valores

controversos e que podem ser resultado de uma distorção gerada por uma corrosão galvânica.

Comparando as amostras curadas em forma por 28 dias e submersas em solução por 42 dias, percebe-se que as com relação a/c 0,50 e submetidas a ambiente agressivo tem a probabilidade de corroer entre 2,90 e 1,20 vezes mais do que as que não foram submetidas. Com a mesma condição de cura, porém produzidas com relação a/c 0,35 e expostas a cloreto tem a probabilidade de corroer entre 1,20 e 1,85 vezes maior que as em ambiente não agressivo

Dessa forma se evidencia que quando o ambiente é agressivo as amostras com relação a/c 0,35 são 157% mais eficientes do que as produzidas com relação a/c 0,50.

Quando contrapostas as amostras curadas por 1 dia em forma e submersas em solução por 42 dias, a tendencia de corrosão das pastas com relação a/c 0,50 quando em cloreto de sódio é de 3,60 vezes e 1,84 vezes do que as que não estavam em ambiente agressivo. Já as amostras produzidas com relação a/c 0,35 quando expostas a cloreto provavelmente irão corroer na mesma velocidade ou no máximo 1,70 vezes mais rápido do que as não expostas.

Assim pode-se afirmar que as amostras com relação a/c 0,35 e submetidas a ambiente corrosivo desde o início da sua corrosão podem atingir uma eficiência de até 360% maior que as com relação a/c 0,50.

Dessa forma é possível afirmar que os resultados obtidos com relação água/cimento menor foram satisfatório e apresentam uma boa, proteção contra a corrosão em ambientes agressivos.

Entretendo deve ser levado em consideração que o ensaio foi realizado ao final dos 42 dias submersão, logo com maiores tempos de penetração os valores aqui aferidos podem ser diferentes

## 5 CONCLUSÕES

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a resistência à corrosão de grampos galvanizados, utilizados para obras de contenção em solo grampeado, em função do material de injeção, das condições de cura e da presença de cloretos, incluindo o estimativa da durabilidade da camada de galvanização das barras GW ST 520/690 2MM utilizadas em soluções de solo grampeado. Para isso foram realizados ensaios ligados a microestrutura da passa e ensaios eletroquímicos simulando um ambiente neutro e outro agressivo.

Com relação ao tempo de escoamento da pasta, parâmetro indispensável para a escolha da pasta teste, foram realizadas diversas tentativas no funil de Marsh, até que fosse possível encontrar um tempo mais próximo de passagem pelo funil quando comparada com a pasta teste (a/c 0,5 e sem aditivo), que foi de 145s. A pasta de cimento que mais se aproximou em tempo da pasta referência foi a pasta moldada com a/c 0,35 e aditivo Glenium 51® (0,5% da massa do cimento), obtendo um tempo de passagem de 170s.

Levando em consideração fatores importantes para a pasta quando se trata de misturas com a/c altos foram avaliados também outros parâmetros como: fissuração, absorção de água por capilaridade, absorção de total, índice de vazios e resistência a compressão. Nesses casos as pastas com relação a/c 0,35 se mostraram com menor número de poros, menor absorção, menor fissuração e maior resistência a compressão que as produzidas com relação a/c 0,50, tanto quando curadas em forma ou submersas.

A importância da avaliação desses parâmetros se dá pela forma como os agentes agressivos normalmente penetram na pasta e alcançam a barra, então diante dos resultados melhores para a pasta com relação a/c 0,35 espera-se que em relação a corrosão ela tenha desempenho melhor que a com relação a/c 0,50.

A cerca da resistência a compressão, o resultado não se faz tão relevante quanto os outros ensaios realizados com a pasta no estado endurecido, já que normalmente a ruptura ocorre ou no solo ou na interface entre a pasta e solo (por cisalhamento). Porém o ensaio foi ainda realizado, assim percebeu-se que como o esperado a pasta com relação a/c 0,50 obteve resultados até 10% abaixo dos vistos na pasta com relação a/c 0,35.

Todos os resultados obtidos em relação a pasta em estado endurecido respeitaram a lei de Abrams, que diz que quanto menor a relação a/c, menor a porosidade e maior a resistência a compressão.

Para a avaliação da corrosão foram levados em consideração os ensaios eletroquímicos, sendo os de curvas de polarização e resistência de polarização linear são complementares e serão incorporadas as conclusões referentes a taxa de corrosão.

O potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), ele se mostra a tendência que a amostra tem de corroer. Percebeu-se que quando comparados pastas com diferentes relações a/c, curadas de mesma maneira e mesmo ambiente de exposição, a microestrutura da pasta não gerou grandes diferenças de resultados.

Quando encontrados resultados que destoavam da maioria, pressupõe-se que é devido as diferenças no processo de galvanização da amostra, que desencadeiam a corrosão galvânica, mostrando assim valores mais baixos quando se trata de  $E_{corr}$ , indicativos de uma maior probabilidade de corrosão.

Para comparações em amostras com mesma relação a/c, mesma cura e variando apenas o ambiente de exposição, foi possível perceber que as amostras com relação a/c 0,35 curadas em cloreto quando comparadas com as curadas em ambiente não agressivo, apresentavam melhores resultados, do que a comparação quando feita com as amostras com a/c 0,50.

Todavia é importante avaliar que esse resultado não deve ser analisado de forma isolada, já que ele apenas reflete um resultado qualitativo, dessa maneira outros ensaios foram realizados para maior segurança.

Para a taxa de corrosão foram observadas as mesmas características presentes na avaliação de  $E_{corr}$ , onde pastas com relação a/c diferentes, porem com a mesma cura e mesma solução de imersão não apresentaram diferenças significativas em relação a taxa de corrosão anual, mostrando novamente que a composição da pasta não gera grandes diferenças.

Para amostras que destoavam a taxa de corrosão anual das restantes, atribui-se esse resultado a variabilidade das amostras (barra / qualidade da galvanização / espessura da galvanização), não sendo possível determinar se os valores são confiáveis ou não.

A durabilidade da camada de galvanização das amostras com relação a/c 0,50 expostas a cloreto após a cura variou entre 6 meses e 1 anos, para exposição a

cloretos e não exposição. Já as amostras com relação a/c 0,35 os valores estão entre 1 ano e 2 anos, para amostras expostas a cloretos e não expostas. Resultado esse corroborado pela verificação de penetração de cloretos, onde foram aferidas as profundidades de 7mm e 2mm, respectivamente.

Para as pastas expostas a cloretos desde o início da sua cura percebe-se que a relação água cimento foi muito importante para melhor desempenho. Com relação a/c 0,50 os valores de duração da camada de galvanização ficaram de 2 anos para as imersas em água hidróxido de cálcio e 6 meses para as imersas em cloreto. Já as amostras com relação a/c 0,35 apresentaram durabilidade para a camada de galvanização de próxima de 1 ano para ambos os casos. Resultados também encontrados nos ensaios de penetração de cloretos, onde se observou que os cloretos atingiram a barra de forma praticamente igual para ambas as relações.

Dessa forma pode-se concluir que a composição da pasta de cimento e a diminuição da sua relação a/c é mais vantajosa quando o ambiente em questão é agressivo, sendo perceptível o melhor desempenho da pasta com relação a/c 0,35 em contraponto com a a/c 0,50. Quando o ambiente não possui um grau de agressividade alto não foi possível determinar a relevância da composição da pasta para a proteção contra a corrosão.

Para sistemas onde o ambiente não é agressivo, mas que no futuro pode torna-se é possível afirmar que amostras com relação a/c 0,35 obtiveram resultados mais satisfatórios que as com a/c 0,50.

### 5.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Devido À complexidade do assunto, o tempo limitado que um estudo de mestrado proporciona, também como a diversidade de possibilidade de análises em relação a agressividade do solo e a composição da pasta nos trazem. Segue algumas propostas de trabalhos futuros para dar seguimento no assunto:

- i. Estudar a possibilidade de adição de fillers ou adições minerais na pasta de cimento com o intuito da redução da porosidade da pasta.
- ii. Realizar ensaios com concentrações menores de cloreto de sódio para que seja possível abranger mais situações de solo

- iii. Combinar outras variáveis ligadas a agressividade do solo para entender de forma mais completa o ambiente em que a barra está inserida.
- iv. Realizar estudo da barra em relação a corrosão para que melhor se possa estimar o tempo de durabilidade como um todo da estrutura.
- v. Produzir pastas com outros tipos de cimento, aditivos e/ou relação a/c.
- vi. Realizar a análise macro e micrográfica das barras.
- vii. Realizar tratamento estatístico dos resultados de análise de corrosão.

## REFERÊNCIAS

AGULLÓ, L., TORALLES-CARBONARI, B., GETTU, R., AGUADO, A. Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer- A study based on the Marsh cone test, **Materials and Structures**, v. 32, p. 479-485, 1999.

AÍTCIN, P. C. **Concreto de alto-desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000.

ALVAREDO, A. M.; WITTMANN, F. H. **Shrinkage and cracking of normal and high performance concrete**. Freiburg: Aedification Publishers, 1995.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M.; CASTRO, P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. **Cement and Concrete Research** 30, 2000, p. 1047-1055.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI concrete terminology**. Farmington Hills: ACI, 2013. Disponível em: [www.concrete.org/TEchnical/CCT/ACI-Terminology.aspx](http://www.concrete.org/TEchnical/CCT/ACI-Terminology.aspx). Acesso em: 24 jul. 2020.

ANDRADE, M. C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: Pini, 1992.

ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. **Corrosion Science** 53, 2011, p. 1451-1464.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768**: aditivos para concreto de cimento Portland – parte 1 – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16607**: cimento Portland – determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697**: cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5629**: tirantes ancorados no terreno – projeto e execução. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7681-3**: calda de cimento para injeção – parte 3 – determinação dos índices de exsudação e expansão – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7681-4**: calda de cimento para injeção – parte 4 – determinação da resistência à compressão – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C876**: standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G59-97**: Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G01-89**: standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical methods**: fundamentals and applications. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto**: ciência e tecnologia. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 185-232.

BIRNIN-YAURI, U. A.; GLASSER, F. P. Friedel's salt,  $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{Cl}, \text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ : its solid solutions and their role in chloride binding. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 1713-1723, 1998.

BROOKFIELD. Manual de operação viscosímetro modelo RVDV-II+PRO. Disponível em , acesso em 13/01/2010.

BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of steel in concrete**: understanding, investigation and repair. 2. ed. London: Taylor & Francis, 2007.

BUCHANAN, R. A.; STANSBURY, E. E. **Handbook of Environmental Degradation of Materials**. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2012. Documento em PDF.

BUCHER, H. R. E. **Estimativa da resistência à compressão de concretos executados com cimento nacional em função da relação a/c**. São Paulo: ABCP, 1989.

BYRNE, R. J. *et al.* Manual for design and construction monitoring of soil nail wall. **Report n. FHWA-AS-96-069R**, Washington, 1998.

CAMÕES A. Influência do superplastificante nos parâmetros reológicos do betão fresco. **Engenharia Civil**, Universidade do Minho, v. 24, p. 29-43, 2005.

CAMPITELI, V. C. **Porosidade do concreto**. São Paulo: Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, 1987.

CARINO, N. J. Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structures. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 13, p. 96-106, 2000.

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

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 24.

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p.381-413.

CLOUTERRE. **Soil nailing recommendations** – for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing. Washington: French National Research, 1991.

COLE, I. S e MARNEY, D. The Science of Pipe Corrosion: A Review of the Literature on the Corrosion of Ferrous Metals in Soils. **Corrosion Science**, v. 56, p.5–16, 2012.

CUNAT, P. J. Corrosion Resistance of Stainless Steels in Soils and in Concrete. *In*: Plenary Days of the Committee on the Study of Pipe Corrosion. Ceacor, Biarritz, 2001.

DAVIS, J. R. **Corrosion: understanding the basics**. EUA: ASM International, 2000.

DIAMOND, S. Effects of two danish flyashes on alkali contents of pore solutions of cement-flyash pastes. **Cement and Concret Research**, v.11, n. 3, p. 383-394, 1981.

DINIZ, J. Z. F.; FERNANDES, J. F.; KUPPERMAN, S. C. Retração e fluência. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011. p.185-232.

DRUTA, C. **Tensile strength and bonding characteristics of self-compacting concrete**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia) – Departamento de Ciência da Engenharia, Louisiana State University (LSU), Baton Rouge, 2003.

ELSENER, B.; ROSSI, A. Passivation of steel and stainless steel in alkaline media simulating concrete. *In*: **Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry**, [s. l.], 365-375, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13772-2>. Acesso em: 07 jul. 2021.

FIGUEIREDO, E. P.; ARAÚJO NETO, G. N.; ALMEIDA, P. A. O. Monitoração de estruturas de concreto. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2011. p.1233-1282.

GENTIL, V. **Corrosão**. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.

GEOGUIDE 7. **Guide to soil nail design and construction**. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 2017.

GIROTTI, L. S.; BARBOSA, M. P.; MACIEL, G. F. Avaliação do comportamento reológico na retração e na fissuração de argamassas de concreto de auto adensável. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 1, p. 24-52, 2014.

GRUB, J.A.; BLUNT, J.; OSTERTAG, C.P.; DEVINE, T.M. Effect of steel microfibers on corrosion of steel reinforcing bars. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1115-1126, 2007.

HARTMANN, C. T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinado a concretos de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2002.

HASPARYK, N. P. *et al.* Deformações por retração e fluência. *In*: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto – ensino, pesquisa e realizações**. v. 2. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 655-665.

HELENE, P. **Corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.

JAYAWICKRAMA, P. W. *et al.* **Non-Destructive evaluation of installed soil nails**. Texas: Texas Tech University, 2007.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement and Concrete Aggregates**, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KOPPE, A. **Utilização de resíduo à base de polímero superabsorvente e fibra celulósica como agente de cura interna em matrizes de Cimento Portland**. 2016. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

LAZARTE, C. A. *et al.* **Soil nail walls – reference manual**. Washington: National Highway Institute (NHI), 2015.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, 2004.

LOUREIRO, A. M. V. **Estudo da corrosão de dutos enterrados em solos contaminados por substâncias químicas**. 2007. 147 folhas. Dissertação (Mestrado em Ciências) – EQ-ANP/UFRJ, 2005.

LOUREIRO, A; BRASIL, S.; YOKOVAMA, L. Estudo da Corrosividade de Solo Contaminado por Substâncias Químicas Através de Ensaio de Perda de Massa e Índice de Steinrath. **Corrosão e Proteção de Materiais**, v.26, p.113-121, 2007.

MANCIO, M. *et al.* **Electrochemical and *in-situ* SERS study of passive film characteristics and corrosion performance of microcomposite steel in simulated concrete pore solutions**. Berkeley: University of California, 2008.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibra de aço**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2006.

MARTÍNEZ, I.; ANDRADE, C. Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 545-554, 2009.

MARTINS, R. M. **Reologia da pasta de cimento com aditivos superplastificante e modificador de viscosidade**. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, 2011.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e durabilidade das estruturas de concreto. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

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

MELO NETO, A. A.; CINCOTTO, M. A.; REPETTE, W. L. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 565-574, 2008.

MICHEL, A.; OTIENO, M.; STANG, H., GEIKER, M.R. Propagation of steel corrosion in concrete: Experimental and numerical investigations. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p.171-182, 2016.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. New Jersey: Prentice Hall, 2003.

MITCHELL, J. M., VILLET, W. C. B. **Reinforcement of earth slopes and embankments**. Washington: National Research Council, 1987.

MODESTI, Guilherme. **Métodos não destrutivos para investigação de corrosão em concreto armado**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em

Engenharia Civil) – Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014. Documento em PDF.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NONAT, A. A hidratação dos cimentos. *In*: CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Durabilidade do concreto**. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 17-40.

NOOR, E. A. Comparative Analysis for the Corrosion Susceptibility of Cu, Al, Al–Cu and C-steel in Soil Solution. **Materials and Corrosion**, v.62, p.786-795, 2011.

ORTIGÃO, J. A. R; FANIN, R. J. **Tie back walls to soil nailing**: the practice in Vancouver and in Rio de Janeiro. Vancouver: Geotechnical News, 1992.

ORTIGÃO, J. A. R.; PALMEIRA, E. M.; ZIRLIS, A. Experiência com solo grampeado no Brasil: 1970-1993. **Revista Solos e Rochas**, v. 16, n. 4, p. 291-304, 1993.

ORTIGÃO, J. A. R; PAREIRA, E. M.. Solo grampeado: técnica para estabilização de encostas e escavação. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENCOSTAS (COBRAE), 1., Rio de Janeiro, 1992. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABMS, 1992. p. 55-74.

PANNONI, F. B. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. [S.l.]: Gerdau, 2007.

POUPARD, O.; L'HOSTIS, V.; CATINAUD, S.; PETRE-LAZAR, I. Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment. **Cement and Concrete Research** 36. p. 504-520, 2006.

PHAN-THIEN, N. **Understanding viscoelasticity**: basics of rheology. Singapura: Springer, 2002.

QUARCIONI, V. A. *et al.* Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 175-187, out./dez. 2009

RILEM TC 116-PDC. Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete. **Material and Structures**, v. 32, p. 178-179, 1999.

RILEM TC 154-EMC. Recommendations: Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. **Materials and Structures** 33, 2000, p. 603-611.

RILEM TC 154-EMC. Recommendations: half-cell potential measurements – potential mapping on reinforced concrete structures. **Material and Structures**, v. 26, p. 461-471, 2003.

RILEM TC 154-EMC. Recommendations: test methods for on-site corrosion rate measurement of polarization resistance method. **Material and Structures**, v. 37, p. 623-643, 2004.

RIVERA-CORRAL, J. O., FAJARDO, G., ARLIGUIE, G., OROZCO-CRUZ, R, DEBY, F., VALDEZ, P. Corrosion behavior of steel reinforcement bars embedded in concrete exposed to chlorides: Effect of surface finish. **Construction and Building Materials**, v. 147, p 815-826, 2017.

ROMANOFF, J. **Underground corrosion**. Washington: National Bureau of Standards Circular 579, 1957.

ROSA, B. D. **Faceamento de solo grampeado com malhas de aço – estudo dos critérios de dimensionamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2015.

SILVA, M. J e BRASIL, S. L. Critério de Avaliação da Corrosividade de Solos Baseado na Sobretensão de Hidrogênio. **Corrosão e Proteção de Materiais**, v.29, n.1, p.19-25, 2010.

SILVA, D. P. **Análise de diferentes metodologias executivas de solo pregado a partir de ensaios de arrancamento realizados em campo e laboratório**. 2009. 313 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2009.

SILVEIRA, C. A. Uso do viscosímetro Brookfield em determinações reológicas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 1, n. 1, p. 41-43, 1991.

TRABANELLI, G.; ZUCCHI, F.; ARPAIA, M. Methods of Determination of soil Corrosiveness with Respect to Metallic Structures. **Chinica Pura ed Applicata**, v.3, p.43-59, 1972.

TAN, Z., BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L. Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. **Materials and Structures**, v. 50, p. 235-246, 2017.

TAVARES, Guilherme. **Corrosão de armadura de concreto: efeito das características químicas da solução dos poros e da presença de íons deletérios na passivação e resistência à corrosão do aço**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2020. Documento em PDF.

TAYLOR, H. F. W, **Cement chemistry**. 2. ed. London: T. Telford, 1997.

TRINDADE, G. H., **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-silica e penetração de cloretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2011.

UHLIG, H. H.; REVIE, R. W. **Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

UNI. Determination of Chloride Ion Penetration, Italian Standard 7928, Rome, 1978.

WHEAT, H. G. Using polymers to minimize corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 1, p. 119-126, 2002.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. 49. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. *E-book*.

ZHU, J. H. *et al.* Polarization induced deterioration of reinforced concrete with CFRP anode. **Materials**, v. 8, p. 4317-4331, 2015.

ZORTÉA, M. E. B. *et al.* Avaliação da viscosidade aparente de pastas de amidos nos viscosímetros Brookfield RVDV-II+ PRO e rápido viscoanalisador RVA-4. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 5, n. 1, p. 326-335, 2011.s

On the applicability of the Stern–Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion U. Angst\* and M. Büchler

## ANEXO A

# Boletim de Ensaios de Cimento



Atualizado em: **30/07/2021** Produto: **CPIV-32-RS** Norma: **NBR 16697**  
 Mês e ano de referência: **jun/21** Marca: **Votoran** Unidade: **Esteio**

Ensaio	Químicos				Físicos e mecânicos										
	Teores (%)				Finura(%)		Blaine	Água de	Tempo Pega		Expansib.	Resist. à Compressão (MPa)			
	PF	MgO	SO <sub>2</sub>	RI	#200	#325	(cm <sup>2</sup> /g)	consist.(%)	Início (min)	Fim (min)	a quente (mm)	1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites de Norma	≤ 6,5	N/E	≤ 4,5	N/E	≤ 8,0	N/E	N/E	N/E	≥ 60	≤ 720	≤ 5,0	N/E	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0 ≤ 49,0
01/06/2021	3,8	4,5	2,3	26,4	0,5	4,5	4410	29,8	200	245	0,0	12,5	21,6	27,9	41,6
02/06/2021	3,6	4,3	2,2	26,9	0,5	4,3	4470	29,8	200	245	0,0	13,7	22,1	27,8	38,9
03/06/2021															
04/06/2021	4,4	4,3	2,3	27,6	0,6	5,0	4400	30,2	210	255	0,0	11,4	20,8	26,0	38,3
05/06/2021															
06/06/2021															
07/06/2021	4,4	4,4	2,0	28,0	0,4	4,9	4490	31,0	220	260	0,0	13,0	20,9	26,1	38,2
08/06/2021	4,6	4,2	2,3	27,3	0,5	7,0	4520	31,0	220	295	0,0	12,3	19,8	26,0	37,8
09/06/2021	4,0	4,3	2,3	27,3	0,5	7,0	4580	31,0	215	295	0,0	14,1	21,6	26,5	39,0
10/06/2021															
11/06/2021															
12/06/2021															
13/06/2021															
14/06/2021	4,1	4,6	2,2	26,9	0,4	3,2	4400	31,0	225	240	0,0	15,1	21,8	28,2	39,5
15/06/2021	4,7	4,3	2,3	26,6	0,4	4,2	4490	30,6	195	250	0,0	12,2	20,2	26,3	38,5
16/06/2021	4,7	4,2	2,3	26,1	0,5	4,3	4460	30,6	205	265	0,0	12,6	21,0	26,4	38,5
17/06/2021	4,5	4,3	2,3	26,4	0,4	4,4	4380	30,6	195	250	0,0	11,3	20,2	26,7	38,6
18/06/2021	5,8	4,5	2,3	26,3	0,4	4,9	4260	30,6	195	250	0,0	12,6	20,4	26,5	38,1
19/06/2021															
20/06/2021															
21/06/2021	3,9	4,3	2,3	26,1	0,5	4,3	4320	30,6	200	245	0,0	11,6	21,1	26,9	38,7
22/06/2021	3,0	4,3	2,3	25,0	0,4	4,2	4330	30,4	195	240	0,0	12,3	23,2	26,4	38,8
23/06/2021	3,0	4,1	2,3	26,5	0,4	4,3	4300	30,6	225	255	0,0	12,2	21,4	27,9	41,2
24/06/2021	4,7	4,2	2,1	25,1	0,4	4,6	4380	30,6	195	255	0,0	15,5	23,5	27,8	41,2
25/06/2021	3,8	4,1	2,2	27,5	0,5	4,8	4200	30,6	215	250	0,0	11,8	20,5	25,2	38,5
26/06/2021															
27/06/2021															
28/06/2021	4,3	4,2	2,3	26,3	0,6	4,4	4380	30,6	210	255	0,0	11,9	21,4	25,9	38,1
29/06/2021	3,7	4,4	2,3	25,0	0,6	4,3	4390	30,6	195	245	0,0	11,3	20,7	25,6	39,0
30/06/2021	4,8	4,1	2,2	27,7	0,5	5,3	4390	30,6	200	245	0,0	11,1	19,0	22,2	38,7
<b>Média</b>	4,2	4,3	2,3	26,6	0,5	4,7	4397	30,6	206	255	0,0	12,6	21,1	26,4	39,0
<b>Desvio Padrão</b>	0,7	0,1	0,1	0,9	0,1	0,9	92,4	0,3	11,0	15,6	0,0	1,2	1,1	1,3	1,1
<b>Mínimo</b>	3,0	4,1	2,0	25,0	0,4	3,2	4200	29,8	195	240	0,0	11,1	19,0	22,2	37,8
<b>Máximo</b>	5,8	4,6	2,3	28,0	0,6	7,0	4580	31,0	225	295	0,0	15,5	23,5	28,2	41,6

## Observações:

Massa Específica: -

Suzana Nagel dos Santos

Suzana Nagel dos Santos  
Responsável Controle de Qualidade  
Votorantim Cimentos S/A

Marco A. Vivian

Marco A. Vivian  
Gerente da Fábrica  
Votorantim Cimentos S/A

Central de Relacionamento com o Cliente: Capitais 4003 9894 | Demais localidades 0800 701 9894  
 Serviço de Atendimento ao Consumidor: 0800 701 9898  
 Site: [www.vcimentos.com.br](http://www.vcimentos.com.br)

**ArcelorMittal**  
Aços Longos

Numero: 0007053761/2021

ArcelorMittal

# CERTIFICADO DE QUALIDADE

**Ciente:** PROTENDIDOS DYWIDAG LIMITADA

**Pedido:** OC 492948

**Material:** 287501

**Aço:** A615 GR 100

**Ordem de Venda:** 8978191

**Nota Fiscal:** 1114028-1

**Produto:** BARRA ROSCADA

**Especificação:** ASTM A615/615M

**Bitola:** 25,00 mm

**Acond.:** 12,000 m

**Nº Lotes:** 10

**Peso (Kg):** 24840

**Corr./Lote** Análise Química

Corr/Lote	C %	Mn %	Si %	P %	S %
E873502	0.40	1.37	0.30	0.028	0.022
E928203	0.39	1.32	0.23	0.023	0.032
F003300	0.39	1.33	0.20	0.034	0.034

**Corr./Lote** Propriedades Mecânicas

Corr/Lote	Limite de escoamento MPa	Limite de Resistência MPa	Alongamento %
E873502	721 MPa	956 MPa	9.0
E928203	720 MPa	955 MPa	8.5
F003300	740 MPa	944 MPa	8.0

**Observações:**



**Protendidos Dywidag Ltda**  
 Rastreabilidade (NR) 8342  
 Nota Fiscal: 2094 Data: 5/1/21  
 Visto: Uleyey

Data: 23.02.2021

*Georgio Duarte Costa*  
 Gerente de Atendimento Técnico

Este documento certifica que o material aqui relacionado foi produzido, ensaiado e aprovado conforme requisitos de norma ou especificação solicitada. Certificamos que todo material relacionado acima foi produzido, testado e aprovado de acordo com a legislação vigente, não contém radiação em níveis prejudiciais ao ser humano. No caso de dúvidas, entre em contato com a nossa **Assistência ao Cliente 0800 015 1221 = www.arcelormittal.com.br**

**ArcelorMittal**  
Aços Longos

# CERTIFICADO DE QUALIDADE

Numero: 0007053761/2021

ArcelorMittal

**Cliente:**  
PROTENDIDOS DYWIDAG LIMITADA

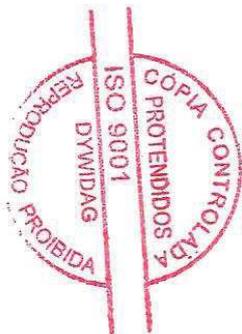
**Pedido:**  
OC 492948

**Ordem de Venda:**  
8978191

**Nota Fiscal:**  
1114028-1

**Lista de Lotes:**

Produto	Descrição	Bitola	Corr/Lote	Lotes
CA50 S	BRO 25,00MM A615 Gr100 12,00X 2,5X CORTE 25,00 mm		E873502	E873502002 E873502003 E873502016 E873502017
			E928203	E928203001 E928203002 E928203003
			F003300	F003300021 F003300023 F003300024



Data: 23.02.2021

Este documento certifica que o material aqui relacionado foi produzido, ensaiado e aprovado conforme requisitos de norma ou especificação solicitada.  
Certificamos que todo material relacionado acima foi produzido, testado e aprovado de acordo com a legislação vigente, não contém radiação em níveis prejudiciais ao ser humano.  
No caso de dúvidas, entre em contato com a nossa Assistência ao Cliente 0800 016 1221 = [www.arcelormittal.com.br](http://www.arcelormittal.com.br)

*Georgina Duarte Costa*  
 Georgina Duarte Costa  
 Gerente de Relações Técnicas

Página: 2/2

ANEXO C

 <b>CERTIFICADO DE INSPEÇÃO / CERTIFICATE OF INSPECTION</b> 		Nº CERTIFICADO / NUMBER <b>11910</b>	DATA DE EMISSÃO / DATE <b>05/02/2020</b>										
CLIENTE / CUSTOMER: <b>PROTENDIDOS DWIDAG LTDA</b>		UNIDADE - DIADEMA											
DOCUMENTO <b>11910</b>	CODIGO FORNECEDOR / DESCRIÇÃO DO PRODUTO <b>1503 BARRA DN S 1930/1050 26MM</b>												
NOTA FISCAL <b>20923</b>	QUANTIDADE <b>2003</b>												
ESPERIFICAÇÕES / SPECIFICATION: NORMA / STANDARD <b>NBR 6323</b> MATÉRIA-PRIMA / RAW MATERIAL <b>ZINCO SHG</b> ADERÊNCIA / ADHERENCE <input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> VISUAL <input type="checkbox"/> OK CAMADA (µm) MÍN. / MINIMUM LAYER <b>100</b> PESO DA CAMADA / LAYER WEIGHT (g/m²) <b>956,05</b> MÉDIA DE MEDIÇÕES / AVERAGE MEASUREMENTS (µm) <b>133,90</b>													
LETURA DURANTE O PROCESSO / READING DURING THE PROCESS <table border="1"> <tr> <td><b>118</b></td> <td><b>119</b></td> <td><b>130</b></td> <td><b>137</b></td> <td><b>140</b></td> </tr> <tr> <td><b>120</b></td> <td><b>127</b></td> <td><b>138</b></td> <td><b>150</b></td> <td><b>160</b></td> </tr> </table>				<b>118</b>	<b>119</b>	<b>130</b>	<b>137</b>	<b>140</b>	<b>120</b>	<b>127</b>	<b>138</b>	<b>150</b>	<b>160</b>
<b>118</b>	<b>119</b>	<b>130</b>	<b>137</b>	<b>140</b>									
<b>120</b>	<b>127</b>	<b>138</b>	<b>150</b>	<b>160</b>									
VALIDAÇÃO / VALIDATION: RESPONSÁVEL / RESPONSIBLE Camilla Rosa Freitas		VISTO / VISA: 											
FUNÇÃO / FUNCTION: Garantia de Qualidade / Quality Assurance													
UTILIZAÇÃO NA INSPEÇÃO: AGENCIA DE CONTROLES INDUSTRIAIS MEC-3 APC-01 - VALIDAR E CALIBRAR O EQ. 2020.1 ASSINAR O QUANTITATIVO DE INSPEÇÃO E MANTER O CALIBRAGEM DO EQ. 2020.1													
OBSERVAÇÕES / COMMENTS: <b>0</b>													

## ANEXO D



The Chemical Company

### GLENIUM® 51

Aditivo super plastificante de terceira geração.

#### DESCRIÇÃO DO PRODUTO

GLENIUM® 51 é um aditivo para concreto, líquido, pronto para o uso e livre de cloretos.

GLENIUM® 51 foi desenvolvido para produção de concretos fluídos, concretos REODINÂMICOS e concretos de alto desempenho (CAD), geralmente utilizados na indústria de pré-moldados e concretos protendidos, onde se requer maior durabilidade e desempenho.

GLENIUM® 51 é baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, propiciando super plastificação e alta redução água, tornado o concreto com maior trabalhabilidade sem alteração do tempo de pega.

GLENIUM® 51 é recomendado para fabricação de todo tipo de concreto onde se necessita baixo fator A/C\* e alta fluidez.

GLENIUM® 51 é compatível com todos os tipos de cimento portland.

GLENIUM® 51 atende requisitos das normas brasileiras NBR 11768 (tipo P e SP) e ASTM C494 (tipo A e F).

#### PROPRIEDADE E BENEFÍCIOS

GLENIUM® 51 apresenta as seguintes propriedades e benefícios:

Estado Fresco	Estado Endurecido
- Alta taxa de redução de água (40% aproximadamente);	- Aumenta a resistência à compressão;
- Aumenta da coesão e redução da segregação;	- Aumenta a resistência à flexão;
- Aumenta a trabalhabilidade do concreto;	- Aumenta o módulo de elasticidade;
- Não altera o tempo de pega do cimento portland;	- Aumento da durabilidade do concreto;
- Facilita o adensamento e o lançamento;	- Melhor acabamento do concreto endurecido;
- Facilita o bombeamento;	- Possível redução do consumo de cimento portland para uma dada resistência;
- Reduz o fator A/C*;	- Redução de permeabilidade;
- Reduz os tempos de cura ambiente ou a vapor.	- Redução de fissuras.

#### CAMPOS DE APLICAÇÃO

GLENIUM® 51 é recomendado para uso em todos os tipos de concreto onde se deseja alta redução da água de amassamento sem alteração no tempo de pega, tais como:

- Concretos usinados em geral (barragens, rodovias, etc.)
- Concretos reforçados, pré-fabricados, bombeados, fluídos e de pouco peso ou peso normal;
- Concreto protendido;
- Concreto Reodinâmico e de alto desempenho;
- Construções "fast-track";
- Concretos para reparações de superfícies de pontes.

#### MODO DE UTILIZAÇÃO / APLICAÇÃO

O que diferencia o GLENIUM® 51 dos aditivos superplastificantes tradicionais (à base de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonada) é o tipo de mecanismo de ação que melhora sensivelmente a dispersão das partículas de cimento. Os polímeros tradicionais normalmente são absorvidos pelas partículas de cimento, estes recobrem a superfície das partículas no processo de mistura do concreto. Os grupos sulfônicos das cadeias de polímeros aumentam a carga negativa da superfície das partículas de cimento e dispersam estas



The Chemical Company

por repulsão elétrica. Este mecanismo eletrostático causa a dispersão da pasta de cimento e a consequência positiva é que se requer menos água na mistura para se obter uma determinada consistência do concreto.

GLENIUM® 51 possui uma estrutura química diferenciada da estrutura dos superplastificantes tradicionais, os polímeros de éter policarboxílico possuem largas cadeias laterais, que se depositam na superfície das partículas de cimento iniciando o mecanismo de dispersão eletrostática, porém as cadeias laterais são unidas à estrutura poliméricas gerando uma energia que estabiliza a capacidade de refração e dispersão das partículas de cimento. Com esse mecanismo mesmo durante o início do processo de hidratação do cimento o polímero continua atuando promovendo a dispersão das partículas.

### APLICAÇÃO

GLENIUM® 51 deve ser adicionado após o final da mistura dos componentes do concreto, (cimento portland, água e agregados, etc.), ou junto a segunda parte da água de amassamento que será utilizada na mistura. Nunca deve ser adicionado aos componentes secos do concreto ou cimento.

### DOSAGEM

GLENIUM® 51 deve ser utilizado nas dosagens de 0,2 a 1,0% s.p.c\*\*.

Estas dosagens são orientativas, sendo imprescindível a realização de testes laboratoriais e/ou de campo. A dosagem ótima de GLENIUM® 51 para uma boa redução de água (>20%) pode variar de acordo com a temperatura ambiente, tipo de cimento, quantidade de finos na mistura, fator A/C\*, condições de mistura, tipos de agregados, etc.

### OBSERVAÇÕES

O tempo de pega pode ser influenciado pela temperatura e umidade ambiente, bem como com o aumento da dosagem de GLENIUM® 51.

GLENIUM® 51 é compatível com outros aditivos utilizados na fabricação de concretos como modificadores de viscosidade (linha RHEOMAC® VMA 358), exceto com super plastificantes à base de naftaleno sulfonatos. Para dosagens fora da faixa recomendada e para maiores informações entrar em contato com nosso departamento técnico.

A limpeza dos equipamentos e ferramentas que foram sujos com GLENIUM® 51 deve ser feita com água abundante.

GLENIUM® 51 quando utilizado com outros aditivos deve ser adicionado separadamente.

### DADOS TÉCNICOS

Função	Aditivo super plastificante de terceira geração para concreto.		
Base Química	Éter policarboxílico.		
Aspecto	Líquido		
Cor	Branco turvo		
Ação secundária: Redutor de água			
Solubilidade em água: Total			
Não contém cloreto de cálcio, intencionalmente adicionado, ou ingredientes a base de cloreto.			
Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112 B	5 - 7	-
Densidade	TM 103 B	1,067 - 1,107	g/cm <sup>3</sup>
Sólidos	TM 613 B	28,5 - 31,5	%
Viscosidade	TM 117	< 150	cps



The Chemical Company

**EMBALAGEM E ARMAZENAGEM**

Embalagem	GLENIUM® 51 é fornecido em embalagens de 5,4 kg, 217 kg e caminhão tanque.
Validade	12 meses a partir da data de fabricação, quando respeitados as condições de armazenagem.
Armazenagem	Em condições ambientais adequadas e devidamente embalado. Local coberto, fresco, seco, longe de temperaturas extremas ou fontes de calor, nas embalagens originais e lacradas. Armazenar longe do alcance de crianças.

**TRANSPORTE E SEGURANÇA**

Transporte	GLENIUM® 51 é classificado como Transporte Não Perigoso.
Manuseio	Utilizar EPI's adequados: luvas e botas impermeáveis, óculos de segurança química. Evitar contato com a pele e olhos; o contato prolongado com a pele pode causar dermatites. Não beber, comer ou fumar durante o manuseio; lavar as mãos antes de uma pausa ou depois do trabalho.
Fogo	Produto não inflamável e não explosivo.
Toxicidade	Produto não considerado tóxico, porém impróprio para o consumo humano.
Segurança	Para maiores detalhes, consultar a Ficha de Segurança do produto.

**INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES****Legenda:**

fator A/C\* - relação entre água e cimento.

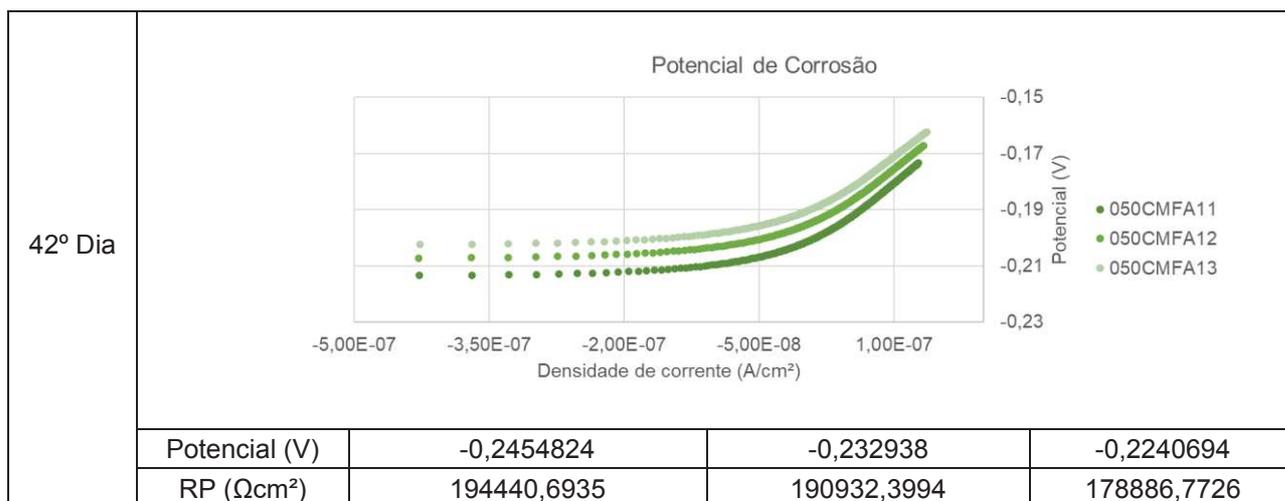
s.p.c\*\* - sobre o peso de cimento.

## APÊNDICE A

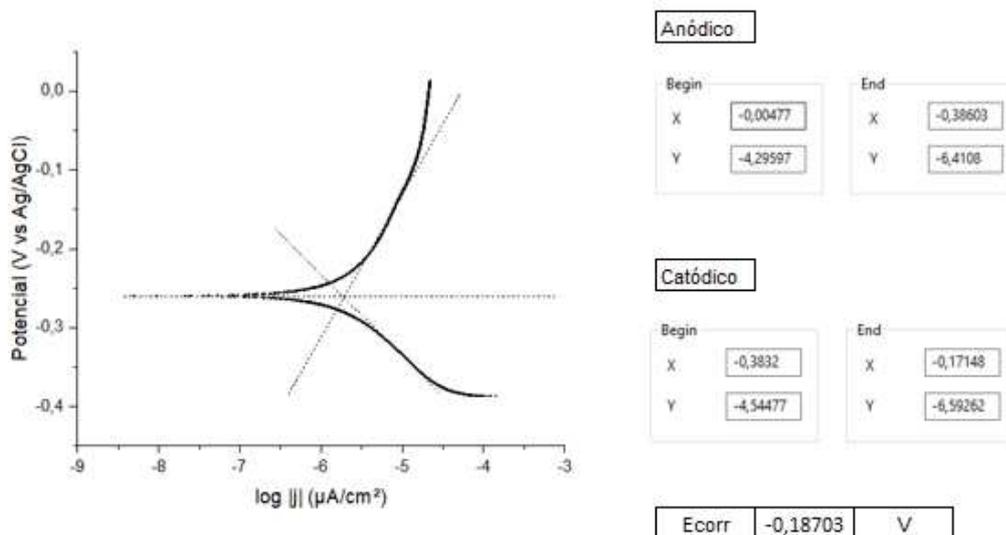
## Monitoramento 050CMFA1

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,0301079	-0,0219956	-0,016
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	611326,2119	568883,2828	562114
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,1731702	-0,1627753	-0,1555509
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	410792,6747	441345,4673	428282,41
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,3165121	-0,3130658	-0,3097229
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	240567,7386	236178,1881	248126,5082

21° Dia	<p>Potencial de Corrosão</p> <p>Densidade de corrente (A/cm<sup>2</sup>)</p> <p>Potencial (V)</p> <p>● 050CMFA11 ● 050CMFA12 ● 050CMFA13</p>			
	Potencial (V)	-0,3165121	-0,3130658	-0,3097229
	RP (Ωcm <sup>2</sup> )	240567,7386	236178,1881	248126,5082
28° Dia	<p>Potencial de Corrosão</p> <p>Densidade de corrente (A/cm<sup>2</sup>)</p> <p>Potencial (V)</p> <p>● 050CMFA11 ● 050CMFA12 ● 050CMFA13</p>			
	Potencial (V)	-0,2324473	-0,2116605	-0,1836829
	RP (Ωcm <sup>2</sup> )	210889,253	196943,2068	177076,6157
35° Dia	<p>Potencial de Corrosão</p> <p>Densidade de corrente (A/cm<sup>2</sup>)</p> <p>Potencial (V)</p> <p>● 050CMFA11 ● 050CMFA12 ● 050CMFA13</p>			
	Potencial (V)	-0,2454824	-0,232938	-0,2240694
	RP (Ωcm <sup>2</sup> )	194440,6935	190932,3994	178886,7726



## Curvas de Tafel 050CMFA1



Anódico	Início	Fim
X	-0,00477	-0,38603
Y	-4,2959	-6,4108

Ba	5,54713319
----	------------

Catódico	Início	Fim
X	-0,3832	-0,17148
Y	-4,54477	-6,59262

Bc	9,672444738
----	-------------

Constant B		
Ba	5547,133	mV
Bc	9672,445	mV
B	1532,761	mV

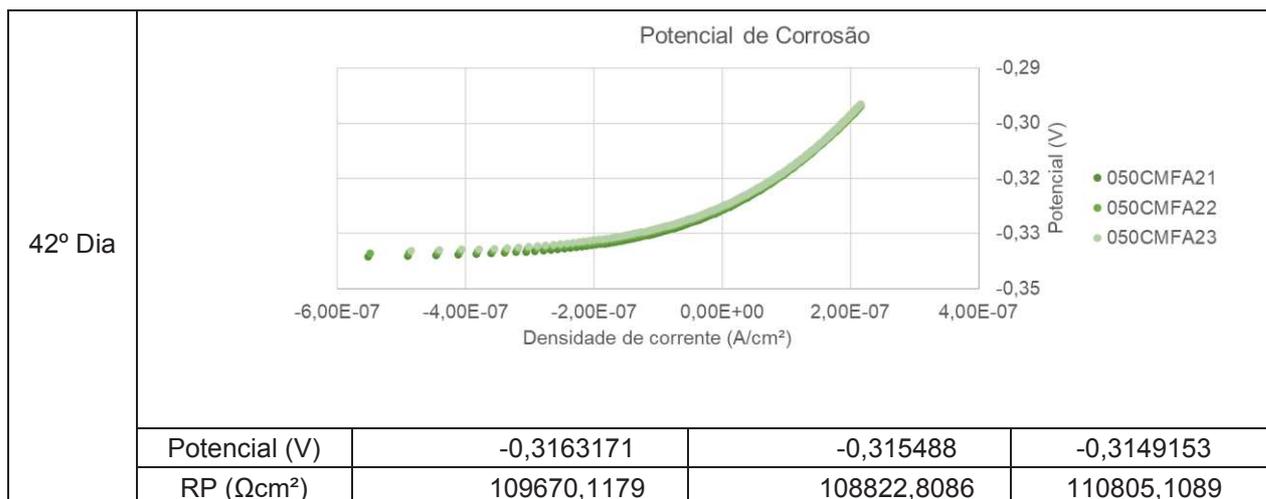
Icorr		
B	1532,761	mV
RP	198	k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	7,741217	uA/cm $^2$

Taxa Corrosão g/cm $^2$		
Icorr	7,74E-06	A/cm $^2$
M	68,35	g/mol
F	96485	C/mol
n	2	
Taxa Corrosão	2,74E-09	g/cm $^2$ /seg
Taxa anual	0,08647	g/cm $^2$ /ano

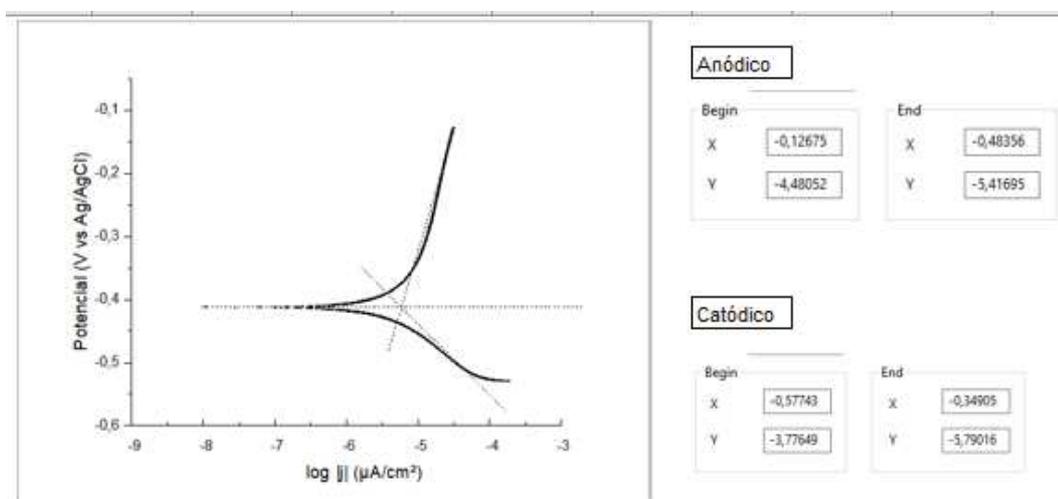
## Monitoramento 050CMFA2

1º Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,193534	-0,187278	-0,1824753
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	203655,4204	194601,9445	193548,5596
8º Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,4719242	-0,4722194	-0,4725468
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	56264,12816	55247,23497	55677,27848
15º Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,4676077	-0,4669906	-0,4662935
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	63367,51047	67416,81233	65509,20975

21° Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,4972064	-0,4939021	-0,4912179
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	60456,53889	60375,04874	60618,38735
28° Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,4412066	-0,4367757	-0,4331638
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	78484,19787	79332,2789	78606,1867
35° Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,4412066	-0,4367757	-0,4331638
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	78484,19787	79332,2789	78606,1867



Curvas de Tafel 050CMFA2



Anódico	Início	Fim
X	-0,12675	-0,48356
Y	-4,48052	-5,41695

Constant B		
Ba	2624,449987	mV
Bc	8817,190647	mV
B	879,3310187	mV

Ba	2,62445
----	---------

Icorr		
B	879,3310187	mV
RP	110	k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	7,993918351	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log Icorr	0,902759708	

Catódico	Início	Fim
X	-0,57743	-0,34905
Y	-3,77649	-5,79016

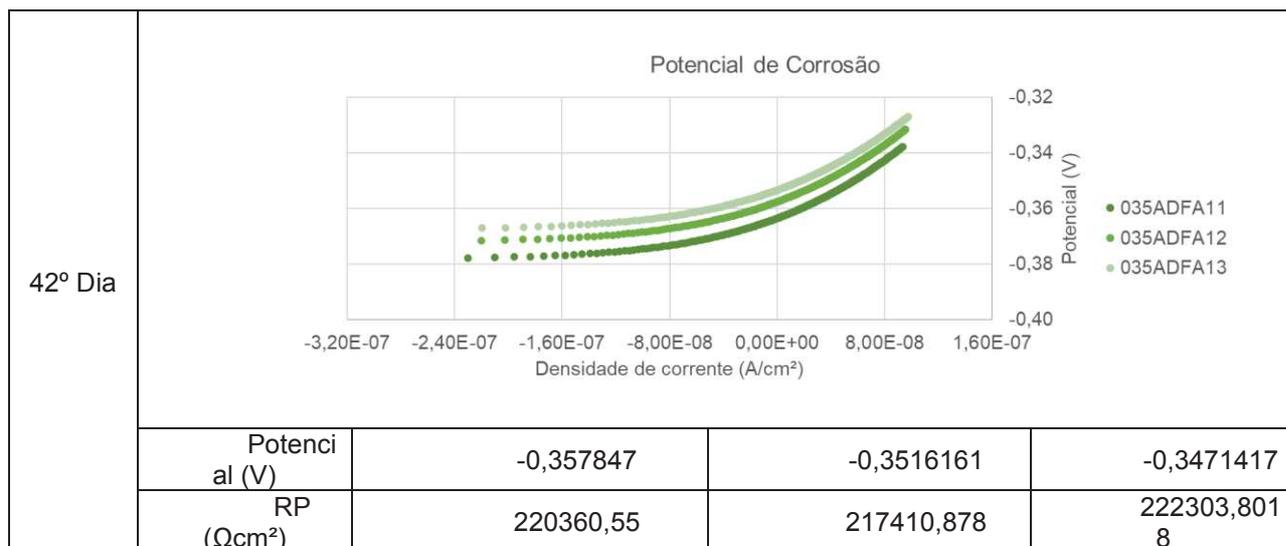
Taxa Corrosão g/cm²		
Icorr	7,99392E-06	A/cm²
M	68,35	g/mol
F	96485	C/mol
n	2	
Taxa Corrosão	2,83145E-09	g/cm²/seg
Taxa anual	0,089292511	g/cm²/ano

Bc	8,817191
----	----------

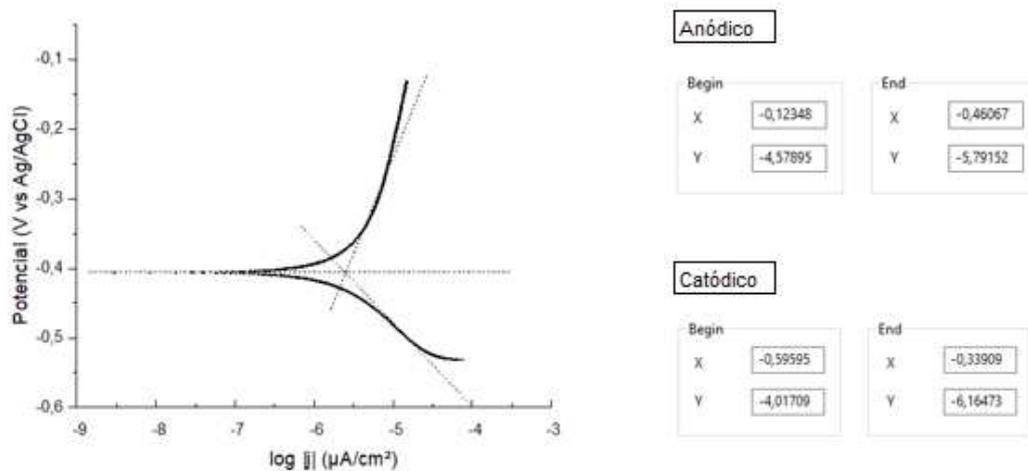
## Monitoramento 035ADFA1

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,1398618	-0,1318118	-0,1254485
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	615237,1664	620063,9041	618488,6988
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,22247	-0,2164389	-0,2125576
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	384301,9616	388659,5379	391302,403
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,3857698	-0,3585494	-0,3525139
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	192911,83	191474,3742	189775,0685

21° Dia				
	Potencial (V)	-0,290129	-0,2824171	0,2855026
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	238587,30	240337,8398	233152,1602
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,2684631	-0,2676259	0,2670284
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	228194,11	222576,1166	232105,0194
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,3360782	-0,3291284	-0,3247409
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	212420,72	211308,7589	208322,6097



Curvas de Tafel 035ADFA1



Anódico	Início	Fim
X	-0,12348	-0,46067
Y	-4,57895	-5,79152

Ba	3,596103
----	----------

Catódico	Início	Fim
X	-0,59595	-0,33909
Y	-4,01709	-6,16473

Bc	8,361131
----	----------

Constant B		
Ba	3596,103087	mV
Bc	8361,130577	mV
B	1093,298083	mV

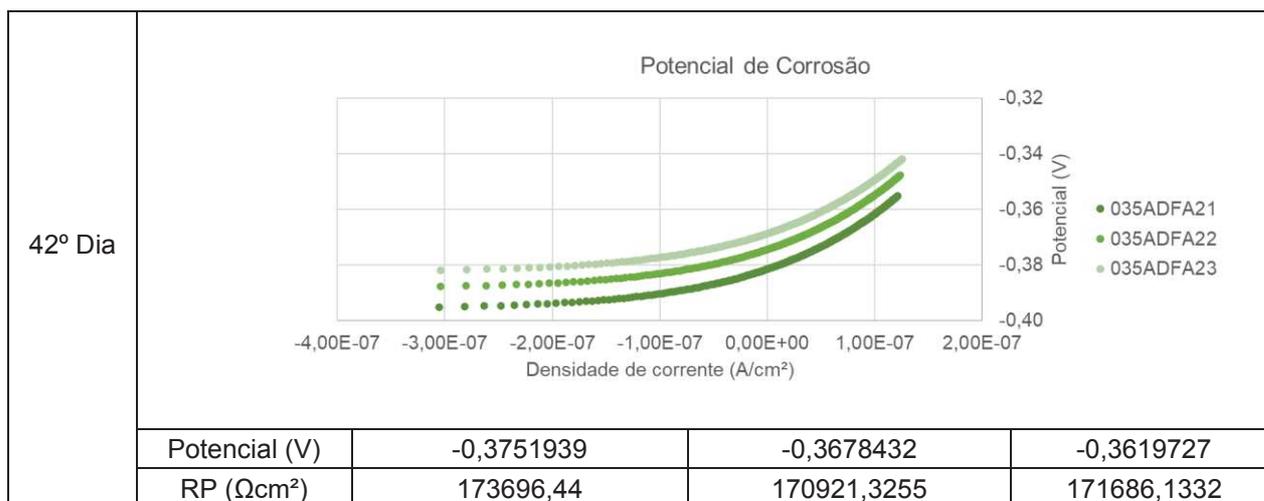
Icorr		
B	1093,298083	mV
RP	220	kΩcm²
Icorr	4,969536741	µA/cm²
log icorr	0,696315906	

Taxa Corrosão g/cm²		
Icorr	4,96954E-06	A/cm²
M	68,35	g/mol
F	96485	C/mol
n	2	
Taxa Corrosão	1,76021E-09	g/cm²/seg
Taxa anual	0,055510001	g/cm²/ano

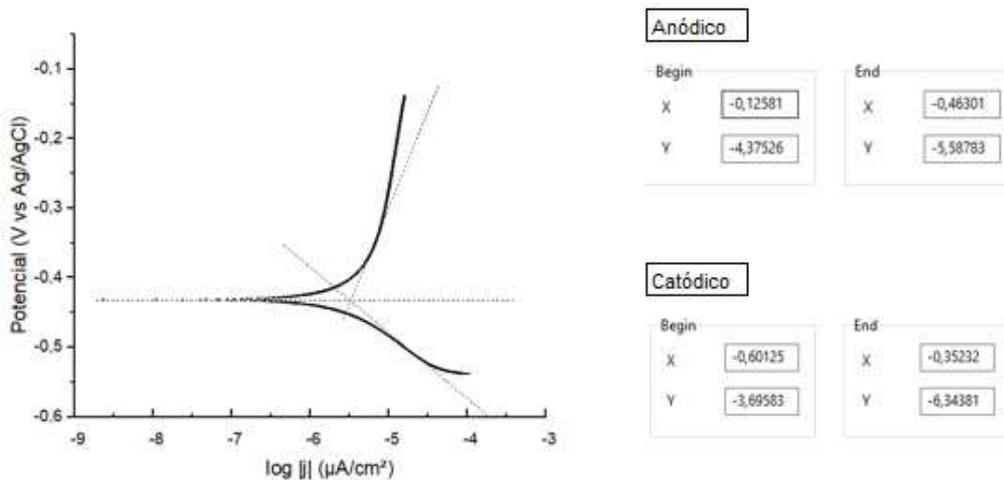
## Monitoramento 035ADFA2

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,137479	-0,1269735	-0,122347
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	370314,2987	368474,1609	370919,5159
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,2231671	-0,2184122	-0,2143337
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	239296,1609	244548,9195	243049,3119
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,3061203	-0,3013189	-0,2899427
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	174689,69	178944,9479	175589,8134

21° Dia				
	Potencial (V)	-0,2738156	-0,2698947	-0,2677593
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	200652,75	196442,8983	195961,0621
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,3213466	-0,315434	-0,3098434
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	188595,29	190066,7744	184779,8393
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,3464738	-0,3390663	-0,3326463
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	162868,63	161632,6903	158274,9407



Curvas de Tafel 035ADFA2



Anódico	Início	Fim
X	-0,12581	-0,46301
Y	-4,37526	-5,58783

Constant B		
Ba	3595,996441	mV
Bc	10637,44828	mV
B	1168,473479	mV

Ba	3,595996441
----	-------------

Icorr	
B	1168,473479 mV
RP	172 k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	6,793450462 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,832090413

Catódico	Início	Fim
X	-0,60125	-0,35232
Y	-3,69583	-6,34381

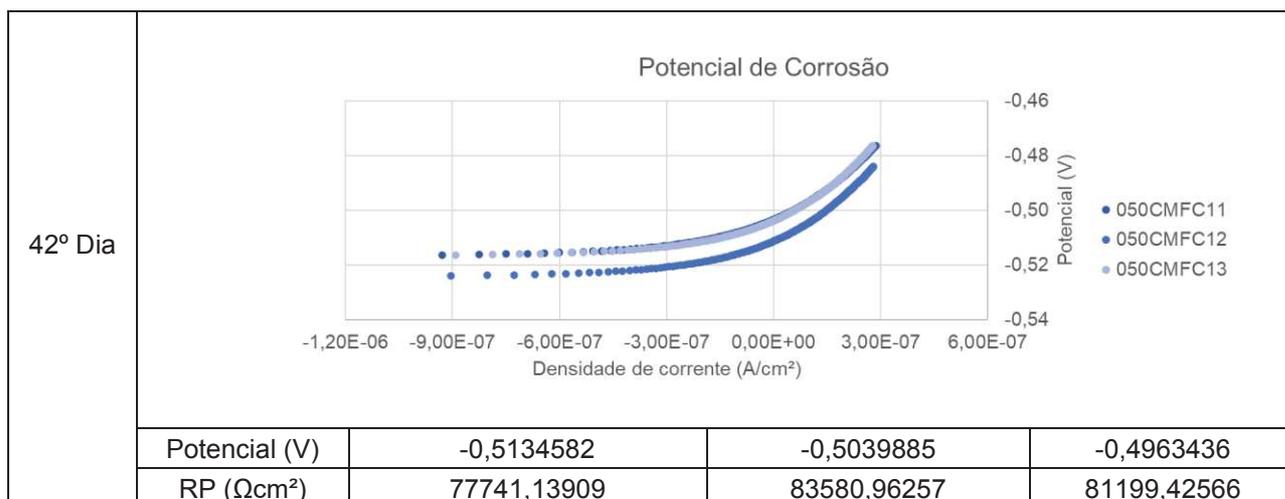
Bc	10,63744828
----	-------------

Taxa Corrosão $\text{g}/\text{cm}^2$	
Icorr	6,79345E-06 $\text{A}/\text{cm}^2$
M	68,35 $\text{g}/\text{mol}$
F	96485 $\text{C}/\text{mol}$
n	2
Taxa Corrosão	2,40624E-09 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$
Taxa anual	0,075883218 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$

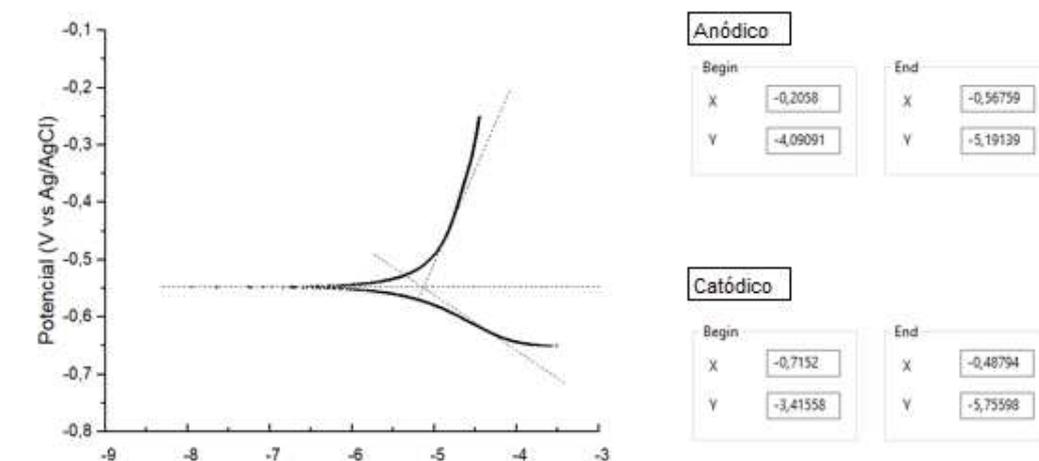
## Monitoramento 050CMFC1

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,2101594	-0,1465586	-0,0561007
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	-	-	-
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,2492163	-0,2514152	-0,1706529
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	103721,7099	123500,6159	256023,7917
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,1345955	-0,1348304	-0,1319568
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	296201,9283	300869,1176	301658,668

21° Dia				
	Potencial (V)	-0,1517244	-0,1484305	-0,1464888
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	272618,9572	263542,8476	263366,6871
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,4522408	-0,4291998	-0,4235037
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	76052,32327	73366,03494	73885,13715
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,510083	-0,4963515	-0,4878284
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	66034,10127	67930,33641	69142,75142



## Curvas de Tafel 050CMFC1



Anódico		
	Início	Fim
X	-0,258	-0,56759
Y	-4,09091	-5,19139

Ba	3,554637
----	----------

Catódico		
	Início	Fim
X	-0,7152	-0,48794
Y	-3,41558	-5,75598

Bc	10,29834
----	----------

Constant B		
Ba	3554,636778	mV
Bc	10298,33671	mV
B	1148,924467	mV

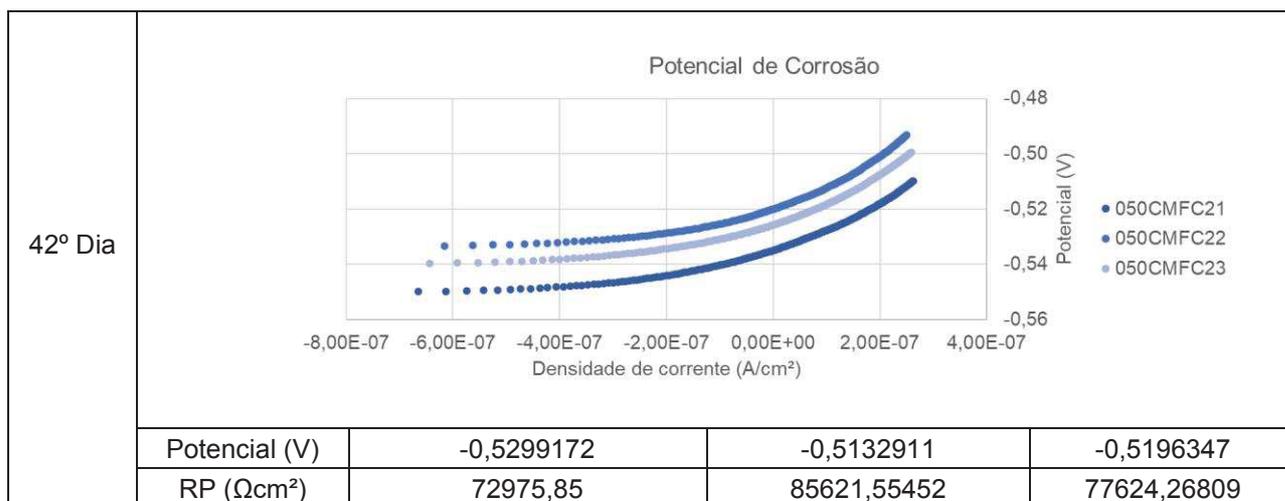
Icorr		
B	1148,924467	mV
RP	81	$\text{k}\Omega\text{cm}^2$
Icorr	14,18425268	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	1,151806459	

Taxa Corrosão $\text{g}/\text{cm}^2$		
Icorr	1,41843E-05	$\text{A}/\text{cm}^2$
M	68,35	$\text{g}/\text{mol}$
F	96485	$\text{C}/\text{mol}$
n	2	
Taxa Corrosão	5,02406E-09	$\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$
Taxa anual	0,158438889	$\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$

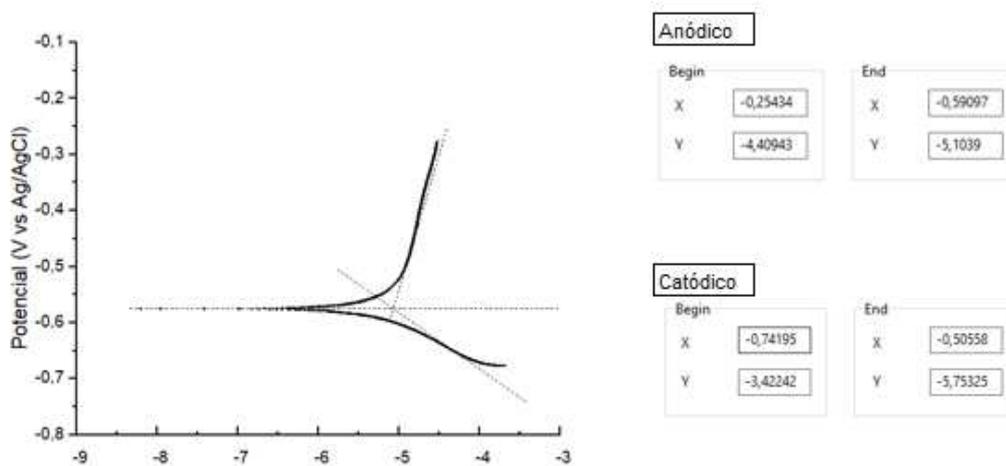
## Monitoramento 050CMFC2

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,2033494	-0,1994422	-0,1985114
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	247390,6449	251906,9288	252326,8638
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,4634628	-0,4594288	-0,4584496
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	119417,277	120655,3667	121179,8533
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,4740223	-0,4714211	-0,4700006
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	128892,5251	131752,6053	128398,4118

21° Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,4740223	-0,4714211	-0,4700006
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	128892,5251	131752,6053	128398,4118
28° Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,4918898	-0,4676828	-0,4622549
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	97038,08757	94985,95281	92538,9815
35° Dia	<p style="text-align: center;">Potencial de Corrosão</p>			
	Potencial (V)	-0,4897246	-0,4802637	-0,4745749
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	75242,15	77439,60962	75361,03495



### Curvas de Tafel 050CMFC2



Anódico	Início	Fim
X	-0,25434	-0,59097
Y	-4,40943	-5,1039

Ba	2,063007
----	----------

Catódico	Início	Fim
X	-0,74195	-0,50558
Y	-3,42242	-5,75325

Bc	9,860938
----	----------

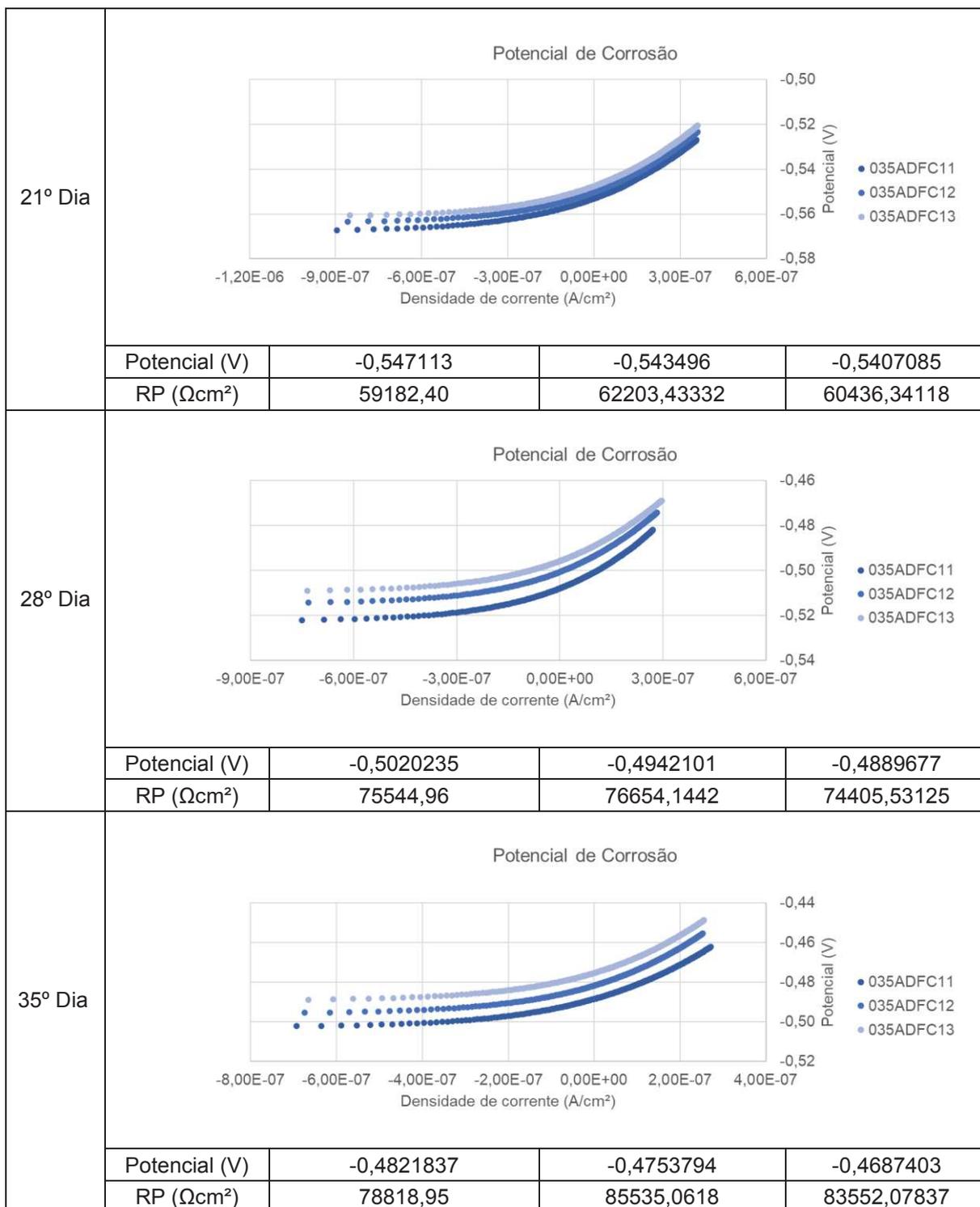
Constant B		
Ba	2063,006862	mV
Bc	9860,938359	mV
B	741,7731487	mV

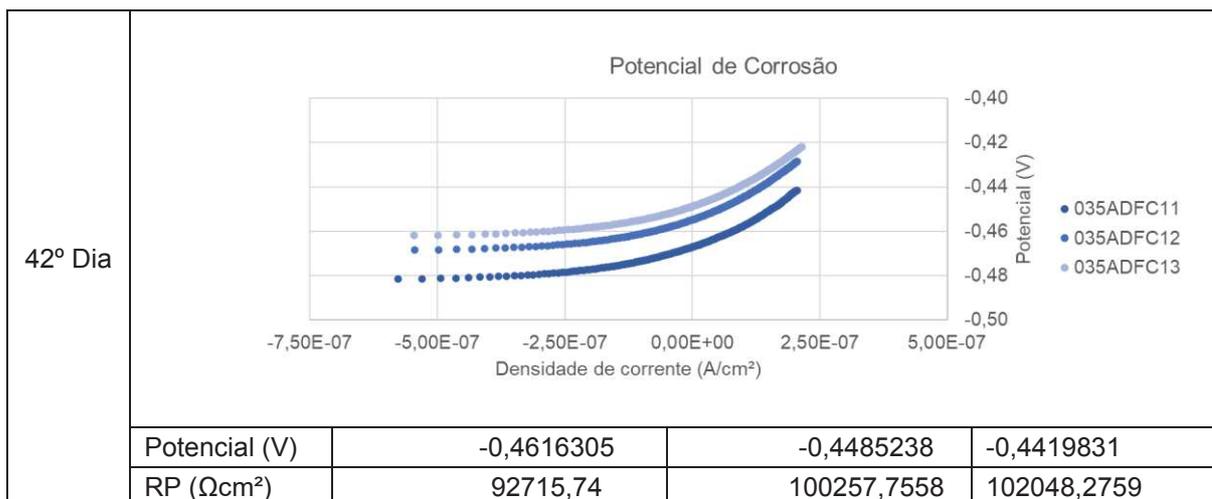
Icorr		
B	741,7731487	mV
RP	78	k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	9,509912163	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,978176506	

Taxa Corrosão g/cm²		
Icorr	9,50991E-06	A/cm²
M	68,35	g/mol
F	96485	C/mol
n	2	
Taxa Corrosão	3,36841E-09	g/cm²/seg
Taxa anual	0,106226246	g/cm²/ano

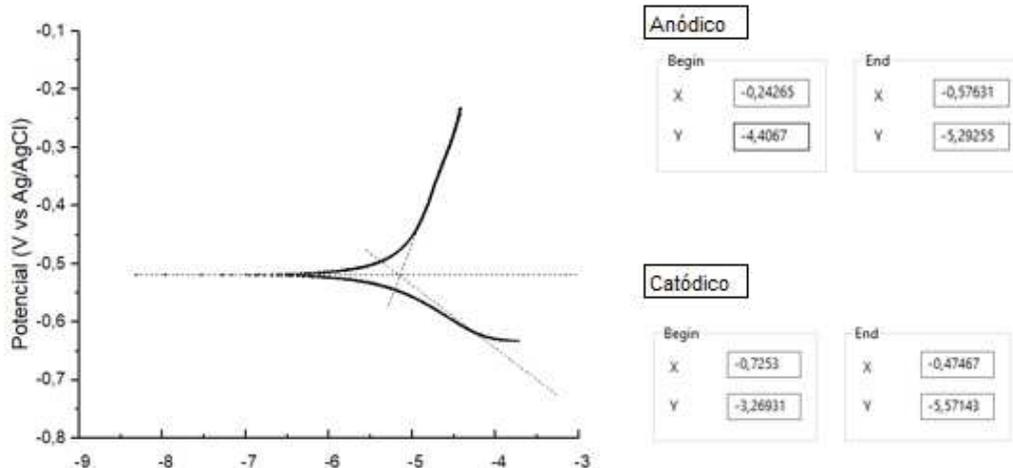
## Monitoramento 035ADFC1

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,2800336	-0,2644448	-0,2611043
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	122806,0397	122315,5147	115226,6826
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,4807845	-0,4748886	-0,4719869
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	73749,12426	73933,39396	71025,55516
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,5100572	-0,5034209	-0,4987017
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	63214,24	64283,80672	61234,45927





Curvas de Tafel 035ADFC1



Anódico	Início	Fim
X	-0,24265	-0,57631
Y	-4,4067	-5,29255

Constant B		
Ba	2654,948151	mV
Bc	9185,332961	mV
B	895,4907379	mV

Ba	2,654948
----	----------

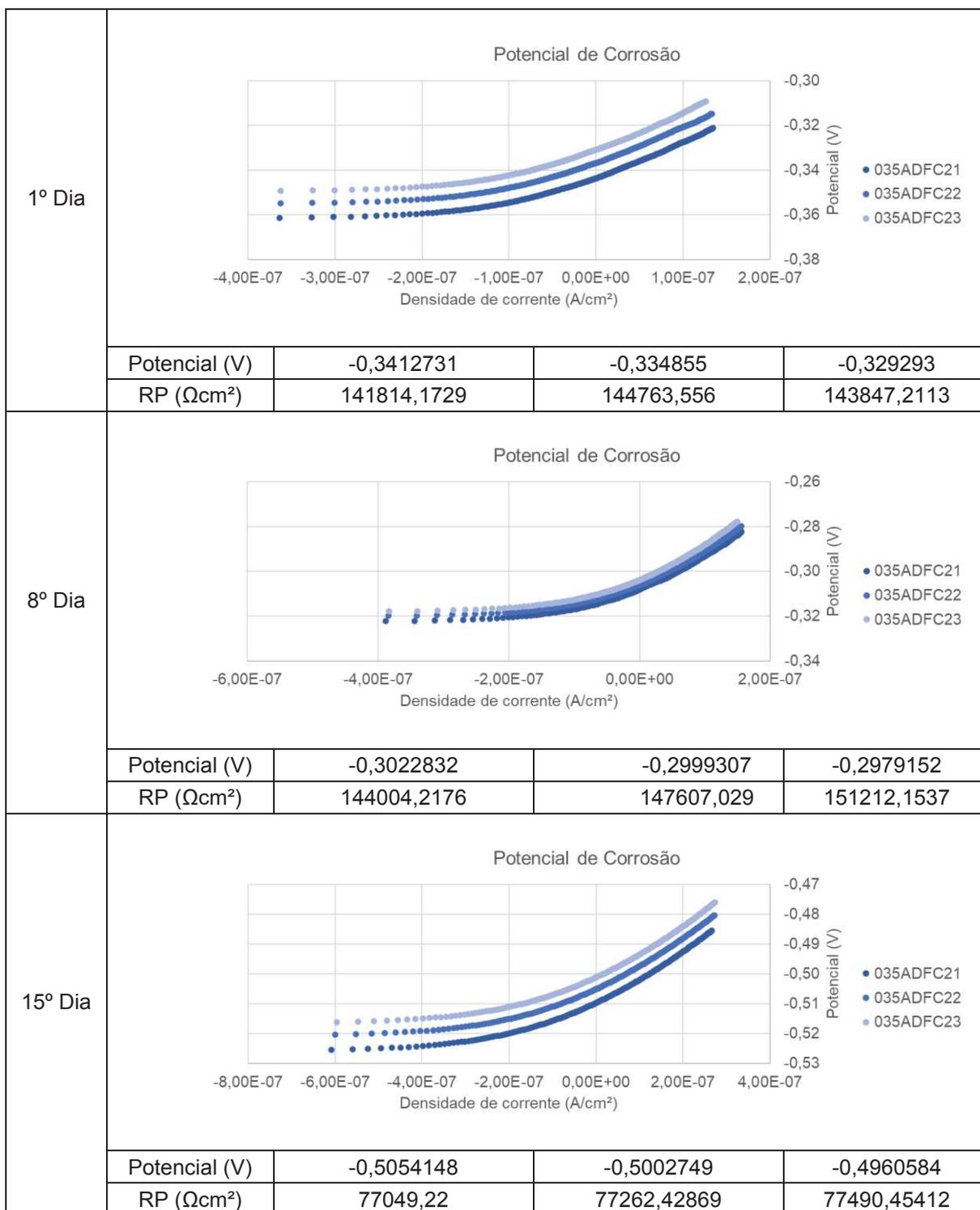
Icorr		
B	895,4907379	mV
RP	98	k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	9,13766059	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,960835023	

Catódico	Início	Fim
X	-0,7253	-0,47467
Y	-3,26931	-5,57143

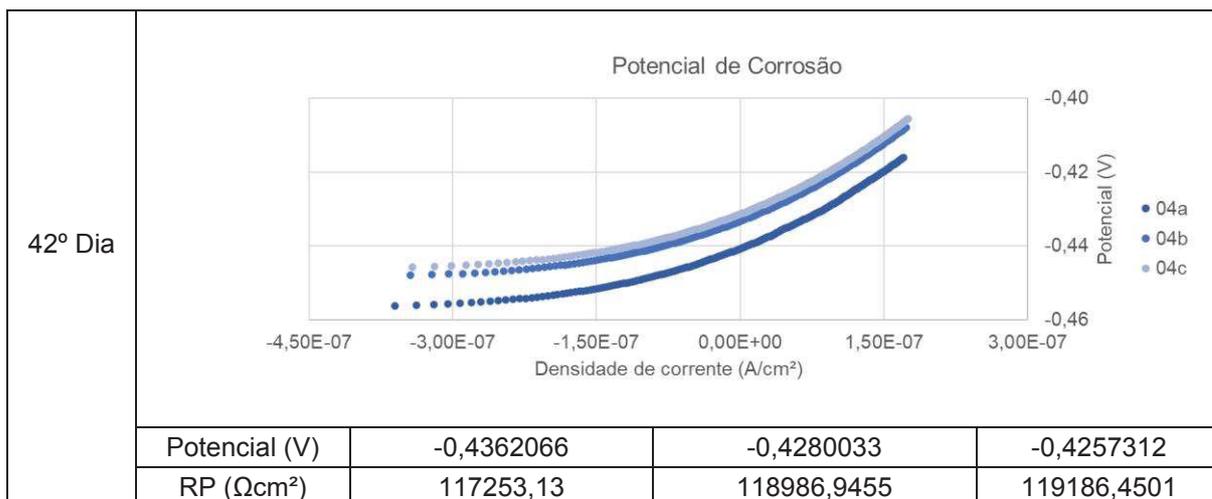
Bc	9,185333
----	----------

Taxa Corrosão g/cm²	
Icorr	9,13766E-06 A/cm²
M	68,35 g/mol
F	96485 C/mol
n	2
Taxa Corrosão	3,23656E-09 g/cm²/seg
Taxa anual	0,102068175 g/cm²/ano

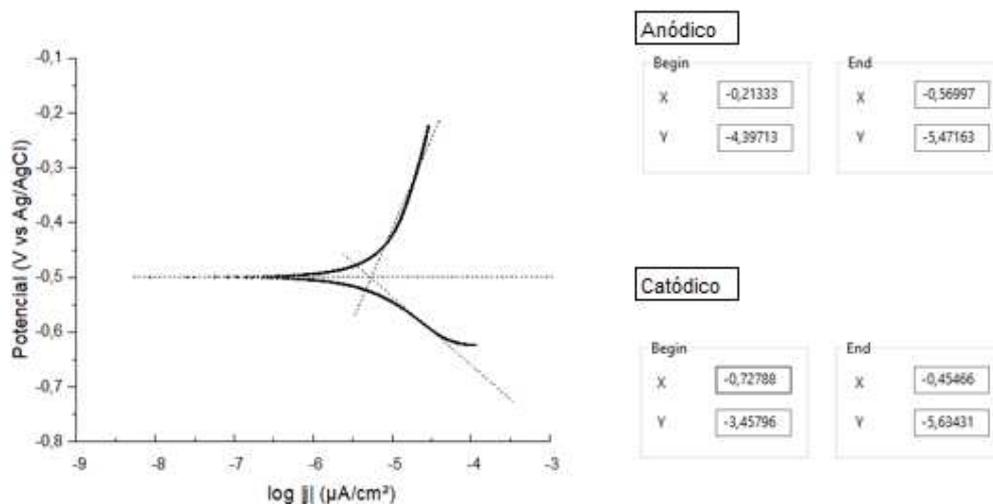
## Monitoramento 035ADFC2



21° Dia				
	Potencial (V)	-0,5108296	-0,5066904	-0,5028217
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	94189,06	94938,59385	95257,76971
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,4955383	-0,4886289	-0,4825225
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	91732,46	93136,57049	92294,01745
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,4832888	-0,4788707	-0,475213
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	88753,87	87349,44836	89030,42453



Curvas de Tafel 035ADFC2



Anódico		
	Início	Fim
X	-0,2133	-0,56997
Y	-4,39713	-5,47163

Constant B	
Ba	3012,588667 mV
Bc	7965,55889 mV
B	950,3841635 mV

Ba	3,012589
----	----------

Icorr	
B	950,3841635 mV
RP	118 $\text{k}\Omega\text{cm}^2$
Icorr	8,054103081 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,906017184

Catódico		
	Início	Fim
X	-0,72788	-0,45466
Y	-3,45796	-5,63431

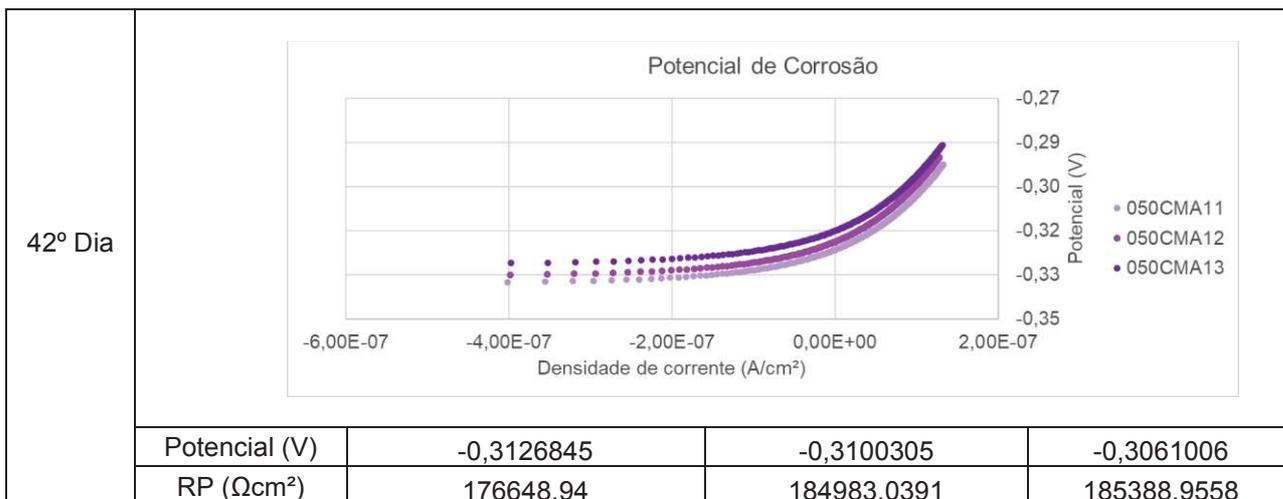
Bc	7,965559
----	----------

Taxa Corrosão $\text{g}/\text{cm}^2$	
Icorr	8,0541E-06 $\text{A}/\text{cm}^2$
M	68,35 $\text{g}/\text{mol}$
F	96485 $\text{C}/\text{mol}$
n	2
Taxa Corrosão	2,85276E-09 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$
Taxa anual	0,089964778 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$

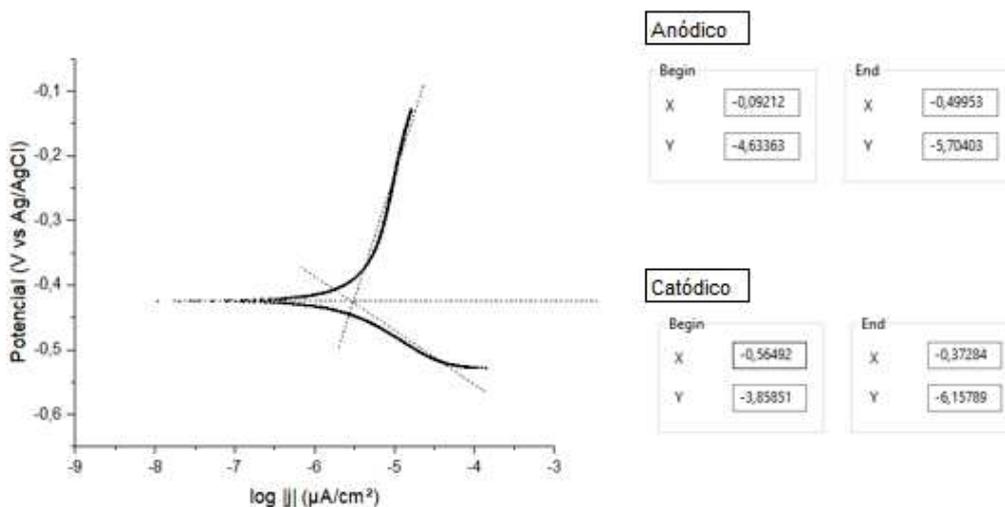
## Monitoramento 050CMA1

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,38136	-0,3862	-0,3871
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	225454	232421,7	232735,5
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,45016	-0,44387	-0,43881
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	173459,9	180375,4	180966,6
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,42657	-0,40586	-0,39823
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	167832,6	164371,4	157084

21° Dia				
	Potencial (V)	-0,40828	-0,39667	-0,38871
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	165480,8	164246,9	162440,6
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,3819522	-0,3746738	-0,3694112
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	167532,19	162233,9696	162954,4231
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,3090428	-0,3142369	-0,31472
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	170182,18	173479,1193	173771,6091



### Curvas de Tafel 050CMA1



Anódico	Início	Fim
X	-0,09212	-0,56759
Y	-4,63363	-5,70403

Ba	2,251246
----	----------

Catódico	Início	Fim
X	-0,56492	-0,37284
Y	-3,85851	-6,15789

Bc	11,97095
----	----------

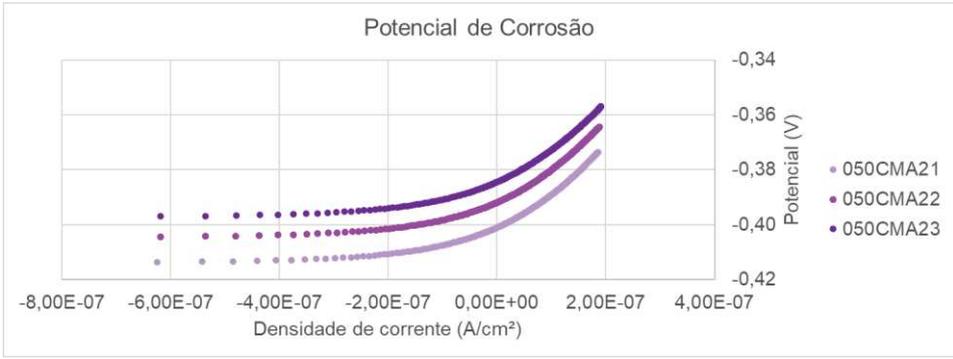
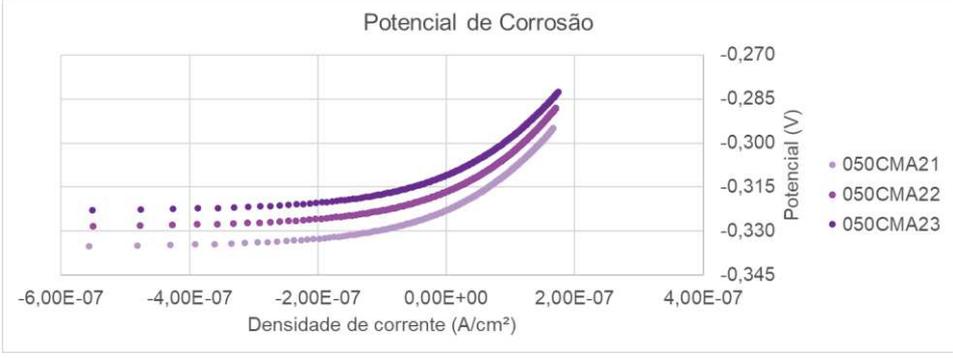
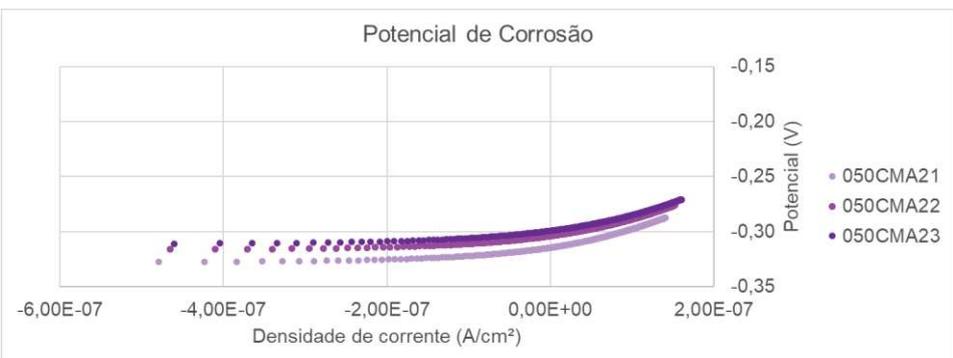
Constant B		
Ba	2251,246135	mV
Bc	11970,9496	mV
B	823,8669767	mV

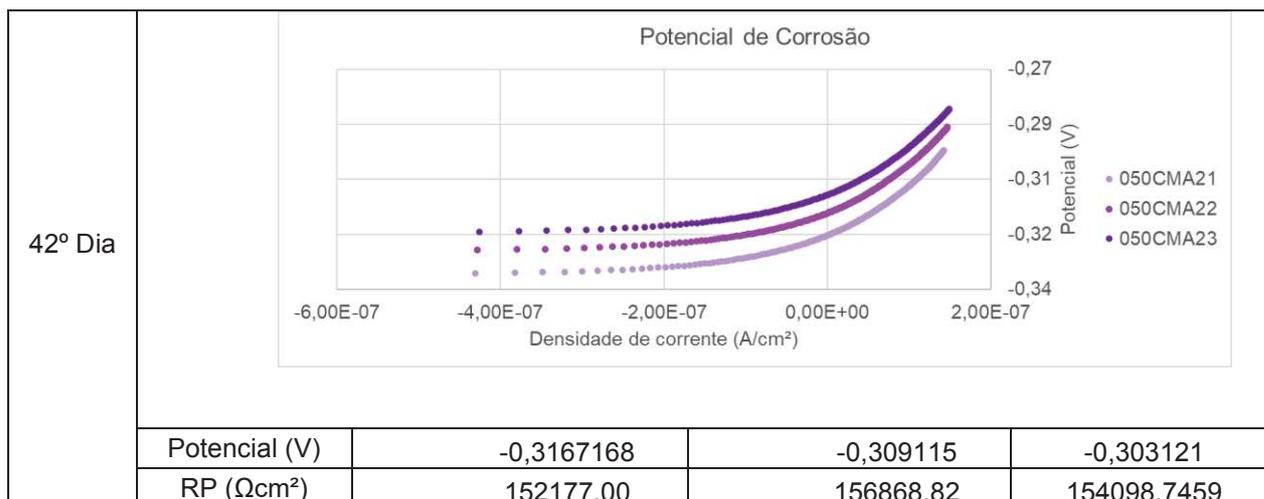
Icorr		
B	823,8669767	mV
RP	182	k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	4,52674163	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,655785707	

Taxa Corrosão g/cm²	
Icorr	4,52674E-06 $\text{A}/\text{cm}^2$
M	68,35 g/mol
F	96485 C/mol
n	2
Taxa Corrosão	1,60337E-09 g/cm²/seg
Taxa anual	0,050563955 g/cm²/ano

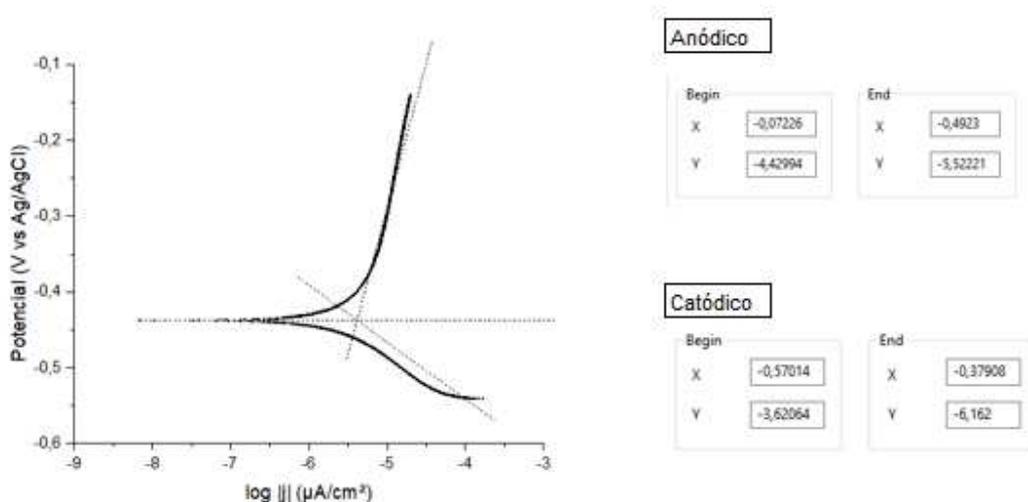
## Monitoramento 050CMA2

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,30995	-0,30754	-0,30718
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	203370,3	196717,6	192045,6
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,42798	-0,42091	-0,41536
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	134241,4	133828,3	129392,7
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,42067	-0,40033	-0,39003
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	126342,5	124041,8	115197,6

21° Dia				
	Potencial (V)	-0,39361	-0,38436	-0,37694
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	125793,2	124406,1	125062,6
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,3150725	-0,3082832	-0,3027712
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	137916,64	139401,8932	133277,1615
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,3076035	-0,2961766	-0,2908283
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	150564,94	150411,2486	145511,5281



Curvas de Tafel 050CMFA2



Anódico	Início	Fim
X	-0,07226	-0,4923
Y	-4,42994	-5,52221

Ba	2,600395
----	----------

Catódico	Início	Fim
X	-0,57014	-0,37908
Y	-3,62064	-6,162

Bc	13,30137
----	----------

Constant B		
Ba	2600,3952	mV
Bc	13301,3713	mV
B	945,7199801	mV

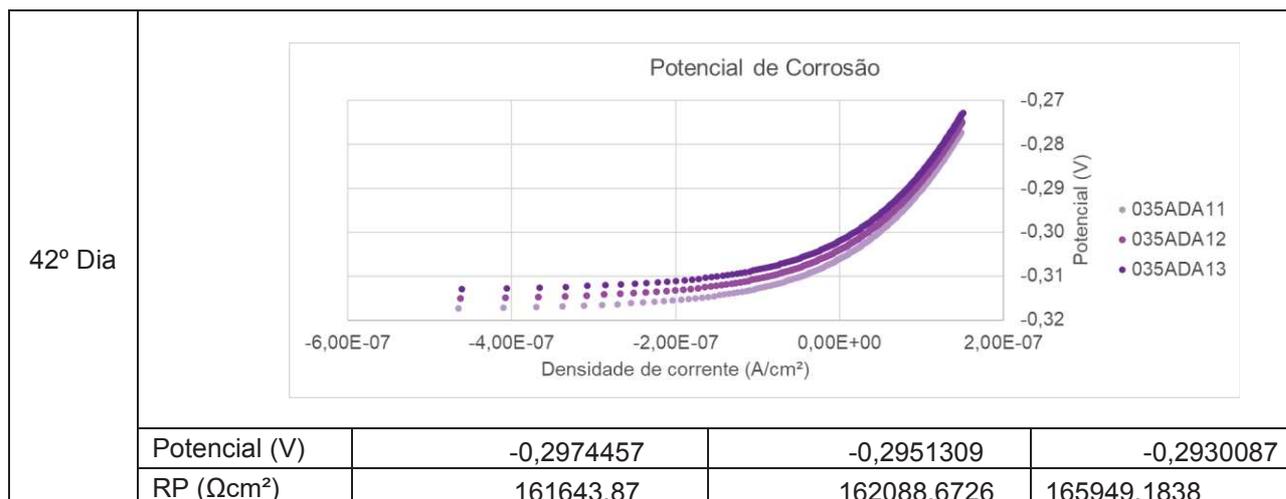
Icorr		
B	945,7199801	mV
RP	154	k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	6,141038832	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,788241844	

Taxa Corrosão g/cm²		
Icorr	6,14104E-06	A/cm²
M	68,35	g/mol
F	96485	C/mol
n	2	
Taxa Corrosão	2,17516E-09	g/cm²/seg
Taxa anual	0,068595744	g/cm²/ano

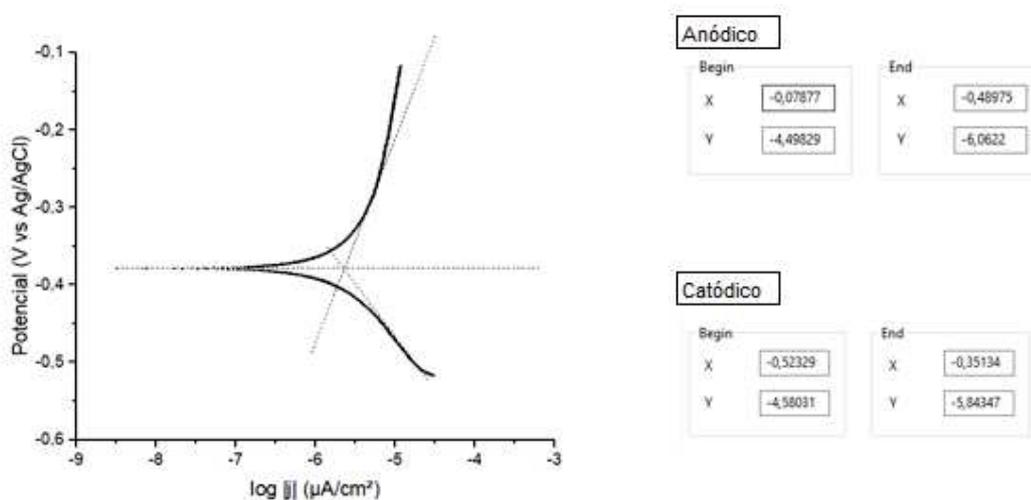
## Monitoramento 035ADA1

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,30828	-0,30617	-0,30577
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	197405,6	195571,2	201844,1
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,30926	-0,30473	-0,30211
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	169808,9	173296	165591,6
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,40905	-0,40292	-0,39824
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	125639	130679,1	126124,2

21° Dia				
	Potencial (V)	-0,35696	-0,35049	-0,34556
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	140490,1	134490,5	133288,2
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,3569501	-0,3494408	-0,3447531
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	144653,74	143964,3187	136850,2231
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,2499541	-0,2498872	-0,2492842
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	157173,87	155296,8448	158717,1317



Curvas de Tafel 035ADA1



Anódico	Início	Fim
X	-0,07877	-0,48975
Y	-4,49829	-6,0622

Constant B	
Ba	3805,318994 mV
Bc	7346,088979 mV
B	1089,907679 mV

Ba	3,805319
----	----------

Icorr	
B	1089,907679 mV
RP	163 k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	6,686550179 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,825202108

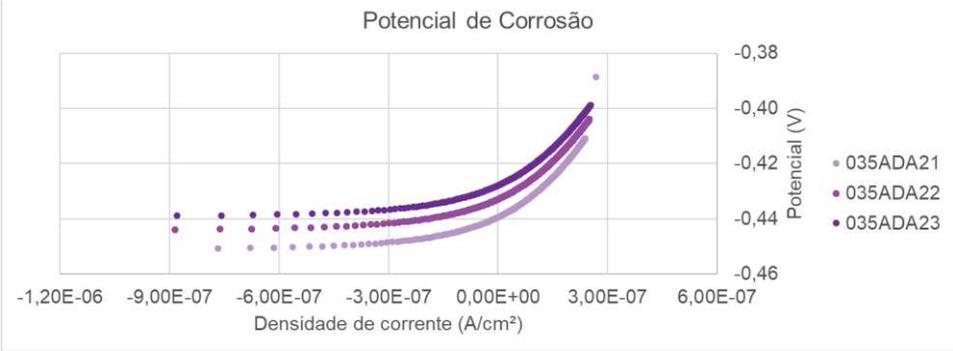
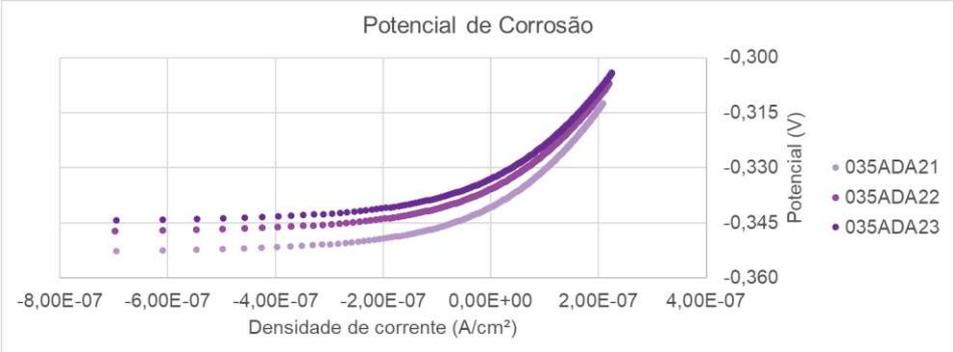
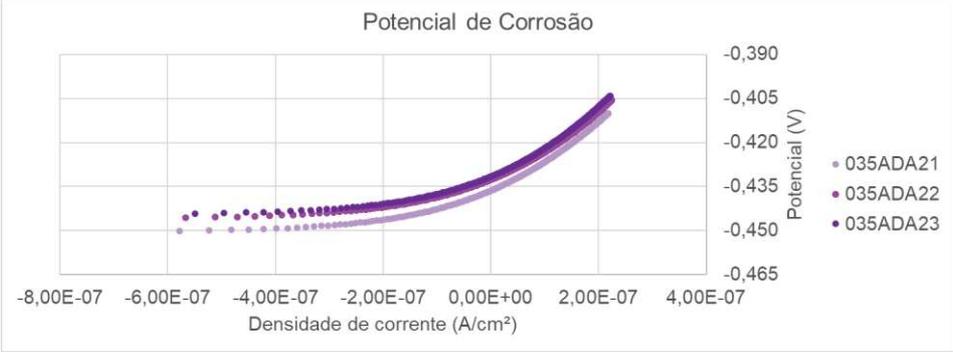
Catódico	Início	Fim
X	-0,52329	-0,35134
Y	-4,58031	-5,84347

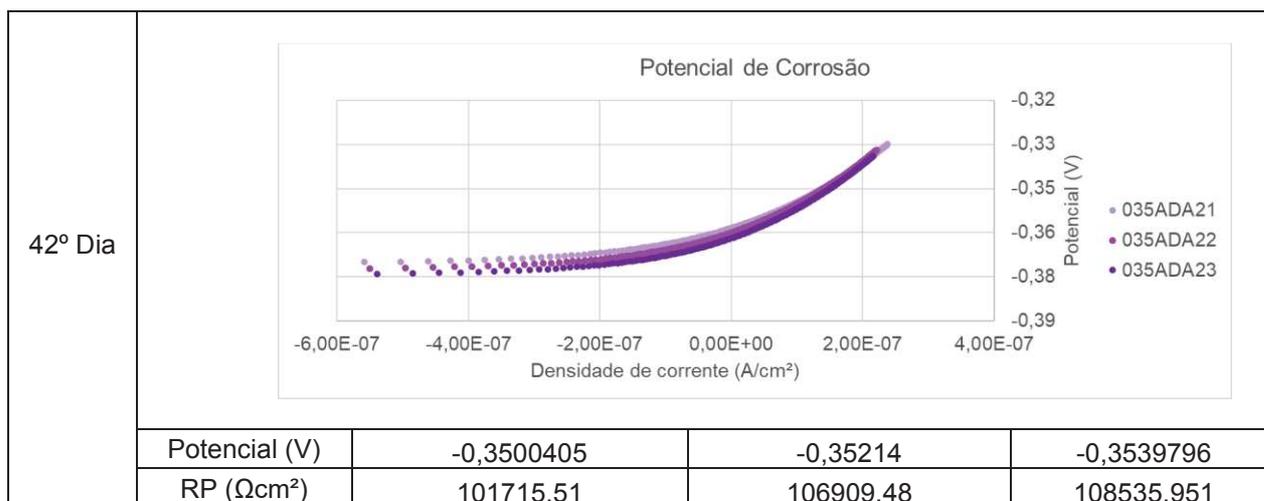
Bc	7,346089
----	----------

Taxa Corrosão g/cm²	
Icorr	6,68655E-06 A/cm²
M	68,35 g/mol
F	96485 C/mol
n	2
Taxa Corrosão	2,36838E-09 g/cm²/seg
Taxa anual	0,074689136 g/cm²/ano

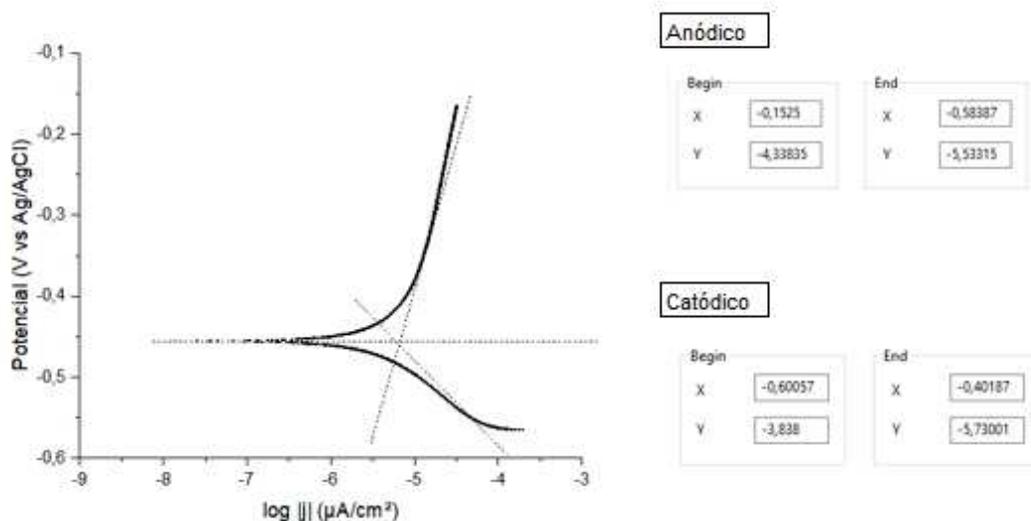
## Monitoramento 035ADA2

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,46076	-0,45996	-0,45908
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	96817,07	98023,81	94707,24
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,4544	-0,45336	-0,45136
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	89704,06	89363,87	89336,55
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,40861	-0,40308	-0,39986
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	97142,54	91678,13	94230,8

21° Dia				
	Potencial (V)	-0,43085	-0,4239	-0,41889
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	104519,3	103379	102060,3
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,3326079	-0,3272079	-0,3242807
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	110331,02	111237,5467	109896,686
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,4301505	-0,4256418	-0,4242276
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	97304,75	100025,6232	104512,687



Curvas de Tafel 035ADA2



Anódico	Início	Fim
X	-0,1525	-0,58387
Y	-4,33835	-5,53315

Constant B	
Ba	2769,780003 mV
Bc	9522,086393 mV
B	932,8927669 mV

Ba	2,76978
----	---------

Icorr	
B	932,8927669 mV
RP	106 $\text{k}\Omega\text{cm}^2$
Icorr	8,800875159 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log Icorr	0,944525861

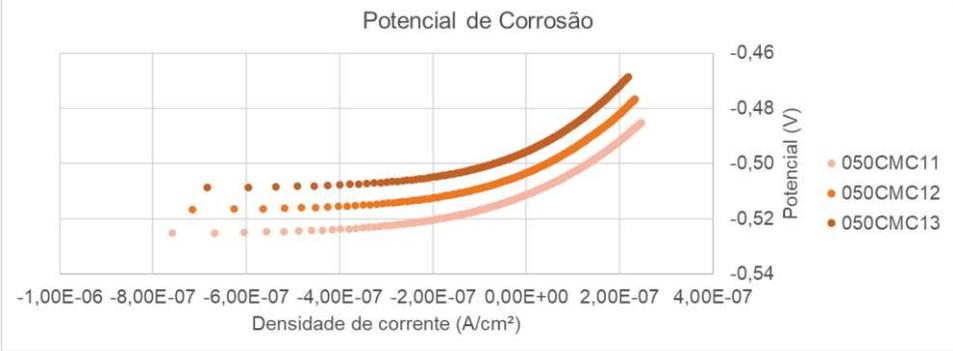
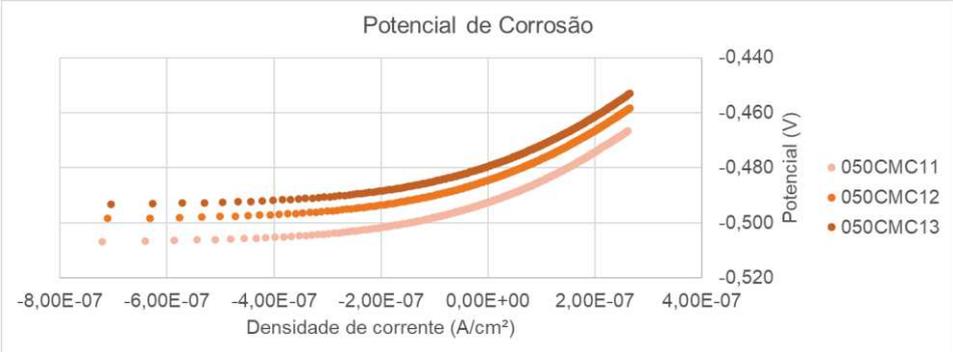
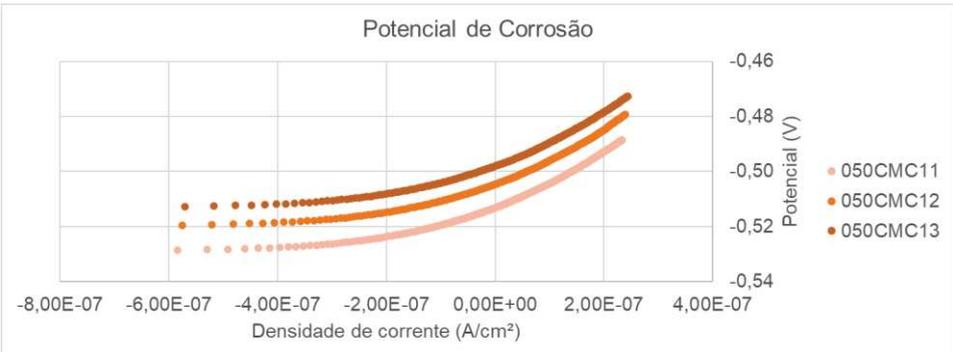
Catódico	Início	Fim
X	-0,60057	-0,40187
Y	-3,838	-5,73001

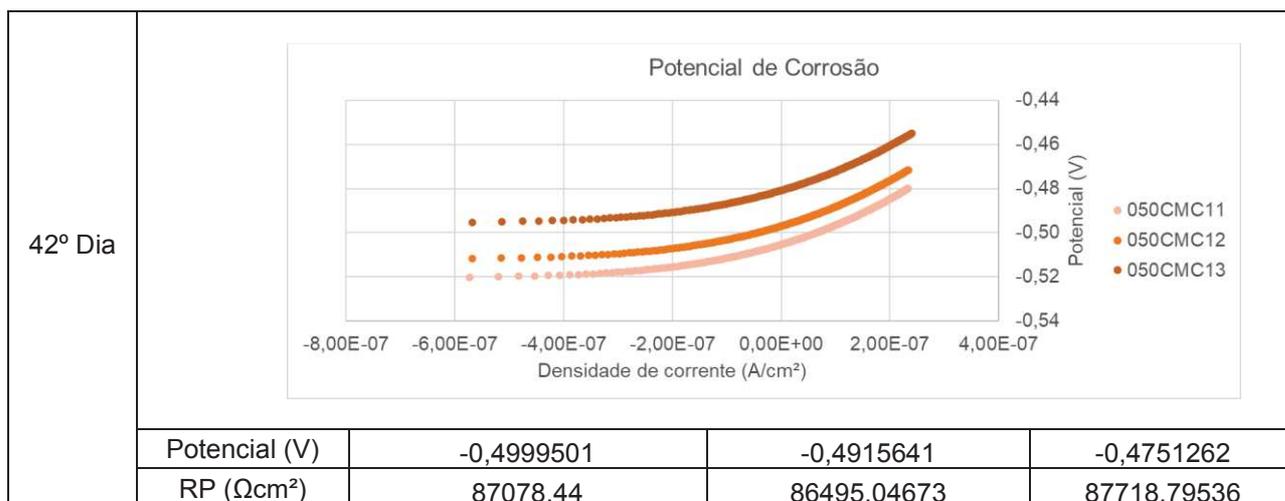
Bc	9,522086
----	----------

Taxa Corrosão $\text{g}/\text{cm}^2$	
Icorr	8,80088E-06 $\text{A}/\text{cm}^2$
M	68,35 $\text{g}/\text{mol}$
F	96485 $\text{C}/\text{mol}$
n	2
Taxa Corrosão	3,11727E-09 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$
Taxa anual	0,098306264 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$

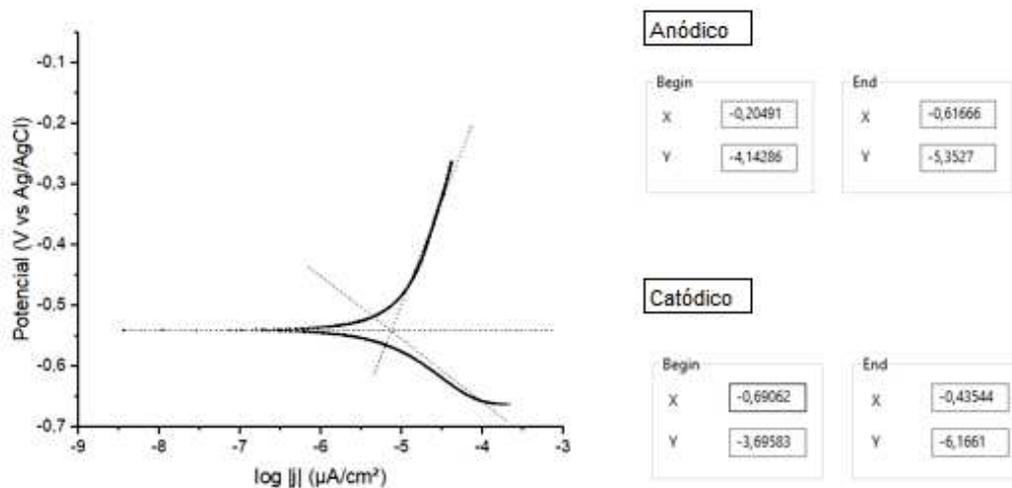
## Monitoramento 050CMC1

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,30995	-0,30754	-0,30718
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	203370,3	196717,6	192045,6
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,45112	-0,44908	-0,44719
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	129878,3	129489	128777,9
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,47045	-0,4672	-0,46536
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	111536,9	110360	110339,8

21° Dia	 <p>Potencial de Corrosão</p> <p>Y-axis: Potencial (V) from -0,54 to -0,46 X-axis: Densidade de corrente (A/cm²) from -1,00E-06 to 4,00E-07</p> <p>Legend: 050CMC11 (light orange), 050CMC12 (medium orange), 050CMC13 (dark orange)</p>			
	Potencial (V)	-0,50522	-0,49662	-0,48866
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	85442,12	95249,06	103260
28° Dia	 <p>Potencial de Corrosão</p> <p>Y-axis: Potencial (V) from -0,520 to -0,440 X-axis: Densidade de corrente (A/cm²) from -8,00E-07 to 4,00E-07</p> <p>Legend: 050CMC11 (light orange), 050CMC12 (medium orange), 050CMC13 (dark orange)</p>			
	Potencial (V)	-0,4866644	-0,4783555	-0,4731047
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	79426,84	82386,56567	82053,97641
35° Dia	 <p>Potencial de Corrosão</p> <p>Y-axis: Potencial (V) from -0,54 to -0,46 X-axis: Densidade de corrente (A/cm²) from -8,00E-07 to 4,00E-07</p> <p>Legend: 050CMC11 (light orange), 050CMC12 (medium orange), 050CMC13 (dark orange)</p>			
	Potencial (V)	-0,5085106	-0,4993829	-0,4926676
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	83932,16	86556,93082	83837,74663



## Curvas de Tafel 050CMC1



Anódico	Início	Fim
X	-0,20491	-0,61666
Y	-4,14286	-5,3527

Ba	2,938287796
----	-------------

Catódico	Início	Fim
X	-0,69062	-0,43544
Y	-3,69583	-6,1661

Bc	9,680500039
----	-------------

Constant B		
Ba	2938,287796	mV
Bc	9680,500039	mV
B	980,046423	mV

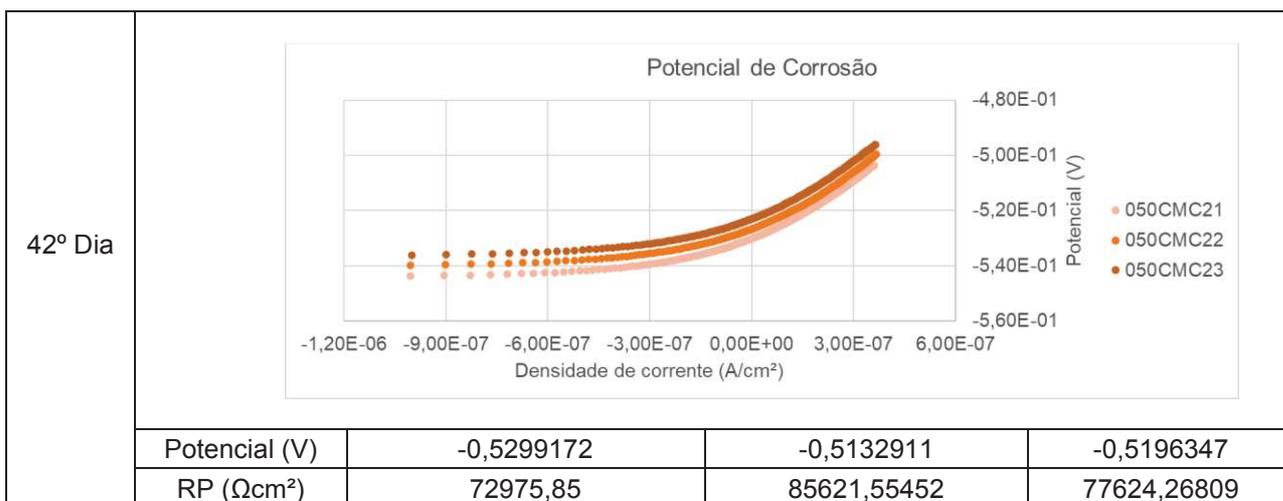
Icorr		
B	980,046423	mV
RP	87	k $\Omega\text{cm}^2$
Icorr	11,26490141	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log Icorr	1,051727395	

Taxa Corrosão g/cm²		
Icorr	1,12649E-05	A/cm²
M	68,35	g/mol
F	96485	C/mol
n	2	
Taxa Corrosão	3,99003E-09	g/cm²/seg
Taxa anual	0,125829573	g/cm²/ano

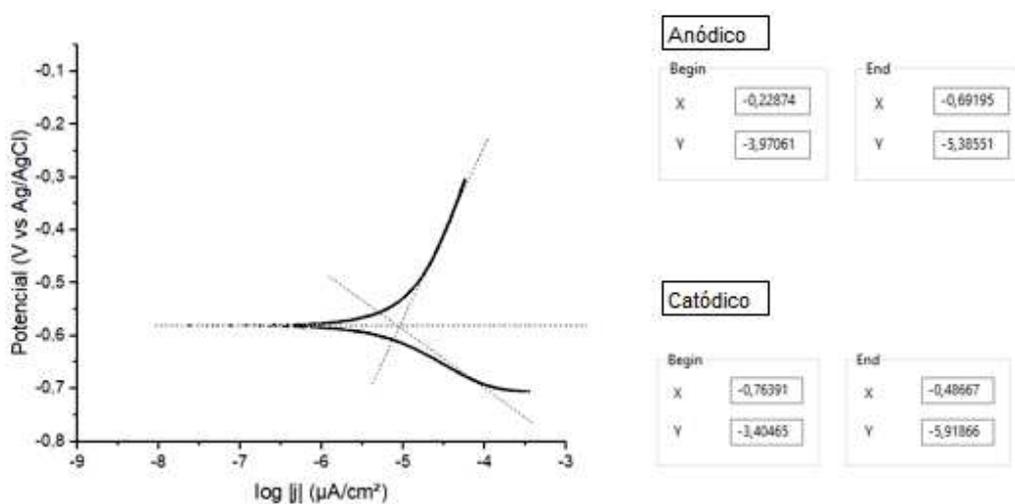
Monitoramento 050CMC2

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,33485	-0,33662	-0,34011
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	179912,8	178080,2	173009,9
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,37644	-0,37553	-0,37453
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	157976,2	158099,5	158068,2
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,53056	-0,52084	-0,51519
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	67801,08	68845,37	68974,73

21° Dia				
	Potencial (V)	-0,52394	-0,52097	-0,51975
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	67472,66	69163,23	71353,65
28° Dia				
	Potencial (V)	-0,5116498	-0,5069392	-0,504821
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	70254,87	71033,8848	72236,49104
35° Dia				
	Potencial (V)	-0,5236753	-0,5130163	-0,5061518
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	71712,87	71957,2964	69660,40982



Curvas de Tafel 050CMC2



Anódico	Início	Fim
X	-0,22874	-0,69195
Y	-3,97061	-5,38551

Ba	3,054554
----	----------

Catódico	Início	Fim
X	-0,76391	-0,48667
Y	-3,40465	-5,91866

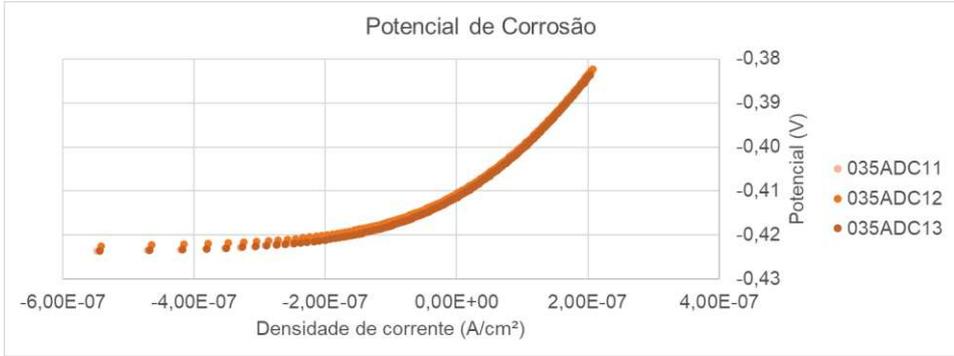
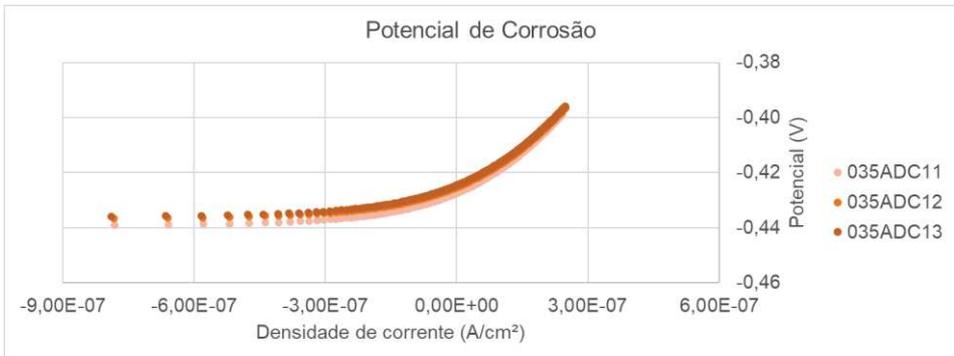
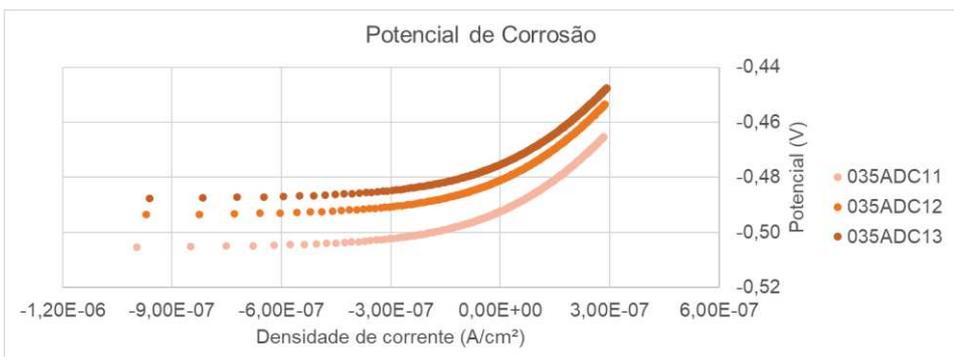
Bc	9,067992
----	----------

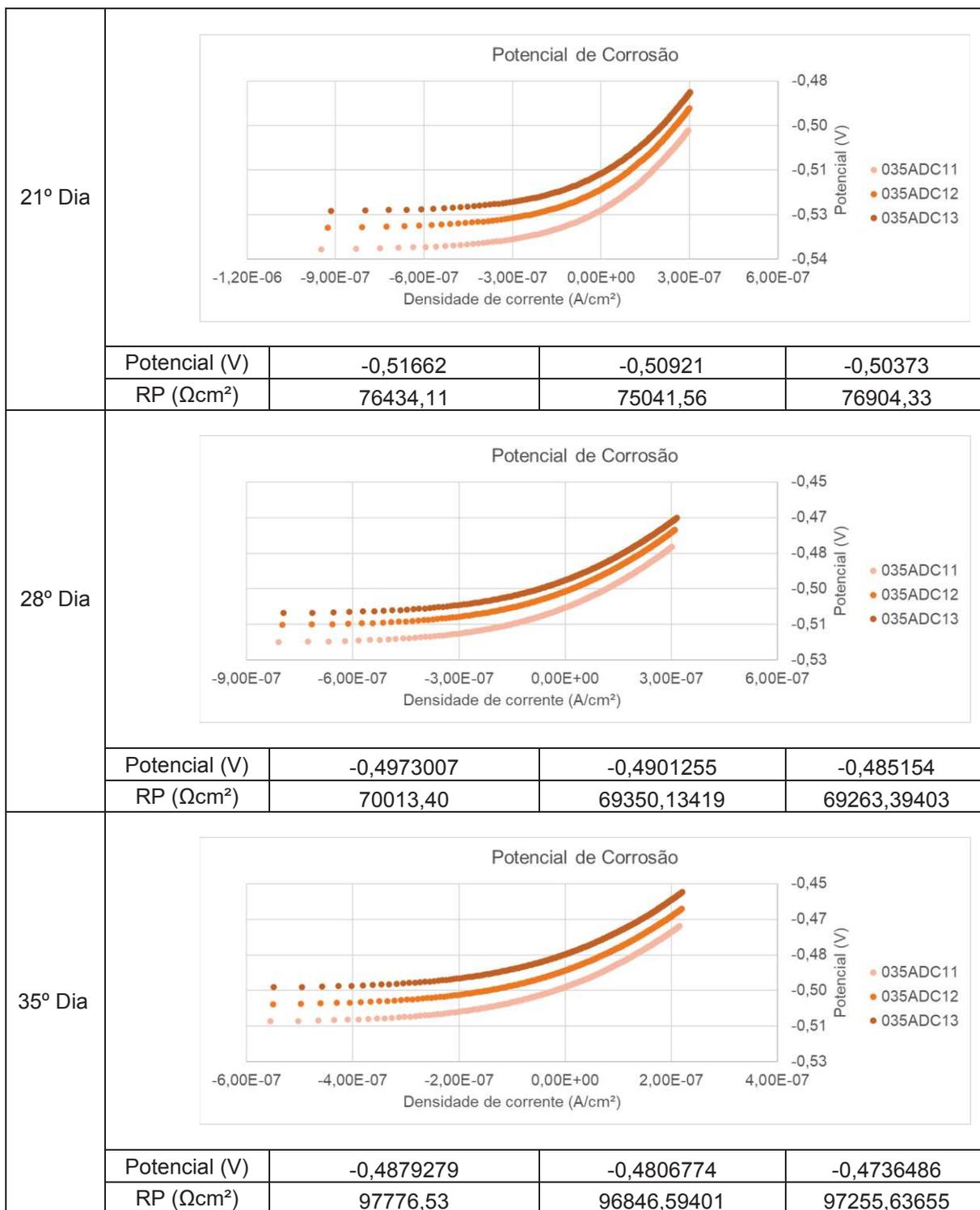
Constant B	
Ba	3054,55409 mV
Bc	9067,991632 mV
B	993,429984 mV

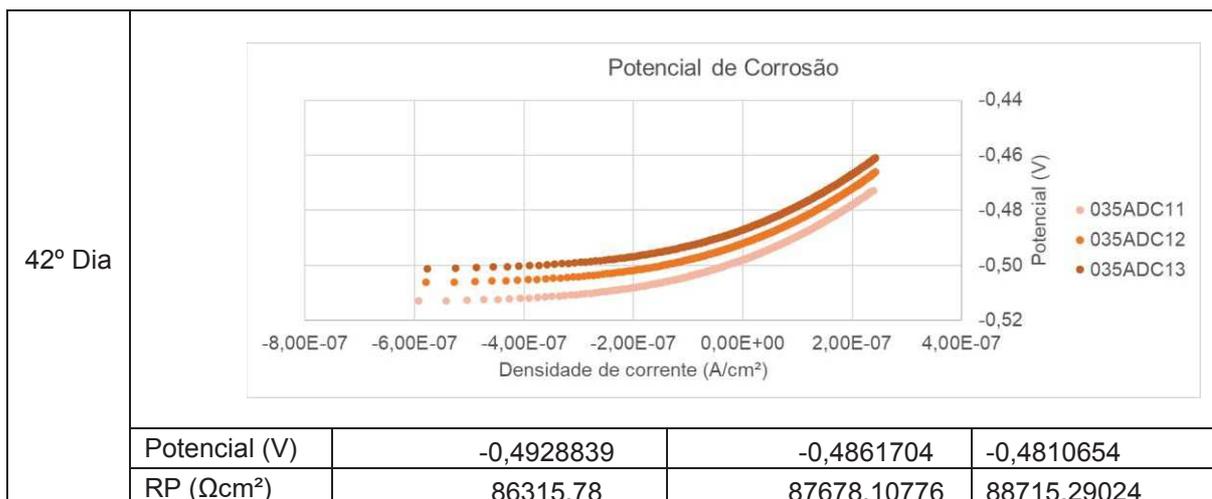
Icorr	
B	993,429984 mV
RP	61 $\text{k}\Omega\text{cm}^2$
Icorr	16,28573744 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log Icorr	1,211807429

Taxa Corrosão $\text{g}/\text{cm}^2$	
Icorr	1,62857E-05 $\text{A}/\text{cm}^2$
M	68,35 $\text{g}/\text{mol}$
F	96485 $\text{C}/\text{mol}$
n	2
Taxa Corrosão	5,76841E-09 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$
Taxa anual	0,18191259 $\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$

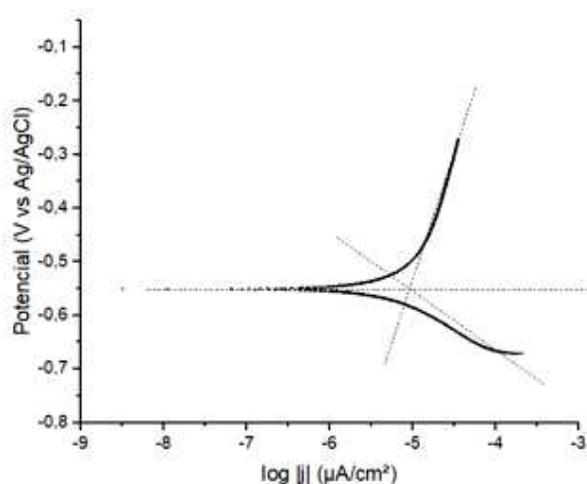
## Monitoramento 035ADC1

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,40361	-0,40244	-0,40356
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	119902,2	121554,8	119905
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,41897	-0,41658	-0,41592
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	104870,1	101958,7	102931,6
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,4852	-0,47348	-0,46751
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	79556,81	81669,67	82038,54





Curvas de Tafel 035ADFC1



Anódico

Begin		End	
X	-0,17673	X	-0,69067
Y	-4,23855	Y	-5,33493

Catódico

Begin		End	
X	-0,72931	X	-0,45207
Y	-3,42105	Y	-5,93506

Anódico		
	Início	Fim
X	-0,17673	-0,69067
Y	-4,23855	-5,33493

Ba	2,133284
----	----------

Catódico		
	Início	Fim
X	-0,72931	-0,45207
Y	-3,42105	-5,93506

Bc	9,067992
----	----------

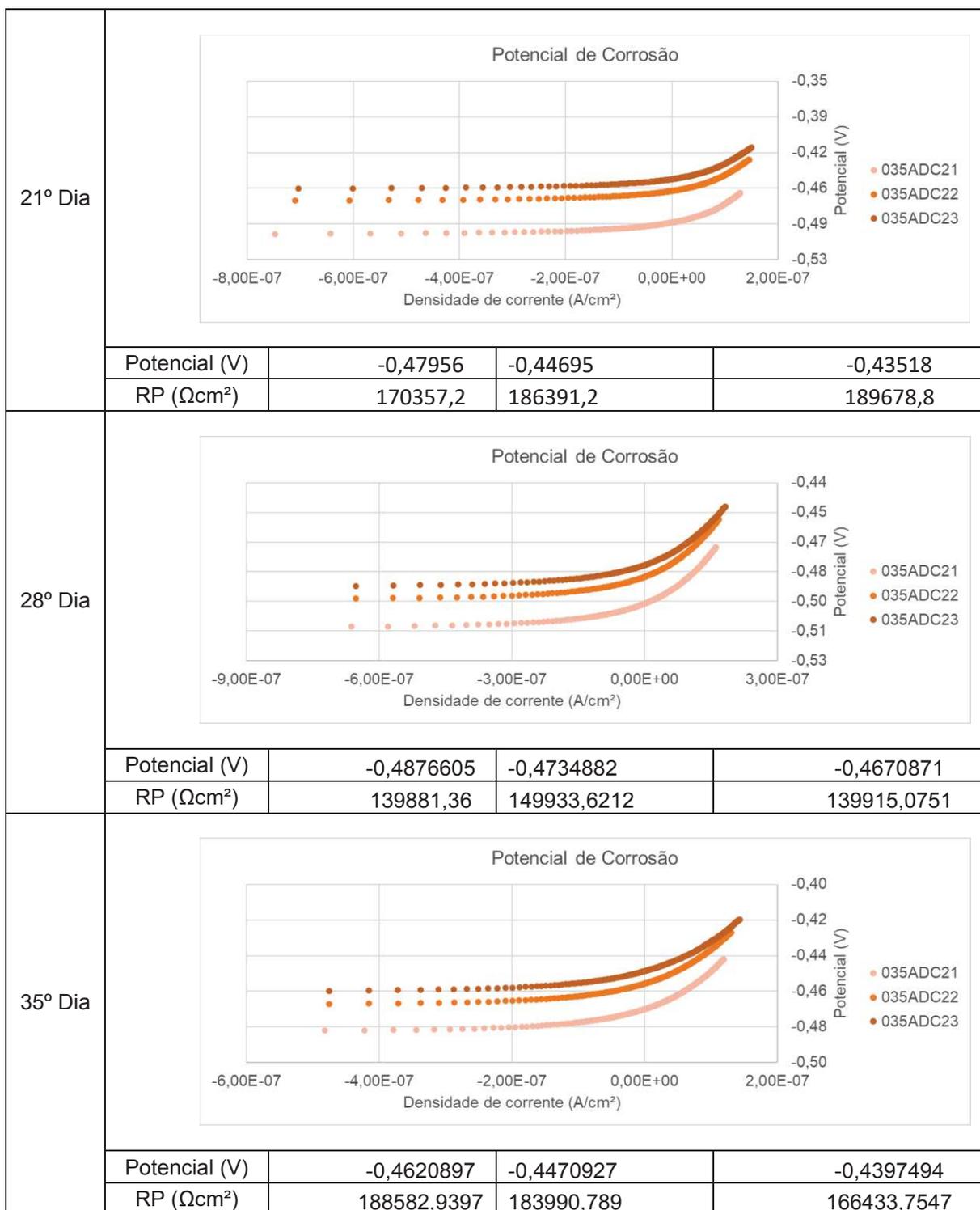
Constant B		
Ba	2133,284041	mV
Bc	9067,991632	mV
B	750,8695165	mV

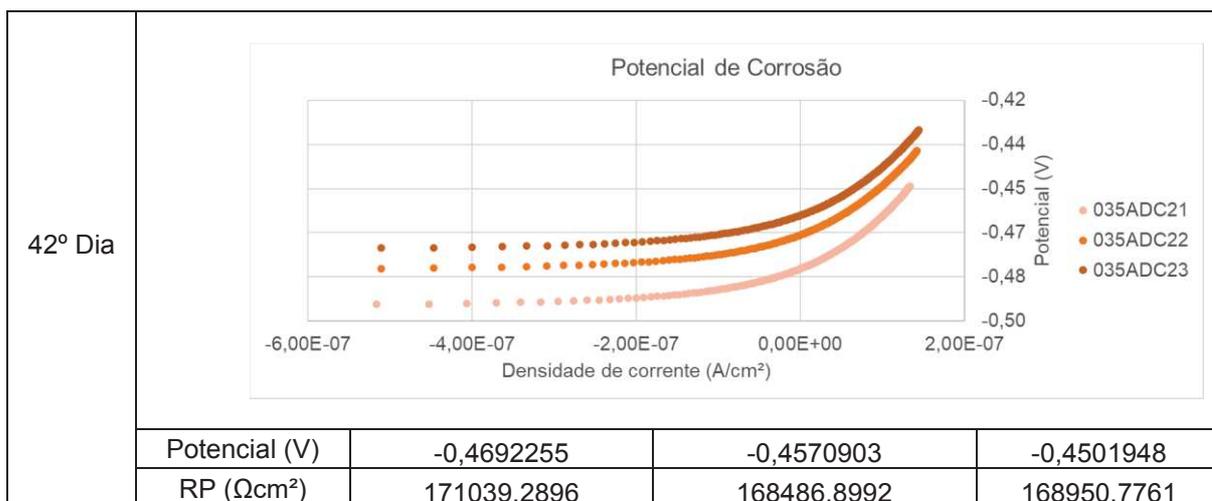
Icorr		
B	750,8695165	mV
RP	88	$\text{k}\Omega\text{cm}^2$
Icorr	8,532608142	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,931081801	

Taxa Corrosão $\text{g}/\text{cm}^2$		
Icorr	8,53261E-06	$\text{A}/\text{cm}^2$
M	68,35	$\text{g}/\text{mol}$
F	96485	$\text{C}/\text{mol}$
n	2	
Taxa Corrosão	3,02225E-09	$\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$
Taxa anual	0,095309706	$\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$

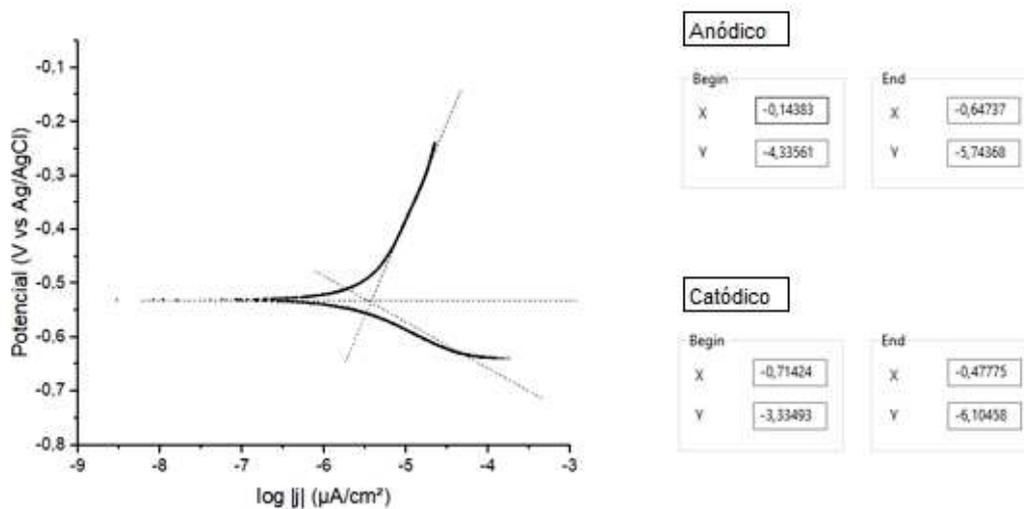
## Monitoramento 035ADC2

1º Dia				
	Potencial (V)	-0,5005011	-0,3039047	-0,4335722
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	-1434001903	15218396911	-23213679524
8º Dia				
	Potencial (V)	-0,33102	-0,32462	-0,31936
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	264824,1	265489,1	252292
15º Dia				
	Potencial (V)	-0,43259	-0,39906	-0,37972
	RP ( $\Omega\text{cm}^2$ )	239056,6	233799,9	225626,3





Curvas de Tafel 035ADC2



Anódico		
	Início	Fim
X	-0,14383	-0,64737
Y	-4,33561	-5,74368

Ba	2,796342
----	----------

Catódico		
	Início	Fim
X	-0,71424	-0,47775
Y	-3,33493	-6,10458

Bc	11,71149
----	----------

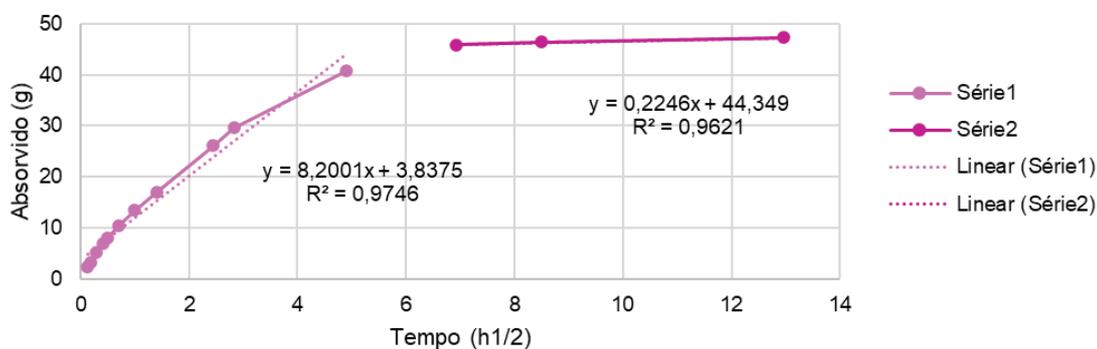
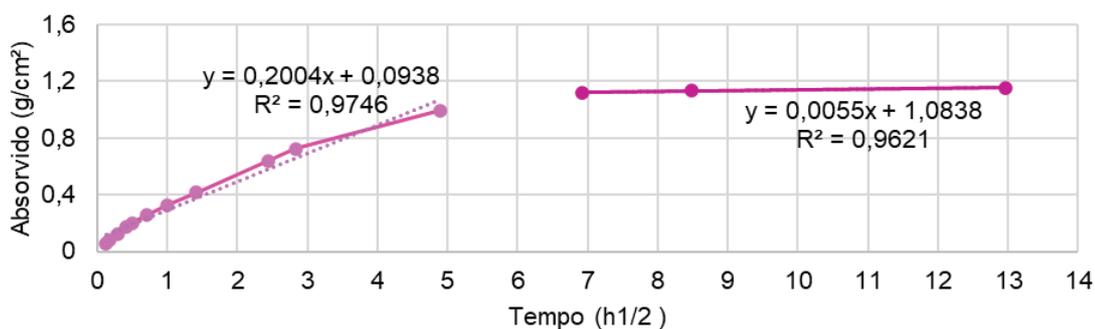
Constant B		
Ba	2796,341899	mV
Bc	11711,48886	mV
B	981,4587765	mV

Icorr		
B	981,4587765	mV
RP	169	$\text{k}\Omega\text{cm}^2$
Icorr	5,807448382	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
log icorr	0,763985358	

Taxa Corrosão $\text{g}/\text{cm}^2$		
Icorr	5,80745E-06	$\text{A}/\text{cm}^2$
M	68,35	$\text{g}/\text{mol}$
F	96485	$\text{C}/\text{mol}$
n	2	
Taxa Corrosão	2,057E-09	$\text{g}/\text{cm}^2/\text{seg}$
Taxa anual	0,06486952	$\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$

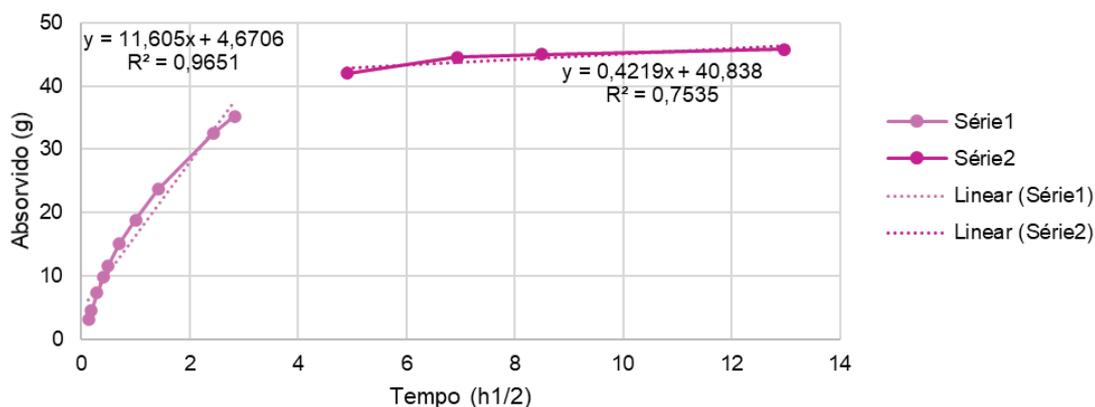
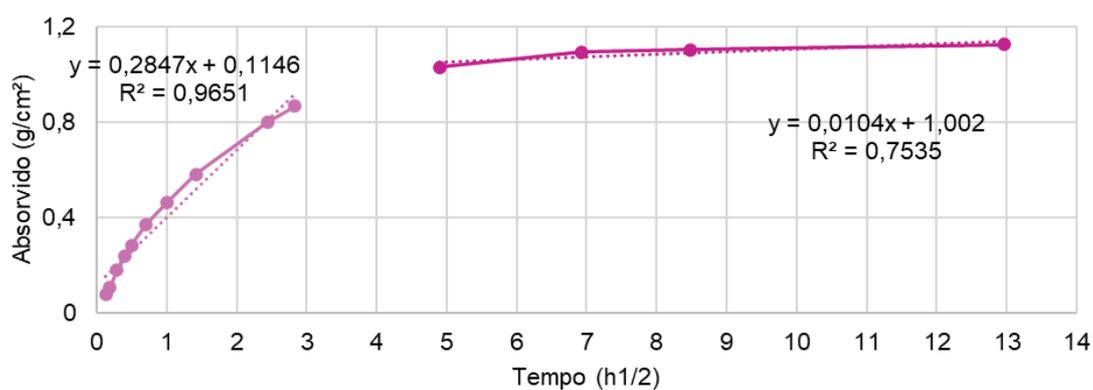
## APÊNDICE B

035ADFA1								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Area CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	185,8000	183,3700	2,4300	1,3252	40,9189	0,0594
2	0,0333	0,1826	186,7200	183,3700	3,3500	1,8269	40,9189	0,0819
5	0,0833	0,2887	188,5400	183,3700	5,1700	2,8194	40,9189	0,1263
10	0,1667	0,4082	190,3700	183,3700	7,0000	3,8174	40,9189	0,1711
15	0,2500	0,5000	191,5700	183,3700	8,2000	4,4718	40,9189	0,2004
30	0,5000	0,7071	193,8900	183,3700	10,5200	5,7370	40,9189	0,2571
60	1,0000	1,0000	196,8100	183,3700	13,4400	7,3294	40,9189	0,3285
120	2,0000	1,4142	200,4400	183,3700	17,0700	9,3090	40,9189	0,4172
360	6,0000	2,4495	209,4800	183,3700	26,1100	14,2390	40,9189	0,6381
480	8,0000	2,8284	212,9800	183,3700	29,6100	16,1477	40,9189	0,7236
1440	24,0000	4,8990	224,1000	183,3700	40,7300	22,2119	40,9189	0,9954
2880	48,0000	6,9282	229,1600	183,3700	45,7900	24,9714	40,9189	1,1190
4320	72,0000	8,4853	229,7800	183,3700	46,4100	25,3095	40,9189	1,1342
10080	168,0000	12,9615	230,5900	183,3700	47,2200	25,7512	40,9189	1,1540



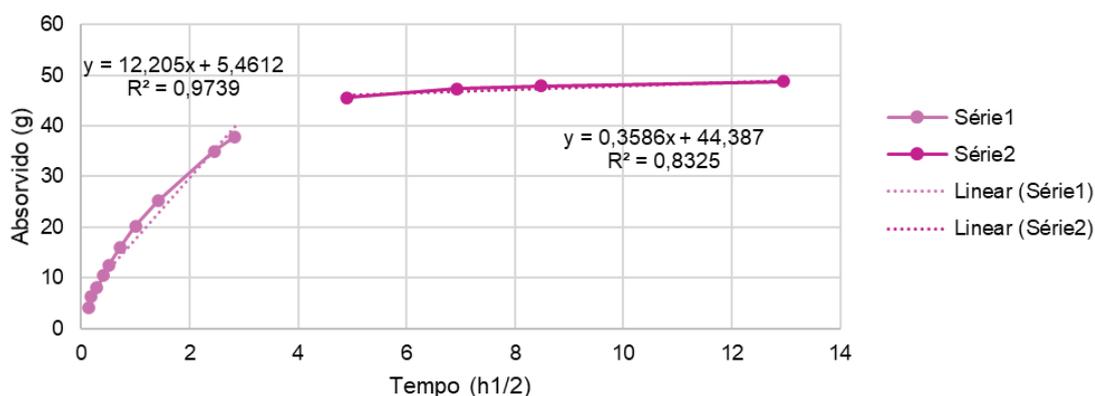
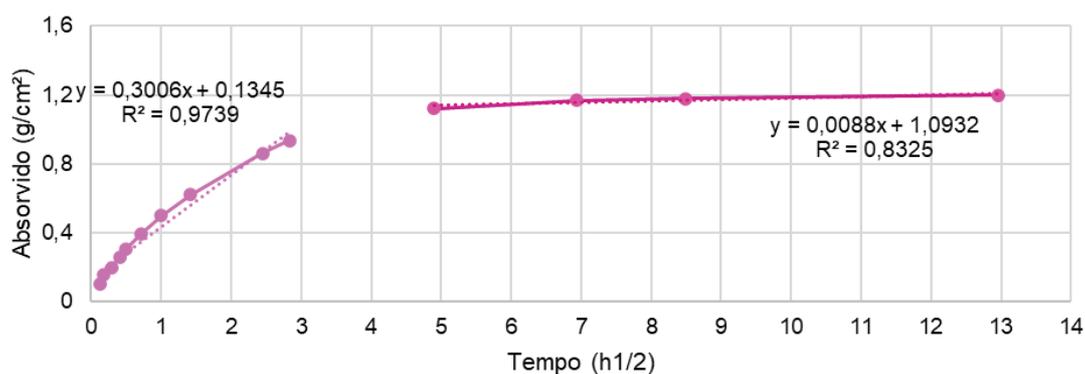
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	S(mm/h <sup>1/2</sup> )	t <sub>can</sub> (h <sup>1/2</sup> )
305,1068827	0,200398795	2,003987952	5,07949

035ADFA2								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	186,2800	183,1800	3,1000	1,6923	40,7575	0,0761
2	0,0333	0,1826	187,6300	183,1800	4,4500	2,4293	40,7575	0,1092
5	0,0833	0,2887	190,4600	183,1800	7,2800	3,9742	40,7575	0,1786
10	0,1667	0,4082	192,9800	183,1800	9,8000	5,3499	40,7575	0,2404
15	0,2500	0,5000	194,7600	183,1800	11,5800	6,3217	40,7575	0,2841
30	0,5000	0,7071	198,2800	183,1800	15,1000	8,2433	40,7575	0,3705
60	1,0000	1,0000	201,9900	183,1800	18,8100	10,2686	40,7575	0,4615
120	2,0000	1,4142	206,8500	183,1800	23,6700	12,9217	40,7575	0,5808
360	6,0000	2,4495	215,8100	183,1800	32,6300	17,8131	40,7575	0,8006
480	8,0000	2,8284	218,4500	183,1800	35,2700	19,2543	40,7575	0,8654
1440	24,0000	4,8990	225,1600	183,1800	41,9800	22,9173	40,7575	1,0300
2880	48,0000	6,9282	227,7600	183,1800	44,5800	24,3367	40,7575	1,0938
4320	72,0000	8,4853	228,1600	183,1800	44,9800	24,5551	40,7575	1,1036
10080	168,0000	12,9615	229,0300	183,1800	45,8500	25,0300	40,7575	1,1249



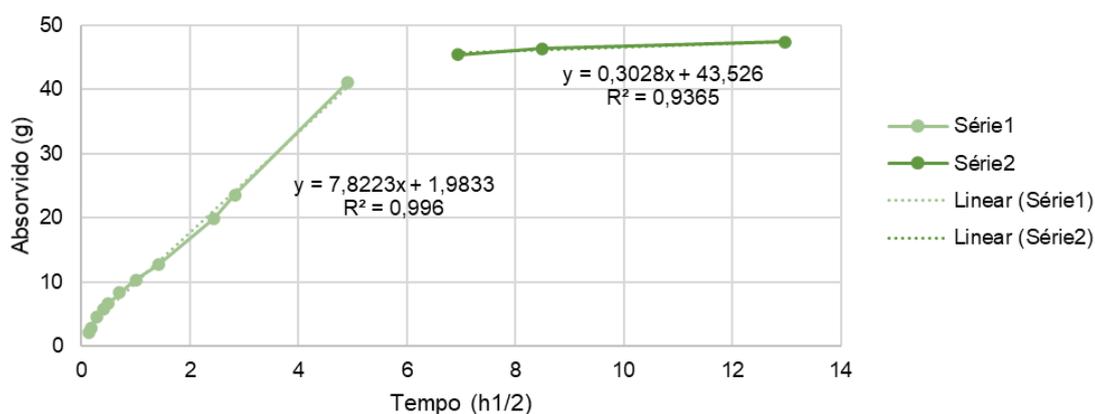
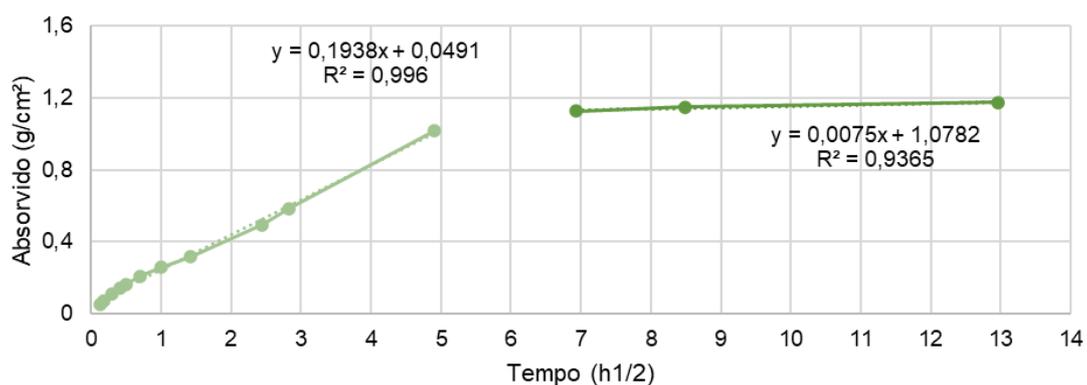
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	S(mm/h <sup>1/2</sup> )	t <sub>can</sub> (h <sup>1/2</sup> )
125,4342226	0,284732786	2,847327857	3,23411

035ADFA3								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Area CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	196,3600	192,3300	4,0300	2,0954	40,6026	0,0993
2	0,0333	0,1826	198,7300	192,3300	6,4000	3,3276	40,6026	0,1576
5	0,0833	0,2887	200,3000	192,3300	7,9700	4,1439	40,6026	0,1963
10	0,1667	0,4082	202,8700	192,3300	10,5400	5,4802	40,6026	0,2596
15	0,2500	0,5000	204,7700	192,3300	12,4400	6,4680	40,6026	0,3064
30	0,5000	0,7071	208,2400	192,3300	15,9100	8,2722	40,6026	0,3918
60	1,0000	1,0000	212,5300	192,3300	20,2000	10,5028	40,6026	0,4975
120	2,0000	1,4142	217,5200	192,3300	25,1900	13,0973	40,6026	0,6204
360	6,0000	2,4495	227,3000	192,3300	34,9700	18,1823	40,6026	0,8613
480	8,0000	2,8284	230,2200	192,3300	37,8900	19,7005	40,6026	0,9332
1440	24,0000	4,8990	237,8600	192,3300	45,5300	23,6729	40,6026	1,1214
2880	48,0000	6,9282	239,7100	192,3300	47,3800	24,6347	40,6026	1,1669
4320	72,0000	8,4853	240,1800	192,3300	47,8500	24,8791	40,6026	1,1785
10080	168,0000	12,9615	241,0500	192,3300	48,7200	25,3315	40,6026	1,1999



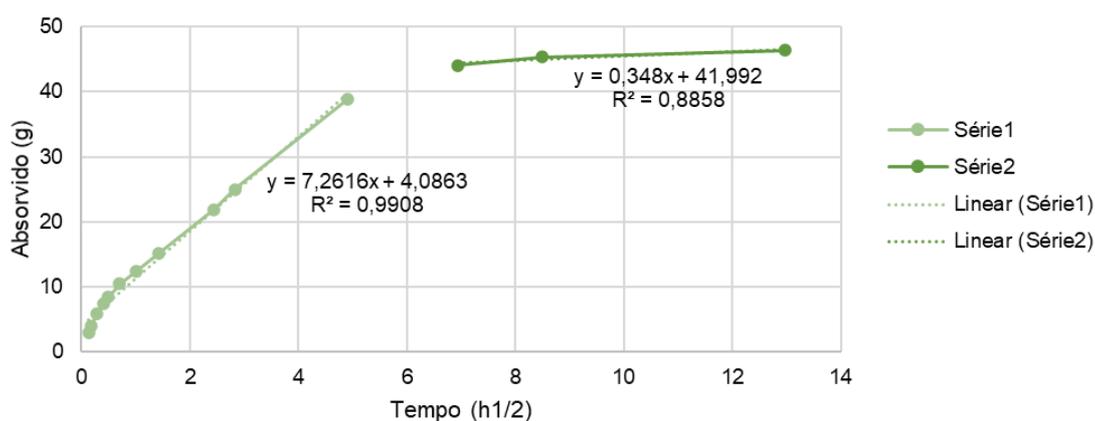
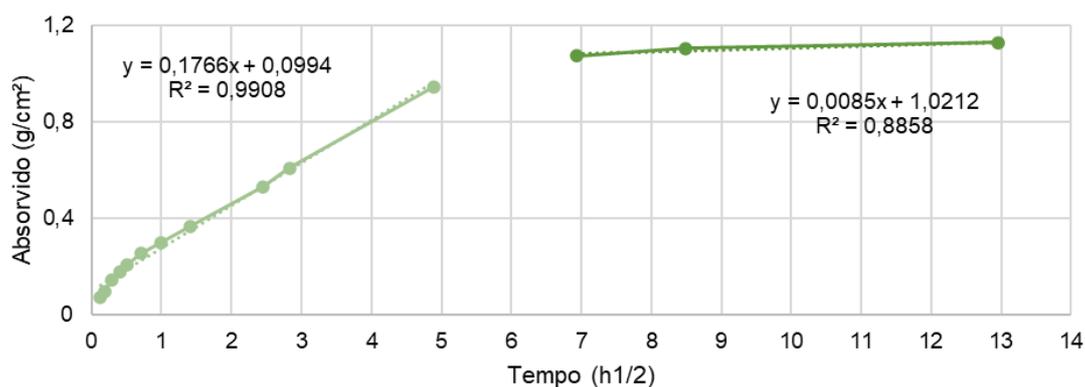
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	S(mm/h <sup>1/2</sup> )	t <sub>cap</sub> (h <sup>1/2</sup> )
113,4222154	0,300596323	3,005963232	3,28588

035ADF1								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	196,3600	192,3300	4,0300	2,0954	40,6026	0,0993
2	0,0333	0,1826	198,7300	192,3300	6,4000	3,3276	40,6026	0,1576
5	0,0833	0,2887	200,3000	192,3300	7,9700	4,1439	40,6026	0,1963
10	0,1667	0,4082	202,8700	192,3300	10,5400	5,4802	40,6026	0,2596
15	0,2500	0,5000	204,7700	192,3300	12,4400	6,4680	40,6026	0,3064
30	0,5000	0,7071	208,2400	192,3300	15,9100	8,2722	40,6026	0,3918
60	1,0000	1,0000	212,5300	192,3300	20,2000	10,5028	40,6026	0,4975
120	2,0000	1,4142	217,5200	192,3300	25,1900	13,0973	40,6026	0,6204
360	6,0000	2,4495	227,3000	192,3300	34,9700	18,1823	40,6026	0,8613
480	8,0000	2,8284	230,2200	192,3300	37,8900	19,7005	40,6026	0,9332
1440	24,0000	4,8990	237,8600	192,3300	45,5300	23,6729	40,6026	1,1214
2880	48,0000	6,9282	239,7100	192,3300	47,3800	24,6347	40,6026	1,1669
4320	72,0000	8,4853	240,1800	192,3300	47,8500	24,8791	40,6026	1,1785
10080	168,0000	12,9615	241,0500	192,3300	48,7200	25,3315	40,6026	1,1999



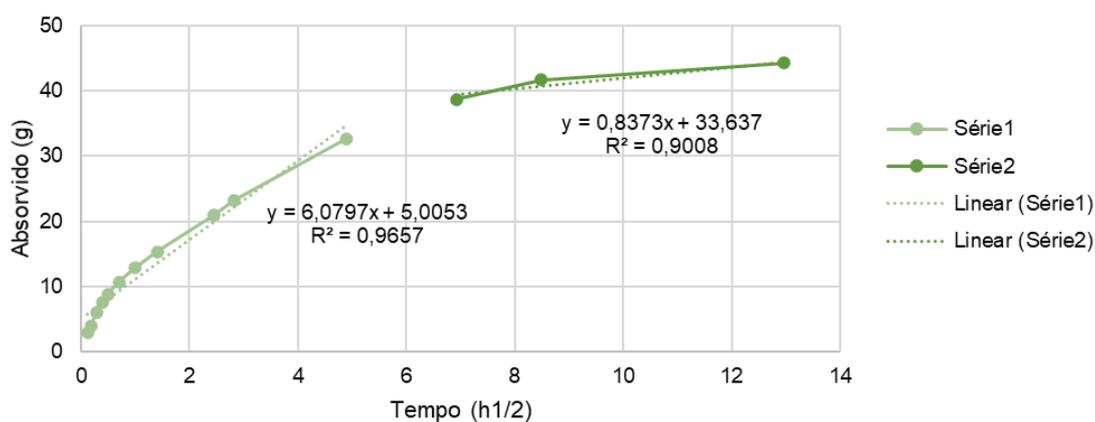
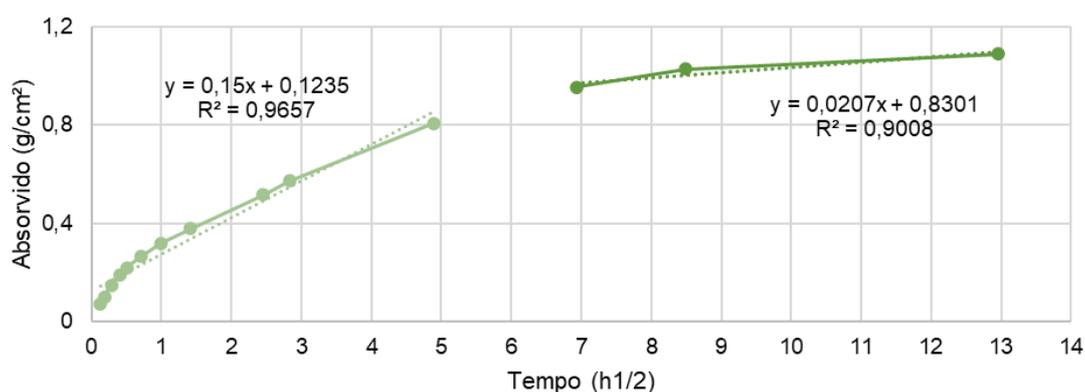
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	S(mm/h <sup>1/2</sup> )	t <sub>cap</sub> (h <sup>1/2</sup> )
359,8564982	0,193765573	1,937655733	5,52466

035ADF2								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	181,7600	178,7600	3,0000	1,6782	41,1216	0,0730
2	0,0333	0,1826	182,7700	178,7600	4,0100	2,2432	41,1216	0,0975
5	0,0833	0,2887	184,6500	178,7600	5,8900	3,2949	41,1216	0,1432
10	0,1667	0,4082	186,2100	178,7600	7,4500	4,1676	41,1216	0,1812
15	0,2500	0,5000	187,2100	178,7600	8,4500	4,7270	41,1216	0,2055
30	0,5000	0,7071	189,2200	178,7600	10,4600	5,8514	41,1216	0,2544
60	1,0000	1,0000	191,1500	178,7600	12,3900	6,9311	41,1216	0,3013
120	2,0000	1,4142	193,8400	178,7600	15,0800	8,4359	41,1216	0,3667
360	6,0000	2,4495	200,6500	178,7600	21,8900	12,2455	41,1216	0,5323
480	8,0000	2,8284	203,7600	178,7600	25,0000	13,9852	41,1216	0,6080
1440	24,0000	4,8990	217,6100	178,7600	38,8500	21,7330	41,1216	0,9448
2880	48,0000	6,9282	222,8400	178,7600	44,0800	24,6588	41,1216	1,0719
4320	72,0000	8,4853	224,1400	178,7600	45,3800	25,3860	41,1216	1,1036
10080	168,0000	12,9615	225,1500	178,7600	46,3900	25,9510	41,1216	1,1281



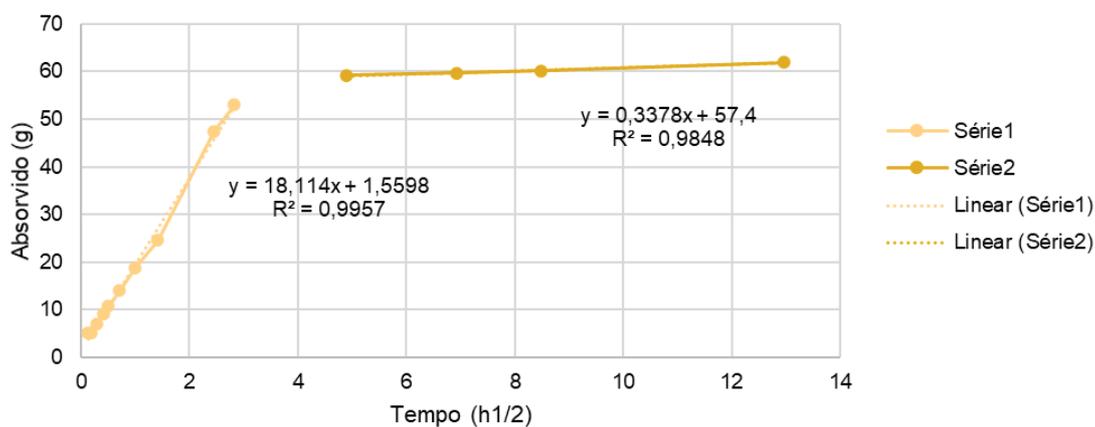
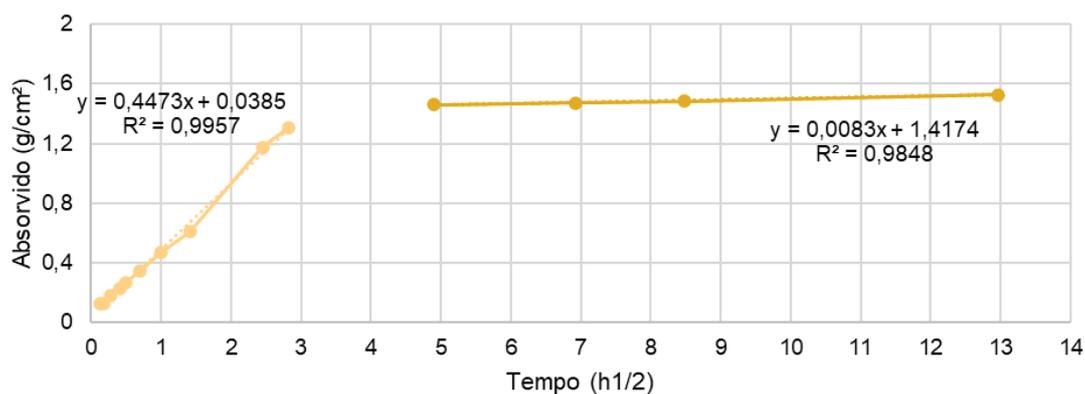
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h1/2)	S(mm/h1/2)	t <sub>cap</sub> (H1/2)
361,3346802	0,176588607	1,765886066	5,48277

035ADF3								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	190,7300	187,8800	2,8500	1,5169	40,5234	0,0703
2	0,0333	0,1826	191,8800	187,8800	4,0000	2,1290	40,5234	0,0987
5	0,0833	0,2887	193,8300	187,8800	5,9500	3,1669	40,5234	0,1468
10	0,1667	0,4082	195,5300	187,8800	7,6500	4,0717	40,5234	0,1888
15	0,2500	0,5000	196,7200	187,8800	8,8400	4,7051	40,5234	0,2181
30	0,5000	0,7071	198,5400	187,8800	10,6600	5,6738	40,5234	0,2631
60	1,0000	1,0000	200,7700	187,8800	12,8900	6,8608	40,5234	0,3181
120	2,0000	1,4142	203,2300	187,8800	15,3500	8,1701	40,5234	0,3788
360	6,0000	2,4495	208,8200	187,8800	20,9400	11,1454	40,5234	0,5167
480	8,0000	2,8284	211,1200	187,8800	23,2400	12,3696	40,5234	0,5735
1440	24,0000	4,8990	220,5900	187,8800	32,7100	17,4100	40,5234	0,8072
2880	48,0000	6,9282	226,6000	187,8800	38,7200	20,6089	40,5234	0,9555
4320	72,0000	8,4853	229,5900	187,8800	41,7100	22,2003	40,5234	1,0293
10080	168,0000	12,9615	232,1200	187,8800	44,2400	23,5469	40,5234	1,0917



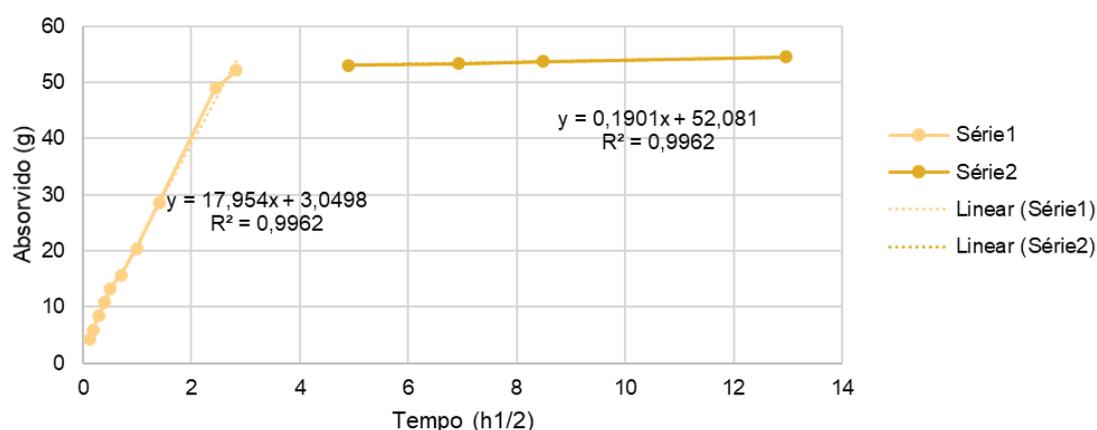
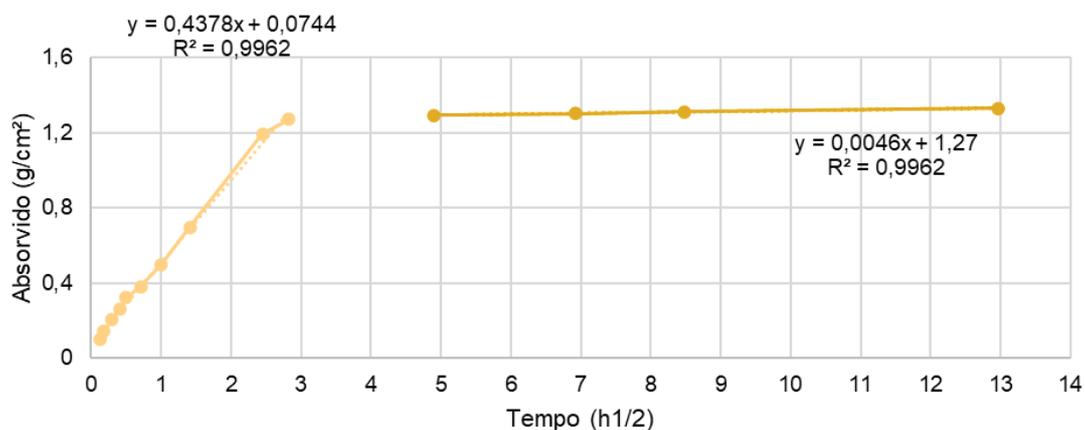
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h1/2)	S(mm/h1/2)	t <sub>cap</sub> (H1/2)
332,7594271	0,150029429	1,500294288	5,46156

050CMFA1								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	190,7300	187,8800	2,8500	1,5169	40,5234	0,0703
2	0,0333	0,1826	191,8800	187,8800	4,0000	2,1290	40,5234	0,0987
5	0,0833	0,2887	193,8300	187,8800	5,9500	3,1669	40,5234	0,1468
10	0,1667	0,4082	195,5300	187,8800	7,6500	4,0717	40,5234	0,1888
15	0,2500	0,5000	196,7200	187,8800	8,8400	4,7051	40,5234	0,2181
30	0,5000	0,7071	198,5400	187,8800	10,6600	5,6738	40,5234	0,2631
60	1,0000	1,0000	200,7700	187,8800	12,8900	6,8608	40,5234	0,3181
120	2,0000	1,4142	203,2300	187,8800	15,3500	8,1701	40,5234	0,3788
360	6,0000	2,4495	208,8200	187,8800	20,9400	11,1454	40,5234	0,5167
480	8,0000	2,8284	211,1200	187,8800	23,2400	12,3696	40,5234	0,5735
1440	24,0000	4,8990	220,5900	187,8800	32,7100	17,4100	40,5234	0,8072
2880	48,0000	6,9282	226,6000	187,8800	38,7200	20,6089	40,5234	0,9555
4320	72,0000	8,4853	229,5900	187,8800	41,7100	22,2003	40,5234	1,0293
10080	168,0000	12,9615	232,1200	187,8800	44,2400	23,5469	40,5234	1,0917



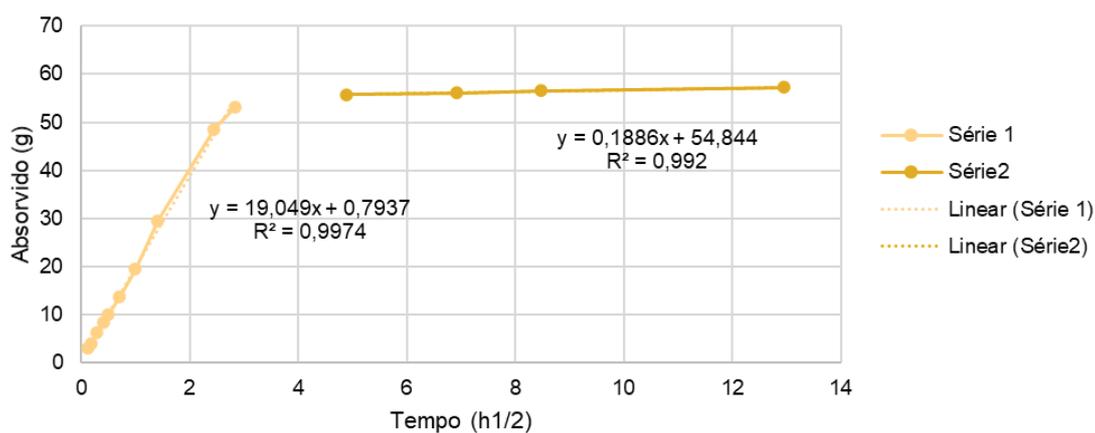
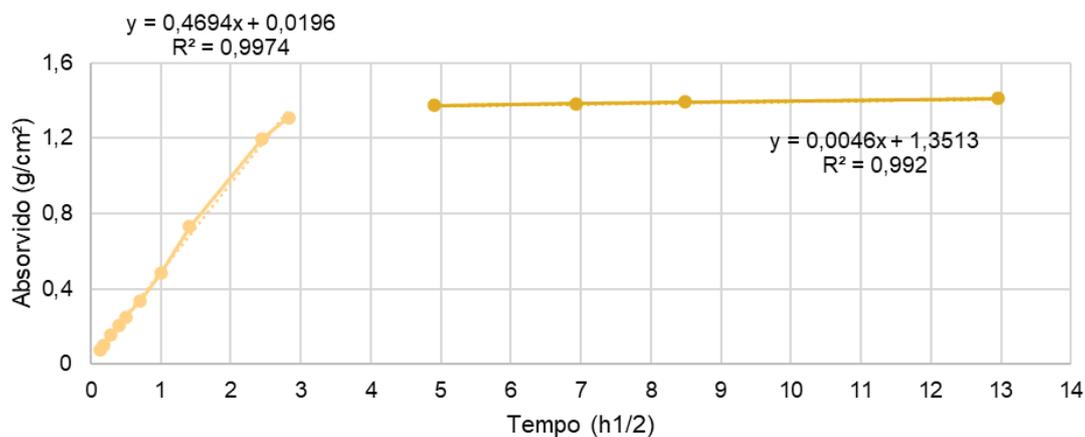
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h/2)	S(mm/h/2)	t <sub>cap</sub> (H/2)
108,1221378	0,44728919	4,472891897	3,14129

050CMFA2								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	190,7300	187,8800	2,8500	1,5169	40,5234	0,0703
2	0,0333	0,1826	191,8800	187,8800	4,0000	2,1290	40,5234	0,0987
5	0,0833	0,2887	193,8300	187,8800	5,9500	3,1669	40,5234	0,1468
10	0,1667	0,4082	195,5300	187,8800	7,6500	4,0717	40,5234	0,1888
15	0,2500	0,5000	196,7200	187,8800	8,8400	4,7051	40,5234	0,2181
30	0,5000	0,7071	198,5400	187,8800	10,6600	5,6738	40,5234	0,2631
60	1,0000	1,0000	200,7700	187,8800	12,8900	6,8608	40,5234	0,3181
120	2,0000	1,4142	203,2300	187,8800	15,3500	8,1701	40,5234	0,3788
360	6,0000	2,4495	208,8200	187,8800	20,9400	11,1454	40,5234	0,5167
480	8,0000	2,8284	211,1200	187,8800	23,2400	12,3696	40,5234	0,5735
1440	24,0000	4,8990	220,5900	187,8800	32,7100	17,4100	40,5234	0,8072
2880	48,0000	6,9282	226,6000	187,8800	38,7200	20,6089	40,5234	0,9555
4320	72,0000	8,4853	229,5900	187,8800	41,7100	22,2003	40,5234	1,0293
10080	168,0000	12,9615	232,1200	187,8800	44,2400	23,5469	40,5234	1,0917



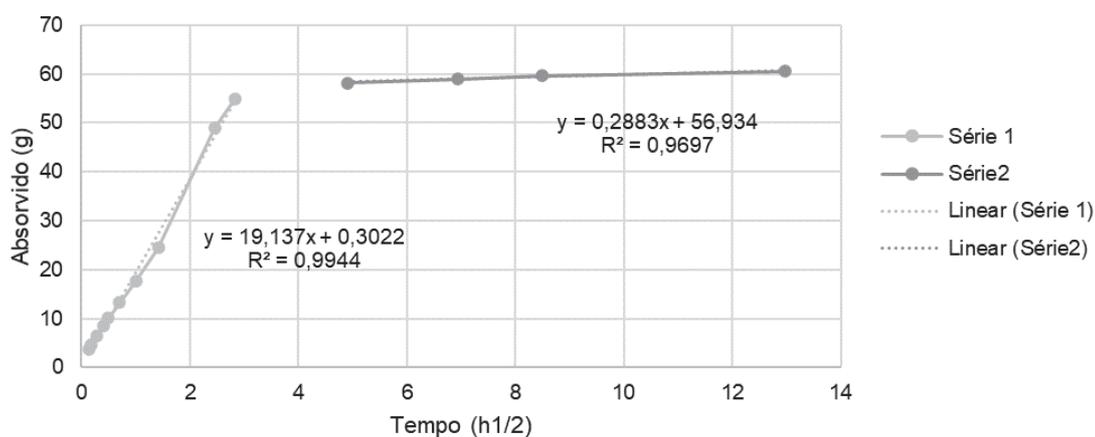
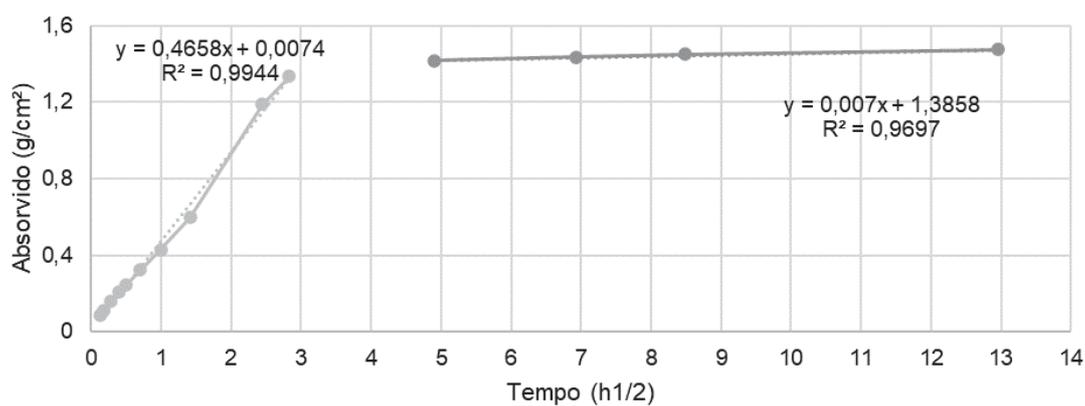
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h1/2)	S(mm/h1/2)	t <sub>cap</sub> (H1/2)
98,86202043	0,437814554	4,378145538	2,76016

050CMFA3								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Area CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	157,8600	154,7200	3,1400	2,0295	40,5851	0,0774
2	0,0333	0,1826	158,8600	154,7200	4,1400	2,6758	40,5851	0,1020
5	0,0833	0,2887	160,9800	154,7200	6,2600	4,0460	40,5851	0,1542
10	0,1667	0,4082	163,1700	154,7200	8,4500	5,4615	40,5851	0,2082
15	0,2500	0,5000	164,8500	154,7200	10,1300	6,5473	40,5851	0,2496
30	0,5000	0,7071	168,4700	154,7200	13,7500	8,8870	40,5851	0,3388
60	1,0000	1,0000	174,2700	154,7200	19,5500	12,6357	40,5851	0,4817
120	2,0000	1,4142	184,3300	154,7200	29,6100	19,1378	40,5851	0,7296
360	6,0000	2,4495	203,3200	154,7200	48,6000	31,4116	40,5851	1,1975
480	8,0000	2,8284	207,7600	154,7200	53,0400	34,2813	40,5851	1,3069
1440	24,0000	4,8990	210,4700	154,7200	55,7500	36,0328	40,5851	1,3737
2880	48,0000	6,9282	210,8300	154,7200	56,1100	36,2655	40,5851	1,3825
4320	72,0000	8,4853	211,2500	154,7200	56,5300	36,5370	40,5851	1,3929
10080	168,0000	12,9615	211,9800	154,7200	57,2600	37,0088	40,5851	1,4109



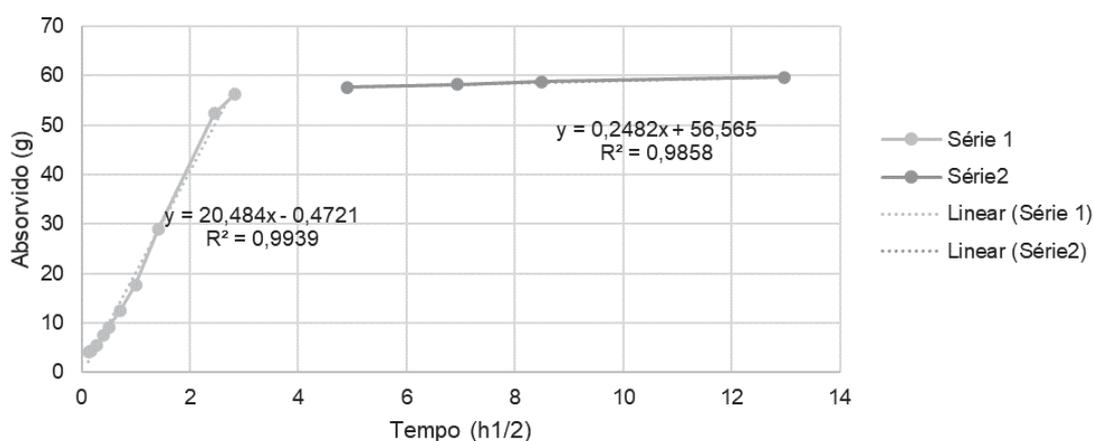
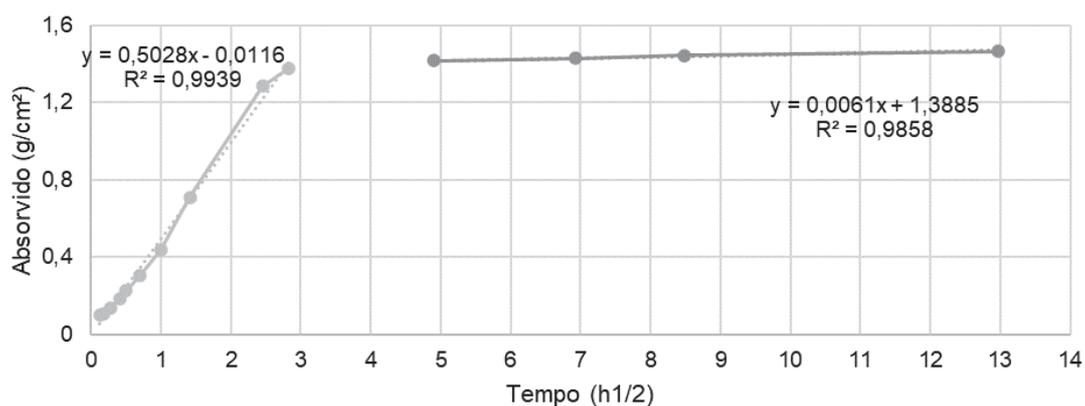
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h1/2)	S(mm/h1/2)	t <sub>cap</sub> (H1/2)
100,1496626	0,469359862	4,693598618	2,86581

050CMF1								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	159,0800	155,4000	3,6800	2,3681	41,0827	0,0896
2	0,0333	0,1826	160,0000	155,4000	4,6000	2,9601	41,0827	0,1120
5	0,0833	0,2887	161,8900	155,4000	6,4900	4,1763	41,0827	0,1580
10	0,1667	0,4082	163,9800	155,4000	8,5800	5,5212	41,0827	0,2088
15	0,2500	0,5000	165,4800	155,4000	10,0800	6,4865	41,0827	0,2454
30	0,5000	0,7071	168,6600	155,4000	13,2600	8,5328	41,0827	0,3228
60	1,0000	1,0000	173,0500	155,4000	17,6500	11,3578	41,0827	0,4296
120	2,0000	1,4142	179,9100	155,4000	24,5100	15,7722	41,0827	0,5966
360	6,0000	2,4495	204,3100	155,4000	48,9100	31,4736	41,0827	1,1905
480	8,0000	2,8284	210,2700	155,4000	54,8700	35,3089	41,0827	1,3356
1440	24,0000	4,8990	213,6000	155,4000	58,2000	37,4517	41,0827	1,4167
2880	48,0000	6,9282	214,3500	155,4000	58,9500	37,9344	41,0827	1,4349
4320	72,0000	8,4853	215,0200	155,4000	59,6200	38,3655	41,0827	1,4512
10080	168,0000	12,9615	215,9600	155,4000	60,5600	38,9704	41,0827	1,4741



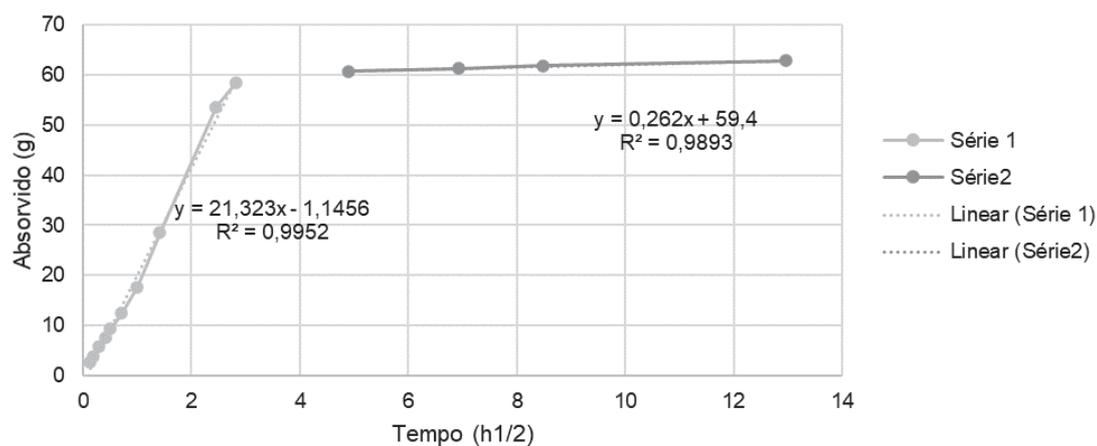
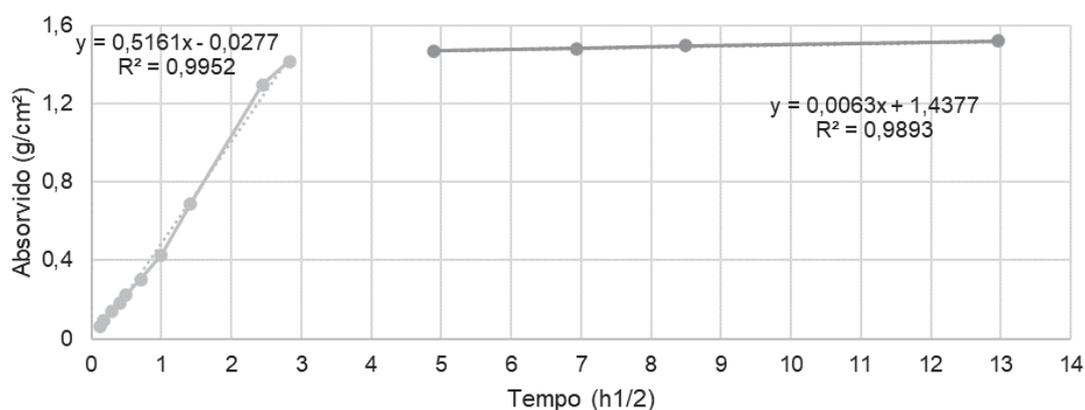
R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h/2)	S(mm/h/2)	t <sub>cap</sub> (H/2)
107,5377637	0,465815947	4,658159468	3,00455

050CMF2								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	160,8600	156,8200	4,0400	2,5762	40,7384	0,0992
2	0,0333	0,1826	161,0900	156,8200	4,2700	2,7229	40,7384	0,1048
5	0,0833	0,2887	162,3800	156,8200	5,5600	3,5455	40,7384	0,1365
10	0,1667	0,4082	164,3700	156,8200	7,5500	4,8144	40,7384	0,1853
15	0,2500	0,5000	166,0300	156,8200	9,2100	5,8730	40,7384	0,2261
30	0,5000	0,7071	169,2700	156,8200	12,4500	7,9390	40,7384	0,3056
60	1,0000	1,0000	174,5900	156,8200	17,7700	11,3315	40,7384	0,4362
120	2,0000	1,4142	185,7000	156,8200	28,8800	18,4160	40,7384	0,7089
360	6,0000	2,4495	209,1700	156,8200	52,3500	33,3822	40,7384	1,2850
480	8,0000	2,8284	212,9700	156,8200	56,1500	35,8054	40,7384	1,3783
1440	24,0000	4,8990	214,5300	156,8200	57,7100	36,8002	40,7384	1,4166
2880	48,0000	6,9282	215,0900	156,8200	58,2700	37,1573	40,7384	1,4303
4320	72,0000	8,4853	215,6400	156,8200	58,8200	37,5080	40,7384	1,4438
10080	168,0000	12,9615	216,5400	156,8200	59,7200	38,0819	40,7384	1,4659



R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h1/2)	S(mm/h1/2)	t <sub>cap</sub> (H1/2)
92,29603499	0,502817746	5,028177462	2,77196

050CMF3								
t (min)	t (hora)	t (raiz hora)	Peso (g)	Peso seco (g)	Absorvido (g)	Absorvido (%)	Área CP (cm <sup>2</sup> )	Absorvido (g/cm <sup>2</sup> )
1	0,0167	0,1291	169,9600	167,2200	2,7400	1,6386	41,3163	0,0663
2	0,0333	0,1826	171,0200	167,2200	3,8000	2,2725	41,3163	0,0920
5	0,0833	0,2887	173,0100	167,2200	5,7900	3,4625	41,3163	0,1401
10	0,1667	0,4082	174,7800	167,2200	7,5600	4,5210	41,3163	0,1830
15	0,2500	0,5000	176,5400	167,2200	9,3200	5,5735	41,3163	0,2256
30	0,5000	0,7071	179,7100	167,2200	12,4900	7,4692	41,3163	0,3023
60	1,0000	1,0000	184,9400	167,2200	17,7200	10,5968	41,3163	0,4289
120	2,0000	1,4142	195,7100	167,2200	28,4900	17,0374	41,3163	0,6896
360	6,0000	2,4495	220,7300	167,2200	53,5100	31,9998	41,3163	1,2951
480	8,0000	2,8284	225,6100	167,2200	58,3900	34,9181	41,3163	1,4132
1440	24,0000	4,8990	227,8400	167,2200	60,6200	36,2516	41,3163	1,4672
2880	48,0000	6,9282	228,4200	167,2200	61,2000	36,5985	41,3163	1,4813
4320	72,0000	8,4853	228,9800	167,2200	61,7600	36,9334	41,3163	1,4948
10080	168,0000	12,9615	229,9600	167,2200	62,7400	37,5194	41,3163	1,5185



R(h/m <sup>2</sup> )	S(g/cm <sup>2</sup> .h1/2)	S(mm/h1/2)	t <sub>cap</sub> (H1/2)
80,78866072	0,516091617	5,160916172	2,76598