

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

VINÍCIUS JOSÉ SICHIERI

**AVALIAÇÃO DA CORROSÃO INTERGRANULAR DA LIGA DE ALUMÍNIO  
7050-T7451 INFLUENCIADA PELO FLUIDO DE CORTE À BASE DE ÓLEO  
DE PINHÃO-MANSO - *JATROPHA CURCAS***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA  
2015

VINICIUS JOSÉ SICHIERI

**AVALIAÇÃO DA CORROSÃO INTERGRANULAR DA LIGA DE ALUMÍNIO  
7050-T7451 INFLUENCIADA PELO FLUIDO DE CORTE À BASE DE ÓLEO  
DE PINHÃO-MANSO - *JATROPHA CURCAS***

Defesa do trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Andreato  
Batista Mendes.

LONDRINA

2015



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia de Materiais



## TERMO DE APROVAÇÃO

**AVALIAÇÃO DA CORROSÃO INTERGRANULAR DA LIGA DE ALUMÍNIO 7050-T7451 INFLUENCIADA  
PELO FLUIDO DE CORTE À BASE DE ÓLEO DE PINHÃO-MANSO - *JATROPHA CURCAS***

Vinícius José Sichieri

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 11 de junho de 2015 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

---

Prof. Dr. Cleberson Cipriano de Paula  
(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof. Dr. Lucas Freitas Berti  
(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes  
(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)  
Orientador

---

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por permitir chegar a esse estágio de minha vida, providenciando para que me fosse concedido saúde, sabedoria, dedicação e fé.

Aos meus pais que tornaram essa conquista possível dando todo o respaldo financeiro e, mais importante, todo o suporte emocional para vencer mais essa etapa.

Às minhas irmãs que sempre ajudaram em minha educação e compartilharam conquistas, servindo como exemplo de luta e dedicação.

À minha namorada que soube suportar com sabedoria todos os momentos de estresse e desespero, nunca deixando faltar amor e palavras de carinho para tornar esses momentos menos desagradáveis e custosos.

A todos os amigos que aqui fiz, desde aqueles que dividi toda caminhada até àqueles que dividi apenas a mesa do restaurante universitário durante alguns minutos, ter convivido com vocês foi um aprendizado para a vida e agradeço a Deus por tê-los conhecido. Que seja apenas o começo de uma amizade que dure a vida toda!

Ao meu orientador que, além de ser calmo e paciente, emprestou parte de seu tempo e conhecimento, mostrando o caminho menos dificultoso rumo ao sucesso acadêmico.

Ao amigo e técnico responsável por laboratórios, sem colaboração à qual não seria possível o término do presente trabalho dentro do prazo estipulado.

Um agradecimento especial à professora Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves por disponibilizar os materiais utilizados durante a realização do trabalho bem como pelo auxílio na realização de algumas fases do projeto.

A todos vocês meu MUITO OBRIGADO!

Que Deus os abençoe.

## RESUMO

SICHERI, V. J. **Avaliação da corrosão intergranular da liga de alumínio 7050-T7451 influenciada pelo fluido de corte à base de óleo de Pinhão-manso – *Jatropha curcas***. 2015. 75 f. Exame de qualificação do trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

O alumínio faz parte da aviação comercial desde seus primórdios. Estudar e compreender as ligas de alumínio bem como as ações do tempo e dos esforços que o material sofre durante seu processamento e vida útil é de fundamental importância para entregar a segurança necessária nas aplicações em aeronaves. O efeito da corrosão por meio do fluido de corte a base de óleo de Pinhão-manso usado durante a usinagem de peças da liga de alumínio 7050-T7451 que compõe a estrutura de aviões é o foco do estudo realizado. Foi realizada também uma simulação de corrosão através de um sistema fechado a fim de comparar amostras submetidas em água e em fluido de corte. Através de microscopia óptica foi possível analisar as bordas das amostras e analisar os fenômenos de corrosão presentes nessas regiões. Concluiu-se que o fluido de corte não possui influência significativa na corrosão intergranular, porém, uma análise mais aprofundada utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) seria necessária para identificação dos pontos de interesse identificados nas amostras.

**Palavras-chave:** Liga de Alumínio 7050-T7451. Corrosão intergranular. Fluido de corte. *Jatropha curcas*

## ABSTRACT

SICHERI, V. J. **Evaluating intergranular corrosion of aluminium alloy 7050-T7451 influenced by the cutting fluid based on *Jatropha curcas* oil.** 2015. 75 f. Exame de qualificação do trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

Aluminium is part of commercial aviation since its beginning. Study and understand the aluminium alloys as well as the time shares and effort that the material undergoes during processing and shelf life is of fundamental importance to deliver the necessary security for applications in aircraft. The effect of corrosion by cutting fluid to *Jatropha* oil base used during machining of 7050-T7451 aluminium alloy parts that make up the structure of aircraft is the focus of performed study. A simulation of corrosion was conducted by a closed system in order to compare samples submitted in water and cutting fluid. By light microscopy were used to analyze the edges of the samples and analyze the corrosion phenomena in those regions. It was concluded that the cutting fluid has no significant influence on the intergranular corrosion, however, further analysis using Scanning Electron Microscopy (SEM) would be needed to characterize the points of interest identified in the samples.

**Palavras-chave:** Aluminium alloy 7050-T7451. Intergranular corrosion. Cutting Fluid. *Jatropha curcas*.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais ligas de alumínio. Fonte: Brandt, J. L., 1984 (STARKE e STALEY, 1996).	11
Figura 2 - Microestrutura da liga AA7050-T7451. Fonte: <a href="http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000105">http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000105</a> .	16
Figura 3 - Microestrutura da liga AA7050-T7451. Fonte: (ROSSINO, ASHIUCHI, <i>et al.</i> )	17
Figura 4: Diagrama de Pourbaix do alumínio. Potencial (V/EPH) versus pH a 25 °C, assumindo uma camada passiva de alumínio composta pelo $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ . Fonte (FERRARI, 2011)	19
Figura 5 - Aspecto da corrosão por pite em amostras de alumínio em 0,1M NaCl por 72 horas. Fonte: S. De et al - Corrosion Science 52 (2010) 1818-1823	20
Figura 6 - <i>End grain pits</i> - Pites profundos nos contornos de grão (à esquerda) e diferentes tipos de pite (à direita): Fonte: (ALONSO-FALLEIROS, 2013).	21
Figura 7 - Efeito da corrosão intergranular na liga Al-Cu-Mg-Ag: Aumento (a) 100 vezes, (b) 20 vezes. Fonte: X.Y. Liu et al. Journal of Alloys and Compounds 639 (2015) 263–267.	22
Figura 8 - Fluxograma do procedimento de realização do experimento. Fonte: Autoria própria.	23
Figura 9 - Dimensões da peça de alumínio. Fonte: Autoria própria.	25
Figura 10 - Sistema de refluxo para simulação de corrosão. Fonte: Autoria própria.	26
Figura 11 - Barras pré corte das amostras. Fonte: Autoria própria.	27
Figura 12 - 12 amostras após o corte. Fonte: Autoria própria.	27
Figura 13 - Amostras polidas e prontas para serem inseridas no sistema corrosivo. Fonte: Autoria própria.	27
Figura 14 - Amostra devidamente marcadas. Fonte: Autoria própria.	28
Figura 15 – Seis amostras nos balões com fluido de corte, à esquerda, e seis amostras no balão com água, à direita. Fonte: Autoria própria.	29
Figura 16 - Uma amostra no balão com fluido e corte, a esquerda, e uma amostra no balão apenas com água, a direita. Fonte: Autoria própria.	29
Figura 17 - Avaria no equipamento. Fonte: Autoria própria.	30

Figura 18 - Amostras serradas em seção transversal após período de corrosão. Fonte: Autoria própria.	30
Figura 19 - As 17 amostras após ataque químico. Fonte: Autoria própria.	32
Figura 20 - Sistema de referência para identificação da borda analisada: a) Superior, b) Inferior, c) Esquerda e d) Direita. Fonte: Autoria própria.	33
Figura 21 - Grão alongados provenientes do processo de laminação da amostra 06F14. Fonte: Autoria própria.	35
Figura 22 - 07A14 - Amostra sem ataque químico. Aumento de 200 vezes. Fonte: Autoria própria.	36
Figura 23 - 07A14 - Amostra sem ataque químico. Aumento de 500 vezes. Fonte: Autoria própria.	37
Figura 24 - 07A14 - Amostra sem ataque químico. Aumento de 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	37
Figura 25 - Microestrutura da amostra RE-00 – Região Central – Aumento de 100 vezes. Fonte: Autoria própria.	38
Figura 26 - Microestrutura da amostra RE-00 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	39
Figura 27 - Microestrutura da amostra RE-00 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	40
Figura 28 - Microestrutura da amostra RE-00 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	41
Figura 29 - Microestrutura da amostra RE-00 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	41
Figura 30 - Micrografia da amostra 03A07 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	42
Figura 31 - Micrografia da amostra 08F07 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	43
Figura 32 - Micrografia da amostra 03A07 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	44
Figura 33 - Micrografia da amostra 08F07 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	44
Figura 34 - Micrografia da amostra 03A07 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	45
Figura 35 - Micrografia da amostra 08F07 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.	45

- Figura 36 - Micrografia da amostra 03A07 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 46
- Figura 37 - Micrografia da amostra 08F07 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 46
- Figura 38 - Micrografia da amostra 02F14 – Borda Direita - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 47
- Figura 39 - Micrografia da amostra 07A14 – Borda Direita - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 48
- Figura 40 - Micrografia da amostra 02F14 – Borda Esquerda - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 49
- Figura 41 - Micrografia da amostra 07A14 – Borda Esquerda - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 49
- Figura 42 - Micrografia da amostra 02F14 – Borda Superior - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 50
- Figura 43 - Micrografia da amostra 07A14 – Borda Superior - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 51
- Figura 44 - Micrografia da amostra 02F14 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 52
- Figura 45 - Micrografia da amostra 07A14 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 52
- Figura 46 - Micrografia da amostra 01A35 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 53
- Figura 47 - Micrografia da amostra 12F35 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 54
- Figura 48 - Micrografia da amostra 01A35 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 55
- Figura 49 - Micrografia da amostra 12F35 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 55
- Figura 50 - Micrografia da amostra 01A35 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 56
- Figura 51 - Micrografia da amostra 12F35 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 57
- Figura 52 - Micrografia da amostra 01A35 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 58
- Figura 53 - Micrografia da amostra 12F35 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 58

- Figura 54 – Micrografias das amostra L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita) – Falha no equipamento. Aquecimento até 450 °C. Aumento de 50 vezes. Fonte: Autoria própria. 60
- Figura 55 - Micrografia da amostra L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita) – Borda Esquerda – Falha no equipamento. Aquecimento até 450 °C. Aumento de 200 vezes. Fonte: Autoria própria. 60
- Figura 56 - Micrografia da amostra L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita) – Borda Esquerda – Falha no equipamento. Aquecimento até 450 °C. Aumento de 500 vezes. Fonte: Autoria própria. 61
- Figura 57 - Micrografia da amostra L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita) – Borda Esquerda – Falha no equipamento. Aquecimento até 450 °C. Aumento de 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 61
- Figura 58 - Amostra 04F07 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 70
- Figura 59 - Amostra 04F07 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 70
- Figura 60 - Amostra 04F07 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 70
- Figura 61 - Amostra 04F07 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 70
- Figura 62 - Amostra 05A07 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 71
- Figura 63 - Amostra 05A07 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 71
- Figura 64 - Amostra 05A07 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 71
- Figura 65 - Amostra 05A07 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 71
- Figura 66 - Amostra 06F14 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 72
- Figura 67 - Amostra 06F14 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 72
- Figura 68 - Amostra 06F14 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 72
- Figura 69 - Amostra 06F14 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 72
- Figura 70 - Amostra 09A07 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 73

- Figura 71 - Amostra 09A07 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 73
- Figura 72 - Amostra 09A07 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 73
- Figura 73 - Amostra 09A07 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 73
- Figura 74 - Amostra 10F07 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 74
- Figura 75 - Amostra 10F07 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 74
- Figura 76 - Amostra 10F07 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 74
- Figura 77 - Amostra 10F07 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 74
- Figura 78 - Amostra 11A14 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 75
- Figura 79 - Amostra 11A14 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 75
- Figura 80 - Amostra 11A14 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 75
- Figura 81 - Amostra 11A14 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria. 75

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Propriedades do fluido de corte Pinhão-manso.....	10
<b>Tabela 2:</b> Comparativo entre as propriedades físicas do alumínio, aço e cobre .....	11
<b>Tabela 3:</b> Composição AA7050-T7451.....	12
<b>Tabela 4:</b> Propriedades físicas e mecânicas da liga AA7050-T7451.....	12
<b>Tabela 5</b> - Tabela com o período de retirada de cada amostra.....	31
<b>Tabela 6</b> – Planejamento para comparação entre amostras. ....	34
<b>Tabela 7</b> - Legenda para interpretação dos resultados. ....	35

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
1.1.1. Objetivos Gerais .....	8
1.1.2. Objetivos Específicos .....	8
<b>1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>8</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. USINAGEM .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Fluido de corte a base de óleo de Pinhão-manso. ....	9
<b>2.2. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....</b>	<b>10</b>
2.2.1. Composição química da liga e suas principais propriedades ...	12
2.2.2. Tratamento térmico T7451 .....	13
2.2.3. Ductilidade do alumínio puro.....	13
2.2.4. Efeito dos elementos de liga .....	15
2.2.5 Microestrutura da liga de alumínio 7050-T7451 .....	15
<b>2.3. CORROSÃO .....</b>	<b>17</b>
2.3.1. Tipos de corrosão .....	17
2.3.2. Passividade do alumínio metálico .....	18
2.3.3. Corrosão por Pite.....	19
2.3.4. Corrosão intergranular .....	20
<b>3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA PESQUISA .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. FLUXOGRAMA .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2. EQUIPAMENTOS E VIDRARIAS UTILIZADAS .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3. METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
4.1.1. Amostras sem ataque químico.....	36
4.1.2. Amostra RE-00 .....	38
4.1.3. Amostras expostas por 07 dias .....	42
4.1.3.1. Comparativo entre as amostras 03A07 e 08F07 .....	42
4.1.4. Amostras expostas por 14 dias .....	47
4.1.4.1. Comparativo entre as amostras 02F14 e 07A14 .....	47
4.1.5. Amostras expostas por 35 dias .....	53
4.1.5.1. Comparativo entre as amostras 01A35 e 12F35 .....	53
4.1.6. Amostras submetidas à 450 °C. ....	59

4.1.6.1. Comparativo entre as amostras L1A35 e L2F35 .....	59
<b>4.2. DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>70</b>
<b>AMOSTRA 04F07 .....</b>	<b>70</b>
<b>AMOSTRA 05A07 .....</b>	<b>71</b>
<b>AMOSTRA 06F14 .....</b>	<b>72</b>
<b>AMOSTRA 09A07 .....</b>	<b>73</b>
<b>AMOSTRA 10F07 .....</b>	<b>74</b>
<b>AMOSTRA 11A14 .....</b>	<b>75</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Componentes de alumínio constituem as aeronaves comerciais desde o advento desse setor de transporte. Ao final da década de 1920, o primeiro avião comercial alçou voo e nele já haviam componentes fabricados em alumínio. Hoje, o mercado aeronáutico ainda continua crescendo e é estimado que até 2030 cerca de 31,5 mil aviões estarão operando, sendo que, desses, 23 mil serão novos, como afirma a fabricante Airbus (CAMARGO, 2013).

Tal cenário torna a indústria do alumínio atrativa aos investidores e é continuamente instigada a inovar. A empresa Airbus é uma das maiores do setor de aeronaves comerciais com entrega de 588 aeronaves em 2012 e valor estimado de mercado de US\$638 bilhões. A tecnologia de suas ligas é desenvolvida pela Alcoa (*Aluminium Company of America*), a qual diminui o peso final da aeronave em até 10%, reduzindo o custo de manufatura e manutenção em 30% quando comparado aos materiais compósitos. Devido a isso, o contrato assinado entre Airbus e Alcoa para fornecimento de ligas de alumínio foi de 1 bilhão de dólares (CAMARGO, 2013).

Como todos os materiais de componentes de engenharia, as ligas de alumínio também estão sujeitas à ação do tempo. A degradação associada às intempéries e às condições desfavoráveis de trabalho que aceleram a oxidação é chamada de corrosão. Esse fenômeno eleva os custos de manutenção, seja ela corretiva ou preventiva, pois na aviação é exigido monitoramento constante da integridade dos materiais que compõem a aeronave. Caso a manutenção não seja efetiva, o dano pode atingir a esfera social, visto que acidentes onde há falhas assistidas por corrosão geralmente custam vidas; logo, falhas catastróficas não são toleradas.

As intempéries poderão influenciar na corrosão do material empregado na construção dos componentes através de fatores como a umidade, temperatura, íons cloreto em suspensão (ambientes próximo ao mar), entre outros. Devido às condições de trabalho haverá aumento na susceptibilidade à corrosão, pois, com a elevação da temperatura, a oxidação é favorecida.

As estruturas que serão estudadas no presente trabalho de conclusão de curso são compostas pela liga de alumínio 7050-T7451 e que são sujeitas ao processo de usinagem para atingir a sua forma final de uso. Esse processo

é assistido por um fluido de corte que tem como funções reduzir o aquecimento da peça e carregar consigo o material retirado; porém, esse fluido possui composição química que pode acelerar a corrosão da liga de alumínio e comprometer a sua aplicação.

Essas peças compostas pela liga de estudo são denominadas *airframes*, que contemplam as estruturas mecânicas atribuídas às asas, fuselagem e trem de pouso traseiro. Essas peças estão sujeitas à diferentes tipos de carregamento durante o voo. Como são cargas dinâmicas, ou seja, variáveis, a maioria dos esforços sofridos é cíclico, fator que pode levar a falha por fadiga do material, fenômeno esse que, quando assistido pela corrosão, possui risco ainda maior de ocorrer (MCDONALD, BOYKETT e JONES, 2013).

A usinagem expõe a liga de alumínio à corrosão por praticar a remoção de material da superfície juntamente com a camada protetora e inerente às peças de alumínio. Assim, durante o processo, o fluido de corte entra diretamente em contato com as regiões da microestrutura da liga mais susceptíveis à corrosão.

De acordo com o exposto acima, para a melhoria da engenharia envolvida na construção das aeronaves, é de suma importância estudar as características e comportamentos dos materiais que compõem suas peças assim como entender como ocorre a degradação do material quando em contato com intempéries, levando em conta as condições de trabalho, condições de fabricação etc.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo estudar o efeito do fluido de corte utilizado durante a usinagem na corrosão intergranular da liga de alumínio 7050-T7451

### 1.1.2. Objetivos Específicos

1. Estudo microestrutural e da resistência à corrosão intergranular de amostras em contato com o fluido de corte com temperatura e tempo controlados;
2. Comparação entre a corrosão intergranular causada pela água e pelo fluido de corte usando amostras não expostas às condições corrosivas como referência.

## 1.2. Motivação e Justificativa

O meio de transporte aeroviário aumenta continuamente e devido a isso novas tecnologias são exigidas para melhoria do sistema em sua totalidade. Sempre houve a necessidade do desenvolvimento de novos materiais para as mais variadas aplicações e no caso dos aviões não é diferente. Como se trata de um veículo de grandes proporções, diminuir o peso estrutural da aeronave é um desafio que permanece em pauta.

Sendo assim, a utilização de materiais com densidade menores do que a do aço é o foco dos estudos atuais. A liga de alumínio 7050-T7451 possui características importantes para essa aplicação; porém, devido aos seus elementos de liga, existe um fator agravante: a sua corrosão.

O presente trabalho é motivado pela contribuição nos estudos dos efeitos da corrosão acelerada pelo fluido de corte utilizado para usinagem da liga 7050-T7451.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Usinagem

O processo de usinagem se mostrou importante para o advento da engenharia por possibilitar a fabricação de peças com melhor acabamento superficial bem como geometrias com formas diferenciadas com saliências, reentrâncias, furos rosqueados, furos passantes etc (CHIAVERINI, 1986). A automação é outro ponto positivo para a técnica. Atualmente a tecnologia CAD (*computer aided design*) permite que as geometrias sejam projetadas em um computador e enviadas para equipamentos que transformam blocos inteiros de material nas formas desejadas.

A operação de usinagem é realizada por uma ferramenta de corte que remove uma porção do material. Esses pequenos pedaços de material removidos são conhecido como “cavacos”, que possuem características específicas, indicando, entre outras coisas, a qualidade do acabamento, da ferramenta de corte, velocidade do corte, material de origem, etc (CHIAVERINI, 1986).

O nível de acabamento superficial refinado é de substancial importância para a fabricação das peças que estarão sujeitas à esforços cíclicos. Imperfeições na superfície são pontos concentradores de tensão que serão locais de nucleação de trinca, as quais podem aumentar de tamanho durante a vida útil do material dependendo das condições de operação. Numa definição ampla, a nucleação da trinca, o seu crescimento e a fratura do material caracterizam o fenômeno de fadiga (MAYERS e CHAWLA, 2009).

#### 2.1.1 Fluido de corte a base de óleo de Pinhão-manso.

O processo de usinagem é comumente assistido por um fluido de corte que tem como funções resfriar o material durante o processo (refrigerante) bem diminuir o atrito entre a ferramenta de corte e a superfície em corte (lubrificante) (CHIAVERINI, 1986).

O fluido de corte a ser analisado é conhecido como Pinhão-manso (*Jatropha curcas*) por ser extraído da semente do fruto da árvore com o mesmo nome (CARDOSO, 2012).

A **Tabela 1** abaixo apresenta algumas propriedades do fluido de corte Pinhão-mansão.

**Tabela 1** - Propriedades do fluido de corte Pinhão-mansão.

Propriedades	
Estado físico	Líquido turvo
Odor	Característico
Cor visual	Castanho / âmbar a marrom
pH (diluído em 5,0% de H <sub>2</sub> O)	9,0
Ponto de Ebulição	240°C
Faixa de destilação	ND
Temperatura de decomposição	240°C
Temperatura de autoignição	NA
Limite de explosividade inferior	NA
Limite de explosividade superior	NA
Densidade a 240°C	0,950 g/cm <sup>3</sup>
Solubilidade	Éster e gorduras
Solubilidade em água	Solúvel

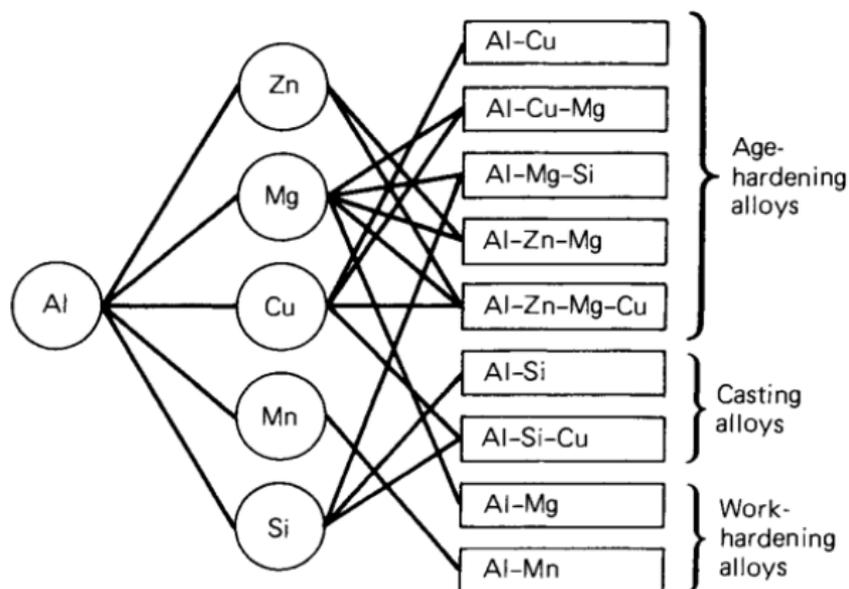
Fonte: Cardoso, 2014.

## 2.2. Alumínio e suas ligas

Grande parte dos metais da tabela periódica pode ser utilizado na composição de ligas de alumínio, contudo apenas algumas destas ligas apresentam potencial para comercialização (BRANDT, 1984). Parte das ligas de alumínio pode ser utilizadas em aeronaves e a sua primeira aplicação para esse fim data de 1920 (STARKE e STALEY, 1996).

Algumas das características mais atraentes destas ligas para a aplicação em aeronaves são: boa resistência mecânica, elevada resistência a corrosão e, principalmente, o seu baixo peso específico (BRANDT, 1984). Além disso, as ligas de alumínio apresentam uma larga faixa de trabalho, fator importante especialmente quando é considerado que a temperatura dos componentes durante o voo pode variar de -60 °C até 60 °C.

Algumas das famílias de ligas de alumínio mais utilizadas e suas principais características são mostradas na **Figura 1**.



**Figura 1: Principais ligas de alumínio. Fonte: Brandt, J. L., 1984 (STARKE e STALEY, 1996).**

Como apresentado na **Figura 1**, ligas com presença de zinco, manganês e cobre são passíveis de endurecimento por envelhecimento (ou precipitação), o que leva as propriedades mecânicas desejadas e cruciais para as aplicações aeronáuticas.

A **Tabela 2** compara as propriedades físicas do alumínio em relação ao aço e ao cobre.

**Tabela 2:** Comparativo entre as propriedades físicas do alumínio, aço e cobre

Propriedades físicas	Alumínio	Aço	Cobre
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,70	7,86	8,96
Temperatura de fusão (°C)	660	1500	1083
Módulo de elasticidade (MPa)	70.000	205.000	110.000
Coeficiente de dilatação térmica (L/°C)	23x10 <sup>-6</sup>	11,7x10 <sup>-6</sup>	16,5x10 <sup>-6</sup>
Condutividade térmica a 25 °C (Cal/cm/°C)	0,53	0,12	0,94
Condutibilidade elétrica (%AICS)	61	14,5	100

Fonte: <http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/> - Adaptado.

O ponto de fusão do alumínio ocorre por cerca de 660 °C, já o aço é na ordem de 1570 °C. O seu peso específico é de 2,70 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre.

As ligas de maior interesse na indústria aeronáutica são as tratadas termicamente, como as ligas da série 2xxx (Liga Al-Cu), que são utilizadas em estruturas internas e externas, e as ligas da série 7xxx (Liga Al-Zn-Mg), que, devido à elevada resistência mecânica, são muito utilizadas na estrutura das asas (FERRARI, 2011).

### 2.2.1. Composição química da liga e suas principais propriedades

A liga 7050-T7451 estudada é específica para a aplicação nas estruturas das asas e da fuselagem das aeronaves devido às suas propriedades mecânicas conferidas pelos elementos de liga. A **Tabela 3** abaixo apresenta a composição química da liga de alumínio 7050-T7451.

**Tabela 3:** Composição AA7050-T7451

Composição (%wt)	AA7050									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
Min	--	--	2,0	--	1,9	--	5,7	--	0,08	Restante
Max	0,12	0,15	2,6	0,10	2,6	0,04	6,7	0,06	0,15	Restante

Fonte: ASM Inc, 2003.

<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7050T745>.

Adaptado.

A **Tabela 4** apresenta as propriedades físicas e mecânicas da liga estudada: AA7050-T7451. A elevada resistência específica e o alto módulo de escoamento justificam a escolha dessa liga para as aplicações aeronáuticas.

**Tabela 4:** Propriedades físicas e mecânicas da liga AA7050-T7451.

Propriedades Físicas	
Densidade	2,83 g/cm <sup>3</sup>
Propriedades Mecânicas	
Dureza Brinell	140
Dureza Vickers	84
Tensão máxima na ruptura	524 MPa
Tensão no escoamento	469 MPa
Elongação na ruptura	11%
Módulo de Elasticidade	71,7 GPa
Coeficiente de Poisson	0,33

Fonte: ASM Inc, 2003. Adaptado.

<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7050T745>

### 2.2.2. Tratamento térmico T7451

Segundo “*Military Specification*” (MIL-H-6088G, 1991) o tratamento térmico para a designação T7451 segue de um aquecimento entre 116 e 127°C por um período de 3 a 6 horas, caracterizando o primeiro estágio de envelhecimento. Outro aquecimento é feito entre 157 e 168°C, mantido por um período de tempo de 24 a 30 horas, confirmando o duplo envelhecimento. O resfriamento rápido em água mantém a microestrutura.

### 2.2.3. Ductilidade do alumínio puro

Existem fenômenos físicos por trás das propriedades mecânicas de qualquer material. Para entendermos o comportamento mecânico de um material metálico é necessário introduzir os conceitos de “*Falha de Empilhamento*” e “*Energia de Falha de Empilhamento*”.

A discordância é uma afirmativa bem fundamentada e aceita para que se possa explicar a discrepância entre os valores medidos dos módulos de Young nos ensaios e o seu valor teórico. Através do movimento dessas discordâncias é que a capacidade do material sofrer deformação plástica é evidenciada (CALLISTER, 2008). As discordâncias se movem promovendo rearranjo da rede cristalina que compõe o material e, quando somados, o movimento de muitas discordâncias pode alterar a forma do material irreversivelmente, conferindo a deformação plástica (CALLISTER, 2008).

São designados dois arranjos principais para as discordâncias: as em cunha, cuja linha pela qual a discordância se move é perpendicular ao vetor de Burgers<sup>1</sup>; e as em hélice, cuja linha pela qual a discordância se move é paralela ao vetor de Burgers (MAYERS e CHAWLA, 2009).

Em materiais com estrutura CFC (Cúbica de Face Centrada), como o alumínio, predominam as discordâncias em cunha. As discordâncias parciais se movem paralelamente, causando distorção da rede cristalina ao modificar a sequência de empilhamento dos planos compactos (MAYERS e CHAWLA, 2009).

---

<sup>1</sup>Vetor de Burgers representa a magnitude e a direção da distorção na rede cristalina causada por uma discordância (CALLISTER, 2008).

A energia de falha de empilhamento ( $\gamma_{FE}$ ) está relacionada com a região de falha, pois se trata de uma energia de superfície, logo, é designada como uma tensão superficial que mantém as discordâncias parciais dissociadas juntas, tentando recombiná-las e eliminar as falhas, em contrapartida à repulsão mútua entre as discordâncias parciais. Então, o balanceamento entre esses dois fatores mantém a distância entre as discordâncias parciais constante (MAYERS e CHAWLA, 2009).

A energia de falha de empilhamento pode ser estimada pela equação 01:

$$\gamma_{FE} = \frac{Gb^2}{2\pi d} \quad (\text{equação 01})$$

Onde:

- $\gamma_{FE}$  = Energia de falha de empilhamento;
- $b$  = Vetor de Burgers;
- $d$  = distância entre as duas discordâncias dissociadas; e
- $G$  = Módulo de Cisalhamento;

Como é possível observar na equação 01, quanto maior a distância entre as duas discordâncias parciais dissociadas, menor é a energia de falha de empilhamento.

No alumínio puro, a energia de falha de empilhamento é alta devido ao fato da distância entre as discordâncias parciais dissociadas ser pequena. Isso confere maior ductilidade ao material pois são encontrados menos impedimentos para o movimento da discordância, facilitando o cisalhamento, logo, a deformação plástica.

Em metais CFC com baixa energia de falha de empilhamento o processo é inverso. Devido a uma distância maior entre as discordâncias parciais dissociadas há uma maior região de falha de empilhamento, sendo ela um fator que dificulta o movimento das discordâncias. Para que haja cisalhamento será necessário que as discordâncias se acumulem até terem energia necessária para mudarem de plano de escorregamento e assim conferirem a deformação plástica. Essa mudança de plano é conhecida como *cross-slip* (MAYERS e CHAWLA, 2009).

O acima citado justifica o fato do alumínio puro possuir maior ductilidade do que quando ligado. Os elementos de liga introduzem

impedimento ao movimento das discordâncias fazendo com que seja necessária uma maior quantidade de energia para que elas se movam, ou seja, para que haja deformação a nível plástico acarretando no aumento do limite de escoamento do material (MAYERS e CHAWLA, 2009).

#### 2.2.4. Efeito dos elementos de liga

Como mostrado na **Tabela 3**, os principais elementos de liga da AA7050-T7541 são: Cobre, Magnésio e Zinco. Os elementos como o Silício, Ferro, Manganês, Cromo e Titânio não são exigidos para a fabricação das ligas da série 7000, e possuem efeito pouco pronunciado quando presentes em baixas concentrações.

A adição do Cobre causa um aumento progressivo da resistência e da dureza até uma concentração de 12%wt, melhorando as propriedades mecânicas em temperaturas elevadas (BRADASCHIA, 1988); contudo, como será observado no estudo aqui realizado, aumenta a susceptibilidade à corrosão.

O Magnésio possui como principal incremento a usinabilidade, processo pelo qual peças aeronáuticas são submetidas. Além disso, esse elemento ajuda na melhora das propriedades mecânicas de resistência e dureza, bem como a resistência à corrosão (BRADASCHIA, 1988).

O Zircônio, em concentrações de 0,1 a 0,3%wt é usado para formar precipitados intermetálicos finos a fim de inibir os fenômenos de recuperação e recristalização, mantendo o controle sobre a microestrutura e conferindo a resistência mecânica desejada (KEY TO METALS, 2010).

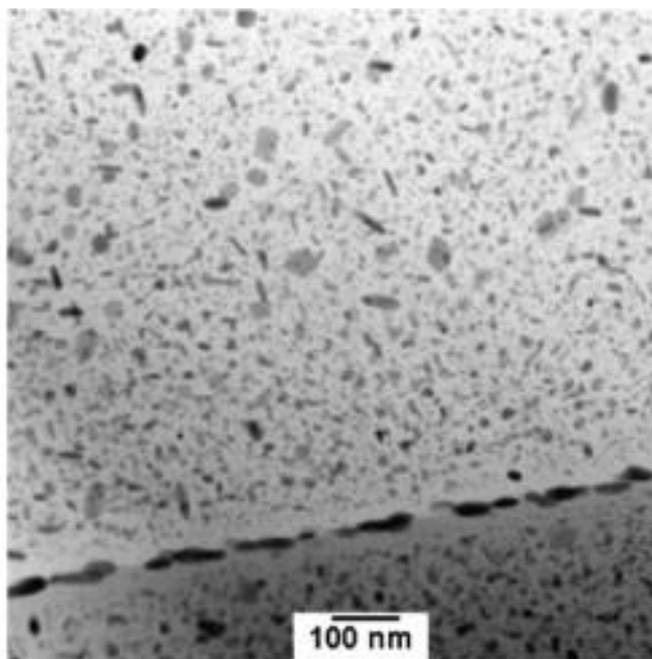
Como elemento de liga mais abundante, o Zinco aumenta sensivelmente o limite de resistência e ductilidade à temperatura ambiente, mas apresenta o efeito deletério de aumento da corrosão sob tensão (BRADASCHIA, 1988).

#### 2.2.5 Microestrutura da liga de alumínio 7050-T7451

Na **Figura 2** é apresentada uma imagem obtida através de *STEM bright field* (microscopia eletrônica de varredura por transmissão - campo

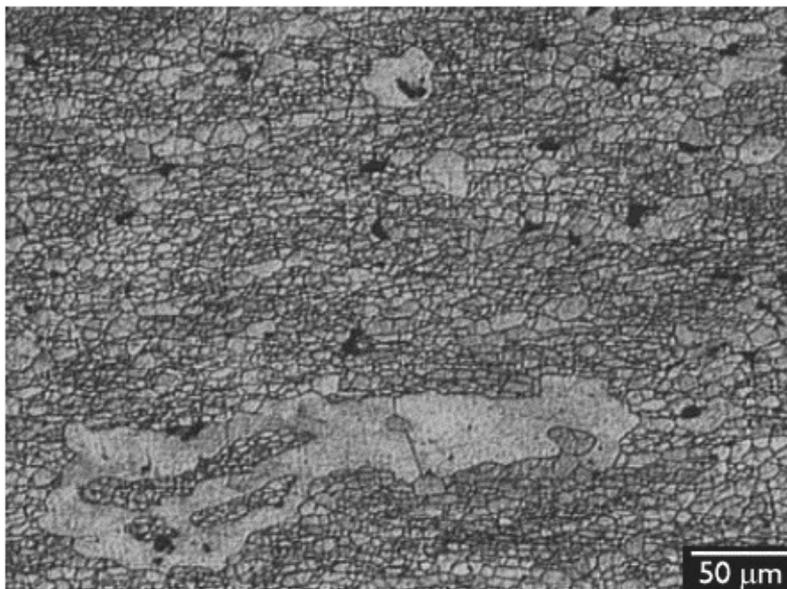
claro), na qual é possível observar uma grade quantidade de precipitado com diferentes morfologias e tamanho.

Precipitados de 50 nm são observados nos contornos de grão, já dentro do grão a maioria tem tamanho menor que 20 nm. Outros, morfologicamente diferentes, têm comprimento de 20 nm e apenas 4 nm de espessura. Fases de  $MgZn_2$  também são identificadas (CARDOSO, TRAVESSA, *et al.*, 2012).



**Figura 2 - Microestrutura da liga AA7050-T7451.**  
Fonte: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000105>.

Já na **Figura 3** temos uma microscopia óptica da liga 7050-T7451 com boa visibilidade dos seus contornos de grão bem como as diferentes fases, revelada pelo ataque químico com reagente  $(NH_4)_2S_2O_8$ , sendo composta por pequenos grãos recristalizados e outros maiores, coalescidos, e de forma alongada, provenientes do processo de laminação. As regiões de cores mais escuras representa as partículas intermetálicas (IMs), como  $Al_7Cu_2Fe$  e  $Mg_2Si$  (ROSSINO, ASHIUCHI, *et al.*)



**Figura 3 - Microestrutura da liga AA7050-T7451. Fonte: (ROSSINO, ASHIUCHI, *et al.*)**

### 2.3. Corrosão

A corrosão é um processo de degradação ao qual todos os materiais metálicos estão sujeitos. Basicamente, se trata da oxidação de um material em determinada região, causando o desprendimento da matriz que está sob o seu efeito, causando danos à sua estrutura (GENTIL, 1996).

Termodinamicamente, a corrosão da grande maioria dos materiais metálicos é um processo espontâneo, ou seja, há liberação de energia. Sendo assim, pode-se concluir que o metal é mais estável quando em formato de óxido (JAMBO e FÓFANO, 2009).

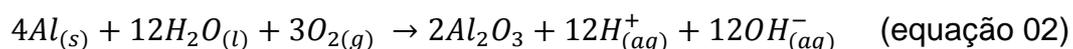
#### 2.3.1. Tipos de corrosão

A corrosão é geralmente classificada de forma primária em dois grandes grupos: corrosão eletroquímica e oxidação direta. Ambos os grupos são subdivididos quanto à morfologia e à fenomenologia do processo corrosivo. A nomenclatura quanto a morfologia da corrosão a classifica como uniforme, localizada (alveolar ou puntiforme), seletiva, intergranular e transgranular. Já na abordagem fenomenológica, a corrosão nomeada de acordo com outros aspectos: Galvânica, Célula oclusa, Corrosão-erosão, Corrosão-Fadiga, Corrosão sob tensão, Corrosão atmosférica, Corrosão microbiológica e Ataque pelo Hidrogênio (JAMBO e FÓFANO, 2009).

### 2.3.2. Passividade do alumínio metálico

O alumínio possui uma fina e invisível (a olho nu) camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. Essa característica de autoproteção fornece ao alumínio uma elevada resistência à corrosão (ASM INTERNATIONAL, 1984).

Quando ocorre contato do alumínio com a água há a formação de uma fina camada passivadora, dada pela reação da equação 01, abaixo:



A energia livre de Gibbs dessa reação é negativa, ratificando a espontaneidade da reação (MCCAFFERTY, 2010).

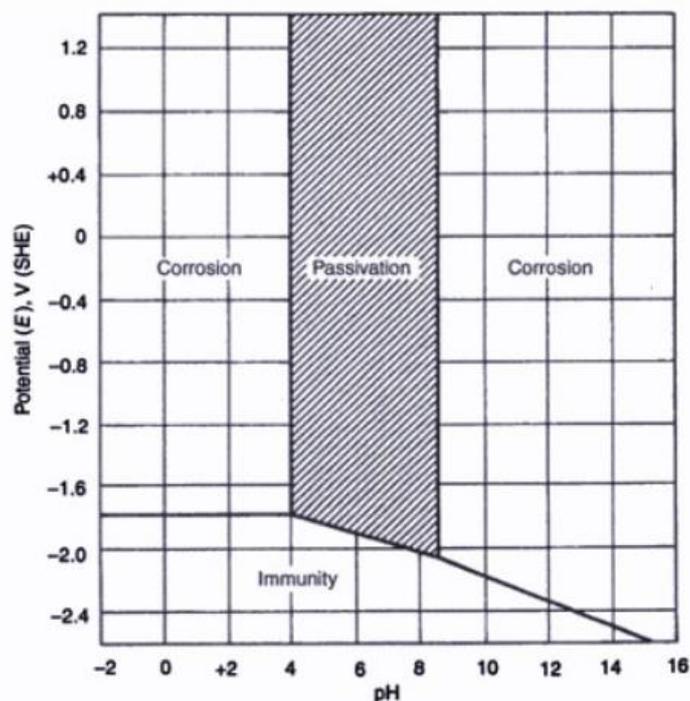
Na equação balanceada, quatro alumínios sólidos são catalisados por doze moléculas água e reagem com as três moléculas de oxigênio atmosférico, produzindo duas moléculas de óxido de alumínio (Alumina) tendo o catalisador recuperado.

Essa reação não ocorre em todo o volume da peça de alumínio; apenas a superfície do material é afetada. Quando, em termos de área superficial, toda a peça sofre oxidação, a reação cessa por não haver mais alumínio metálico espontaneamente susceptível à oxidação. Sendo assim uma fina camada de aproximadamente 10 nm de espessura é formada (FERRARI, 2011).

Essa camada formada é dividida em duas partes de acordo com a proximidade com a matriz metálica. A camada que está em contato direto com a matriz metálica é compacta e fina, e efetivamente protege contra a corrosão devido às suas propriedades dielétricas. Já a camada externa é mais espessa e porosa, composta por óxidos hidratados. Quando em condições adequadas, a camada externa pode se autorregenerar caso sofra danos por abrasão (FERRARI, 2011).

A passividade da camada que está sobre o alumínio metálico é descrita pelo Diagrama de Pourbaix, mostrado na **Figura 4**. No gráfico são delimitadas as regiões de corrosão/passividade por meio do potencial (E) em função do potencial hidrogeniônico. Pelo diagrama, é possível afirmar que a

estabilidade termodinâmica da camada passiva acontece nos valores de pH entre 4 e 8,5. Assim, haverá a corrosão da camada passivadora, e posteriormente do alumínio, em meios muito ácidos ou muito básicos. Devido a essa susceptibilidade de desestabilização, tanto em pH muito alto ou muito baixo, afirma-se que esta camada se trata de uma material anfótero, fornecendo um norteamento para possíveis aplicações (FERRARI, 2011).

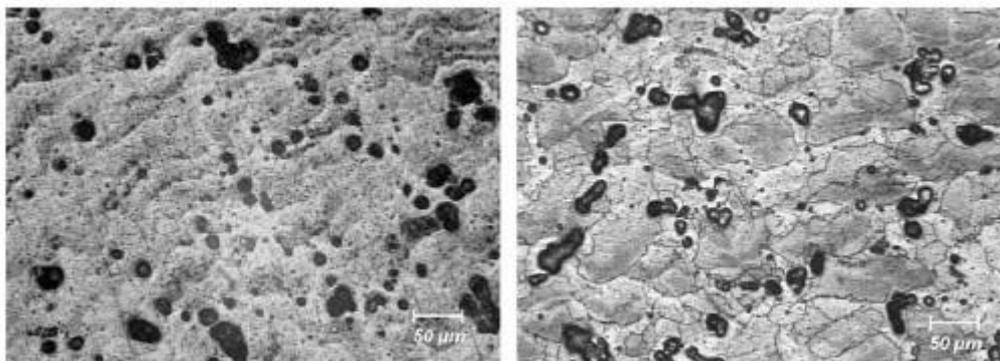


**Figura 4:** Diagrama de Pourbaix do alumínio. Potencial (V/EPH) versus pH a 25 °C, assumindo uma camada passiva de alumínio composta pelo  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Fonte (FERRARI, 2011)

### 2.3.3. Corrosão por Pite

Pites são cavidades que apresentam profundidade geralmente maior que o diâmetro e possuem fundo anguloso. Tem aspecto superficial de pontos ou pequenas áreas (GENTIL, 1996).

Nas liga de alumínio o aspecto da corrosão por pite é representado pela **Figura 5**. A amostra representa uma liga de alumínio da série 7xxx com tratamento térmico T73 exposta por 72 horas em solução de NaCl 0,1M.



**Figura 5 - Aspecto da corrosão por pite em amostras de alumínio em 0,1M NaCl por 72 horas. Fonte: S. De et al - Corrosion Science 52 (2010) 1818-1823**

#### 2.3.4. Corrosão intergranular

Ligas de alumínio de alta resistência com aplicações aeronáuticas possuem uma microestrutura com alta susceptibilidade à corrosão intergranular. O processo termomecânico ao qual a liga é submetida durante a fabricação da peça fornece ao material propriedades mecânicas otimizadas à aplicação devido à formação de precipitados dentro dos grãos; porém, esse processo também acelera a difusão de partículas para os contornos de grãos, que empobrecem a resistência à corrosão da região (KNIGHT, SALAGARAS e TRUEMAN, 2010).

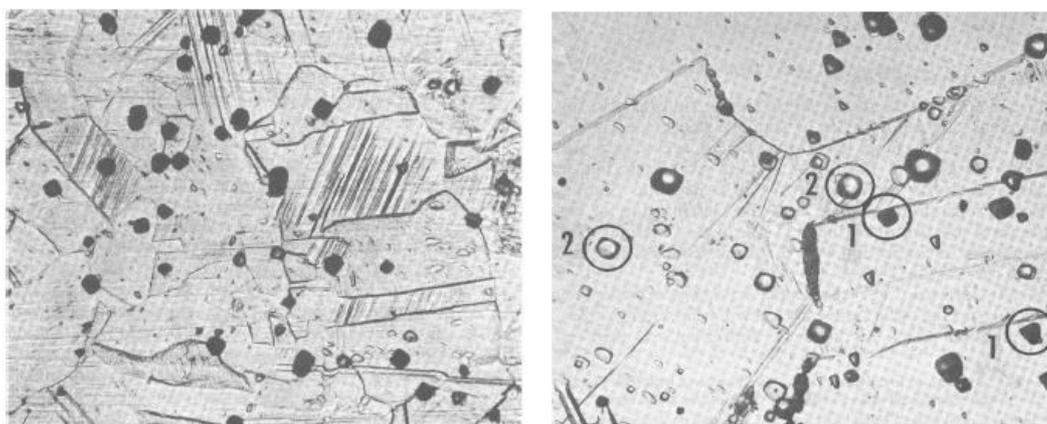
As regiões de contornos de grãos são mais susceptíveis à presença de impurezas, podem ser empobrecidas por elementos de liga e ainda facilitam a precipitação de fases. Esses fatores são motivos para que o contorno de grão seja mais facilmente afetado pela corrosão do que a matriz do grão, caracterizando a corrosão intergranular (ALONSO-FALLEIROS, 2013).

Na liga 7050 as partículas de cobre são as que mais se difundem para os contornos de grão, causando um efeito conhecido como “empobrecimento por cobre”, o qual se refere à queda na resistência a corrosão na região do contorno de grão (KNIGHT, SALAGARAS e TRUEMAN, 2010).

O zinco também se precipita em forma de compostos no contorno de grão e pode atuar como ânodo com relação à liga formando pilhas galvânicas localizadas. A diferença de potencial entre os compostos contendo zinco e a matriz de alumínio leva a oxidação dos elementos daquela região, contribuindo para a corrosão intergranular (ALONSO-FALLEIROS, 2013).

As partículas difundidas são chamadas de “intermetálicas” (IMs) e possuem dimensões de 2 a 30  $\mu\text{m}$ , e, apesar de melhorar as propriedades mecânicas, aumentam a complexidade da microestrutura. Além disso, os IMs possuem potencial eletroquímico diferente da matriz, gerando uma pilha galvânica localizada, acelerando o processo de corrosão. Quando a concentração de IMs nessas regiões aumenta, ainda mais facilmente ocorrerá a corrosão (FERRARI, 2011).

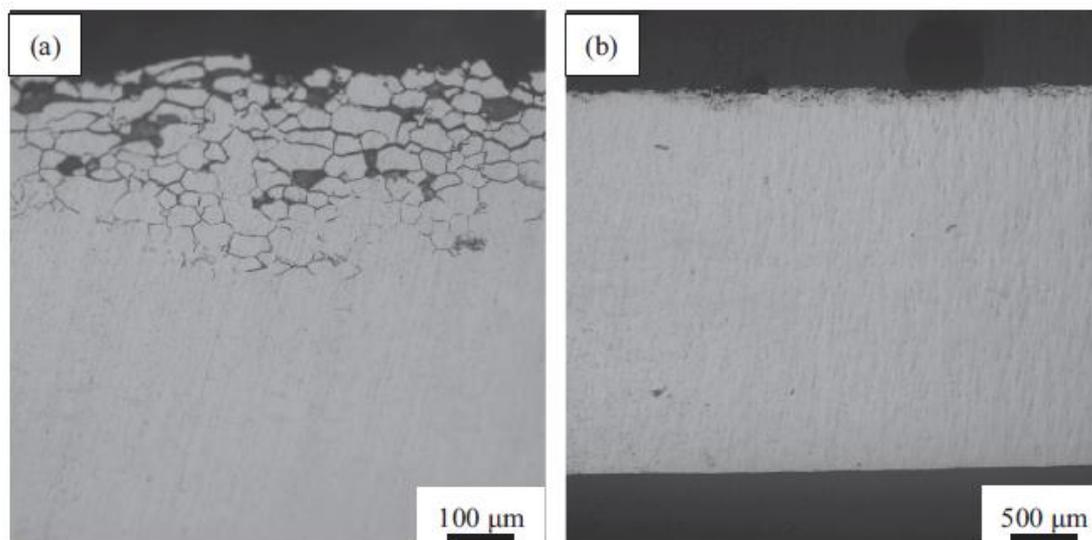
Devido aos IMs nos contornos de grão a corrosão pode ser do tipo “mista”, ou seja, há formação de pites juntamente à corrosão intergranular. Conhecido como *End grain pits*, ou “pites profundos”, podem ter morfologia variada e sua presença acarreta em grandes danos à essa região. Quando ocorrem na matriz metálica, podem assumir formas diferentes, como mostrado na **Figura 6** (ALONSO-FALLEIROS, 2013).



**Figura 6 - *End grain pits* - Pites profundos nos contornos de grão (à esquerda) e diferentes tipos de pite (à direita): Fonte: (ALONSO-FALLEIROS, 2013).**

A perda de material na região dos contornos dos grãos causa uma diminuição na densidade de ligações químicas que sustentam as propriedades mecânicas da liga. Quando a corrosão chega a níveis críticos, e aliada aos esforços mecânicos, pode haver separação total dos grãos em uma microrregião por onde se nucleia uma trinca. A propagação dessa trinca leva a falha do material em forma de ruptura (MAYERS e CHAWLA, 2009).

A **Figura 7** mostra como a corrosão age no contorno de grão fazendo com que haja, em alguns casos, separação entre o grão e a matriz.

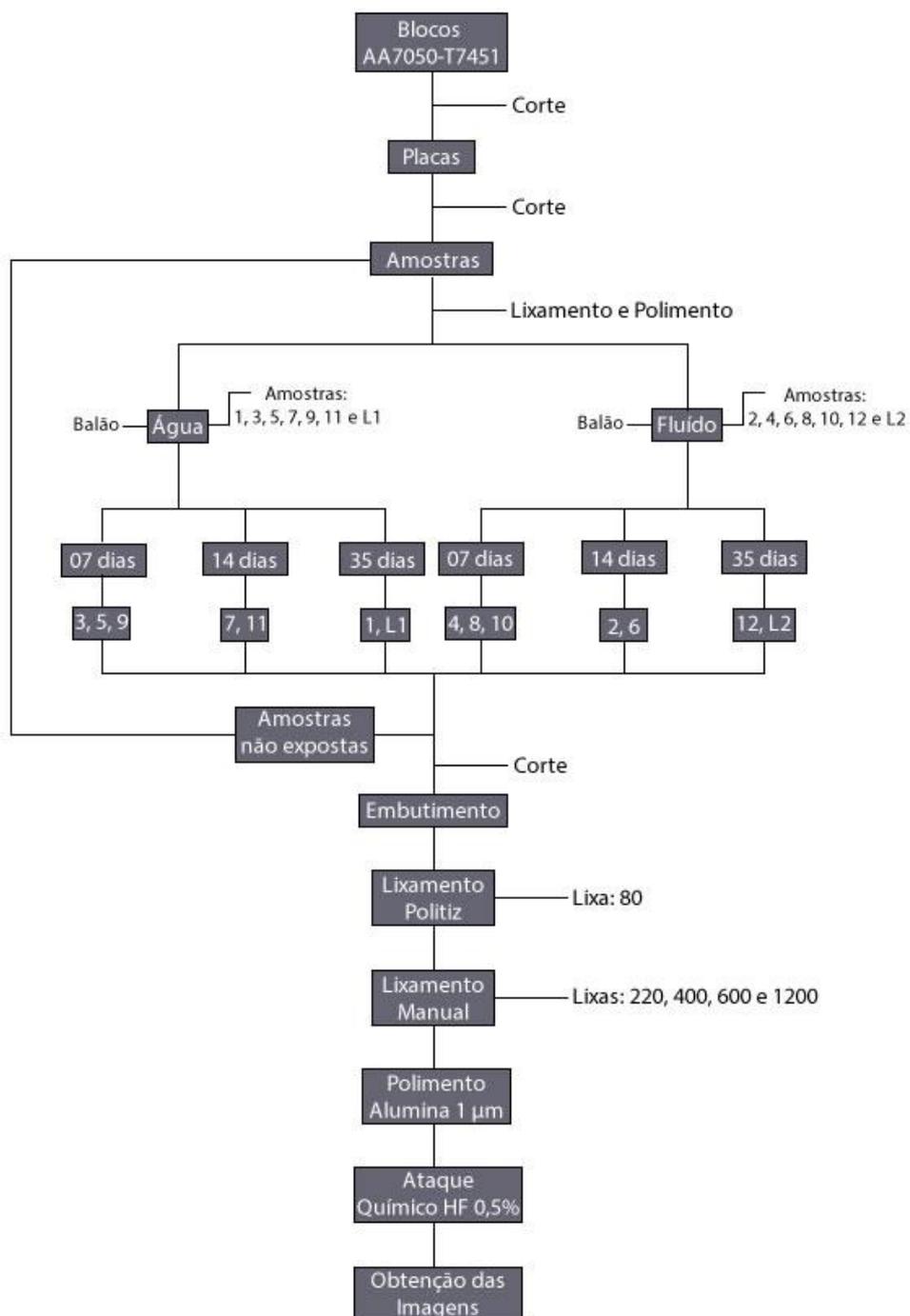


**Figura 7 - Efeito da corrosão intergranular na liga Al-Cu-Mg-Ag: Aumento (a) 100 vezes, (b) 20 vezes. Fonte: X.Y. Liu et al. Journal of Alloys and Compounds 639 (2015) 263–267.**

### 3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA PESQUISA

#### 3.1. Fluxograma

Para uma análise reduzida da metodologia, na **Figura 8** é apresentado um fluxograma com os passos realizados durante a execução do presente projeto.



**Figura 8 - Fluxograma do procedimento de realização do experimento.**  
 Fonte: Autoria própria.

### 3.2. Equipamentos e vidrarias utilizadas

#### a) *Ensaio de Corrosão:*

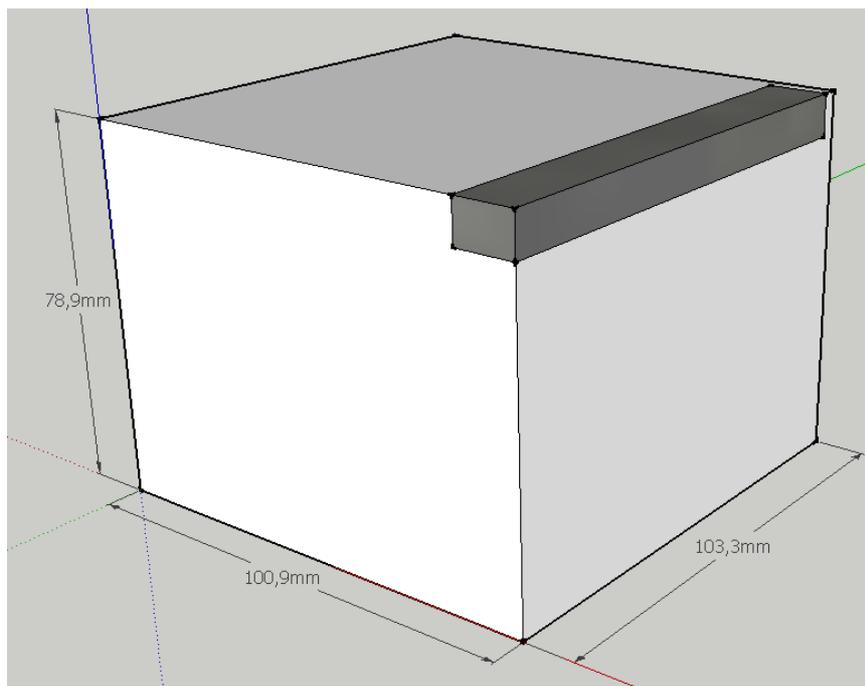
- Dois balões de fundo chato de 250 mL;
- Dois balões de fundo redondo de 250 mL;
- Quatro mantas aquecedora LUCADEMA 1000;
- Quatro suportes;
- Quatro torres de destilação;

#### b) *Metalografia:*

- Béquer de 50 mL;
- Embutidora Arotec PRE30Mi SMX136;
- Lixadeira e Politriz FORTEL PFL de quatro velocidades:
  - Lixas d'água de 80, 220, 400, 600 e 1200;
  - Polimento metalográfico com pano de polimento e suspensões de alumina com 1  $\mu\text{m}$ ;
- Mesa de polimento manual com quatro baias;
- Microscópio óptico Carl Zeiss Microimaging GmbH
  - Ocular: 10x; e
  - Objetivas: 5x, 10x, 20x, 50x, 100x;

### 3.3. Metodologia

Inicialmente as amostras foram preparadas a partir de duas peça da liga AA7050-T7451 com dimensões de 100,9x103,3x78,9 mm referentes à largura, comprimento e altura respectivamente. As peças foram cortada em barras finas de 9,0 mm de espessura, 103,3 mm de comprimento e 12 mm de largura, como é mostrado na **Figura 9**.



**Figura 9 - Dimensões da peça de alumínio. Fonte: Autoria própria.**

Para simular a condição de usinagem, que, além dos esforços, se restringe ao calor gerado na superfície devido ao atrito causado pela ferramenta de corte e ao contato entre peça e fluido de corte, um sistema foi elaborado com a finalidade de fornecer calor à liga de alumínio e, ao mesmo tempo, mantê-la em contato direto com o fluido de corte.

A **Figura 10** mostra o sistema montado a partir de quatro mantas aquecedoras, quatro torres de destilação, quatro balões de 250 mL, mangueiras de PVC para fornecer água ao sistema de refluxo, filme de PVC para fazer a vedação das partes encaixadas, papel alumínio para retenção de calor na manta, além de quatro suportes e quatro garras para sustentar o sistema em sua forma operante. As mangueiras de PVC foram ligadas à torneiras a fim de manter um sistema de refluxo, fazendo, dessa forma, com que não houvesse variação na quantidade de água ou fluido de corte presente em cada balão.

Para o aquecimento do sistema com todos os fluidos, foi estabelecido um valor nos controladores eletrônicos das mantas aquecedoras que possibilitassem uma temperatura de 95 °C, em média, tendo variação de 5° para mais e para menos.

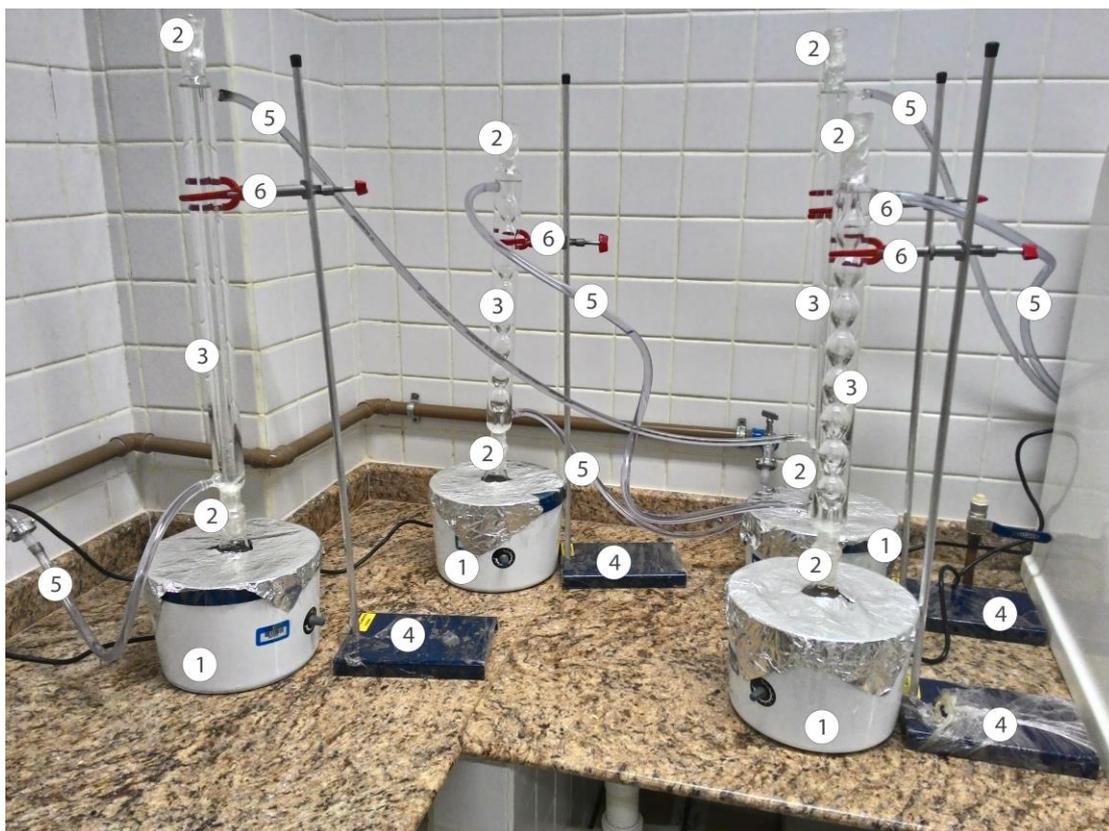


Figura 10 - Sistema de refluxo para simulação de corrosão. Fonte: Autoria própria.

1. Manta aquecedora LUCADEMA 1000;
2. Filme de PVC;
3. Torre de destilação;
4. Suporte;
5. Mangueiras de PVC;
6. Garras.

As amostras foram contadas a partir de um tarugo da liga de Al. Primeiramente, foram cortadas barras do tarugo, sempre no mesmo sentido, conforme é mostrado na **Figura 11**, e, depois, cada barra foi cortada em pequenas partes de 10,0x10,0x9,0 mm utilizando uma serra em arco. No total foram preparadas 12 amostras nas medidas citadas, com mostra a **Figura 12**.



Figura 11 - Barras pré corte das amostras. Fonte: Autorial própria.



Figura 12 - 12 amostras após o corte. Fonte: Autorial própria.

Cada pequena parte cortada do tarugo foi devidamente lixada e polida a fim de eliminar qualquer imperfeição que pudesse aumentar a susceptibilidade à corrosão em uma determinada região, como mostra a **Figura 13**. O procedimento de polimento e lixamento foi realizado para todas as amostras que foram submetidas à corrosão. A fim de numerar cada amostra foi utilizada uma retifica para fazer pequenas marcas em uma das superfícies da amostra que não seriam utilizadas para análise, como mostra a **Figura 14**.



Figura 13 - Amostras polidas e prontas para serem inseridas no sistema corrosivo. Fonte: Autorial própria.



**Figura 14 - Amostra devidamente marcadas. Fonte: Autoria própria.**

Dentro de cada balão foram colocadas seis amostras, sendo que as amostras denominadas com números ímpares foram postas em contato apenas com água e as amostras pares em contato com o fluido de corte.

Na constituição do fluido de corte, para se assemelhar ao que é usado comercialmente, foi necessário diluir o concentrado de óleo de pinhão-manso mais aditivos em água. Usualmente se trata de uma solução de 10%, em volume, e, do óleo mais aditivos na água.

O experimento permitiu que balões de 250 mL fossem utilizados devido ao pequeno tamanho das amostras. Não foi necessário completar o volume total, logo, trabalhou-se com 200 mL de solução. Sendo assim, em dois dos balões estava presente apenas água e nos outros dois o fluido de corte. A **Figura 15** mostra as amostras inseridas nos balões.

Após uma semana de funcionamento foi verificado junto à literatura que poderia de haver interferência na corrosão intergranular nas amostras que estavam em contato diretamente uma com as outras através do efeito de “Polarização Por Concentração”. Para averiguar esse efeito, e verificar sua influência, foi montado outro sistema constando apenas uma amostra dentro de cada balão, como mostra a **Figura 16**.



**Figura 15 – Seis amostras nos balões com fluido de corte, à esquerda, e seis amostras no balão com água, à direita. Fonte: Autorial própria.**



**Figura 16 - Uma amostra no balão com fluido e corte, a esquerda, e uma amostra no balão apenas com água, a direita. Fonte: Autorial própria.**

Após 35 dias de experimento um acidente foi registrado: um problema elétrico danificou o controlador térmico de duas das mantas aquecedoras, acarretando no aquecimento descontrolado das resistências, superaquecendo o sistema e danificando todo o equipamento.

Dada as condições encontradas após o incidente, pode-se afirmar que as amostras de referência foram submetidas a temperaturas acima dos 450 °C. Essas amostras, mesmo que expostas à condições alheias às

consideradas no planejamento, foram avaliadas seguindo a metodologia adotada, assim com todas as outras.

A **Figura 17** apresenta o resultado causado pelo superaquecimento. À esquerda houve degradação do fluido de corte e total preenchimento do balão por material orgânico carbonizado, e, à direita, como havia somente água, houve total evaporação da mesma. Mesmo após o problema, o cronograma de exposição das amostras ao fluido de corte foi cumprido.



**Figura 17 - Avaria no equipamento. Fonte: Autoria própria.**

Após o tempo determinado de exposição ao fluido, cada amostra foi retirada dos balões, e, então, serrada manualmente (com arco de serra) num das seções transversais, longe das marcações de identificação, como é mostrado na **Figura 18**. Esse processo de corte foi realizado com muito esmero e de forma lenta para não causar avarias, ou deformações, nas amostras, que poderiam interferir nos resultados de corrosão.



**Figura 18 - Amostras serradas em seção transversal após período de corrosão. Fonte: Autoria própria.**

Conforme foi previamente descrito, períodos diferentes foram escolhidos para retirada de amostras e posterior comparação. A **Tabela 5**

reúne de forma sucinta os períodos e condições de exposição de cada amostra submetida ao sistema.

**Tabela 5** - Tabela com o período de retirada de cada amostra.

Amostra	07 dias		14 dias		35 dias	
	Água	Fluído	Água	Fluído	Água	Fluído
1					X	
2				X		
3	X					
4		X				
5	X					
6				X		
7			X			
8		X				
9	X					
10		X				
11			X			
12						X
L1*					X	
L2**						X

\*, \*\* Amostras isoladas das demais, postas separadas em um balão.

O passo subsequente foi embutir as amostras na Embutidora Arotec PRE30Mi SMX136, ilustrada no apêndice A. Três amostras não imersas nos meios corrosivos também foram embutidas com a finalidade de servirem de comparativo quanto à microestrutura da liga isenta do efeito de corrosão e temperatura. Sendo assim, foram embutidas 17 amostras no total.

Para melhor entendimento, uma nomenclatura foi dada às amostras a fim de identificá-las quanto ao meio que esteve imersa e por quanto tempo,

como nos exemplos “01A35” e “08F07”; onde “01” e “08” correspondem ao número da amostra, “A” representa “Água” e “F” representa “Fluido de Corte” como meio de imersão; e, “35” e “07” representam o número de dias que a amostra foi submetida ao processo de corrosão. Ocorre exceção na amostra isenta aquecimento e meio corrosivo, sendo chamada de RE-00.

Para revelar a microestrutura do material e, conseqüentemente, o efeito do fluido de corte sobre a corrosão intergranular das ligas, as amostras foram atacadas quimicamente com o uso de ácido fluorídrico. Devido à grande periculosidade dessa substância, seguindo a literatura, foi adotada uma concentração de 0,5% de HF diluído em água (ROHDE, 2010), - sendo assim, diminui-se o risco de acidente mantendo a efetividade do ataque químico apenas submetendo a amostra por um maior período em contato com o ácido.

As amostras foram submetidas ao ácido por 2 min e 30 segundos, e posteriormente, foram lavadas com álcool isopropílico e secadas usando um secador com ar frio. Na **Figura 19** é mostrado as amostras embutidas e atacadas quimicamente.

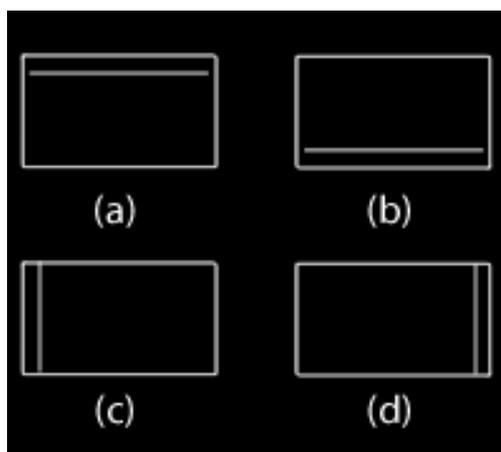


**Figura 19 - As 17 amostras após ataque químico. Fonte: Autoria própria.**

A análise das superfícies das amostras foi realizada utilizando o Microscópio Óptico Carl Zeiss Microimaging GmbH, fornecendo as imagens com aumentos e resolução necessárias para a análise da corrosão intergranular proposta nesse trabalho.

Foi adotado um critério de imagens com aumento de 50 e 100 vezes para o centro da amostra a fim de revelar a microestrutura geral e, para cada borda da amostra, parte essencial de análise da corrosão intergranular, aumentos de 200, 500 e 1000 vezes.

Um sistema de referência foi adotado para indicar como as amostras foram analisadas e assim estabelecer um padrão, tornando plausível a comparação entre as bordas. As bordas com linhas duplas representam a borda real analisada no momento de captura das imagens. Os símbolos usados são expostos na **Figura 20**.



**Figura 20 - Sistema de referência para identificação da borda analisada: a) Superior, b) Inferior, c) Esquerda e d) Direita. Fonte: Autoria própria.**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Apresentação dos resultados

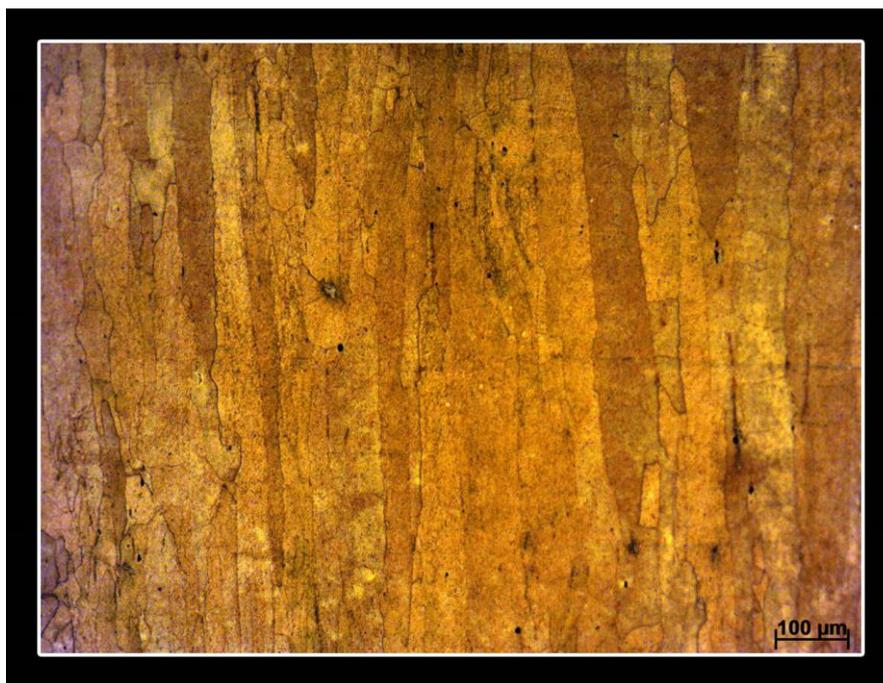
O critério de análise baseou-se nas condições extremas do experimento, ou seja, comparando amostras que não sofreram qualquer tipo de ação da temperatura e do meio corrosivo com as amostras que foram submetidas ao fluido, e também, comparando o efeito do tempo de exposição ao fluido na corrosão do material.

Dessa forma, a análise foi realizada comparando-se amostras expostas pelo mesmo período de tempo à meios corrosivos diferentes; exemplo: a amostra 02F14 foi comparada à amostra 07A14 (ou seja, comparando a amostra exposta somente à água com a amostra exposta ao fluido de corte, todas com 14 dias de exposição); outro exemplo, a amostra 08F07 comparada à amostra 03A07, e assim por diante, como mostra a **Tabela 6**. Nota-se que foi relevante observar a relação entre a amostra RE-00 (amostra que não foi exposta aos fluidos) e todas as outras.

**Tabela 6** – Planejamento para comparação entre amostras.

		Amostras				
		01A35	03A07	07A14	L1A35	RE-00
02F14				X		X
08F07			X			X
12F35		X				X
L2F35					X	X
RE-00		X	X	X	X	

Todas as amostras apresentaram o mesmo aspecto morfológico dos grãos no centro das amostras, longe das bordas. A **Figura 21**, retirada da amostra 06F14, ilustra esse aspecto comum à todas as amostras, onde é possível a visualização de grãos alongados provenientes do processo de laminação do tarugo inicial, de onde foram retiradas as amostras para ensaios, conforme descrito no tópico referente à metodologia.



**Figura 21 - Grão alongados provenientes do processo de laminação da amostra 06F14. Fonte: Autoria própria.**

Durante a obtenção das micrografias, a escala foi colocada aleatoriamente nos cantos da imagem sem seguir um padrão. A fim de manter a figura original gerada pelo equipamento de microscopia óptica, a imagem foi dividida entre a parte que foi analisada e a parte que consta a escala. Sendo assim, a linha branca que separa as duas imagens existe para explicitar certa distância entre as duas superfícies, porém, ambas as imagens pertencem à mesma amostra. Evidencia-se essa condição pela primeira vez na **Figura 26**, mostrada dentre as figuras seguintes. Além disso, outro ponto deve ser previamente informado, - nas análises das micrografias foi utilizado as notações informadas na **Tabela 7**:

**Tabela 7** - Legenda para interpretação dos resultados.

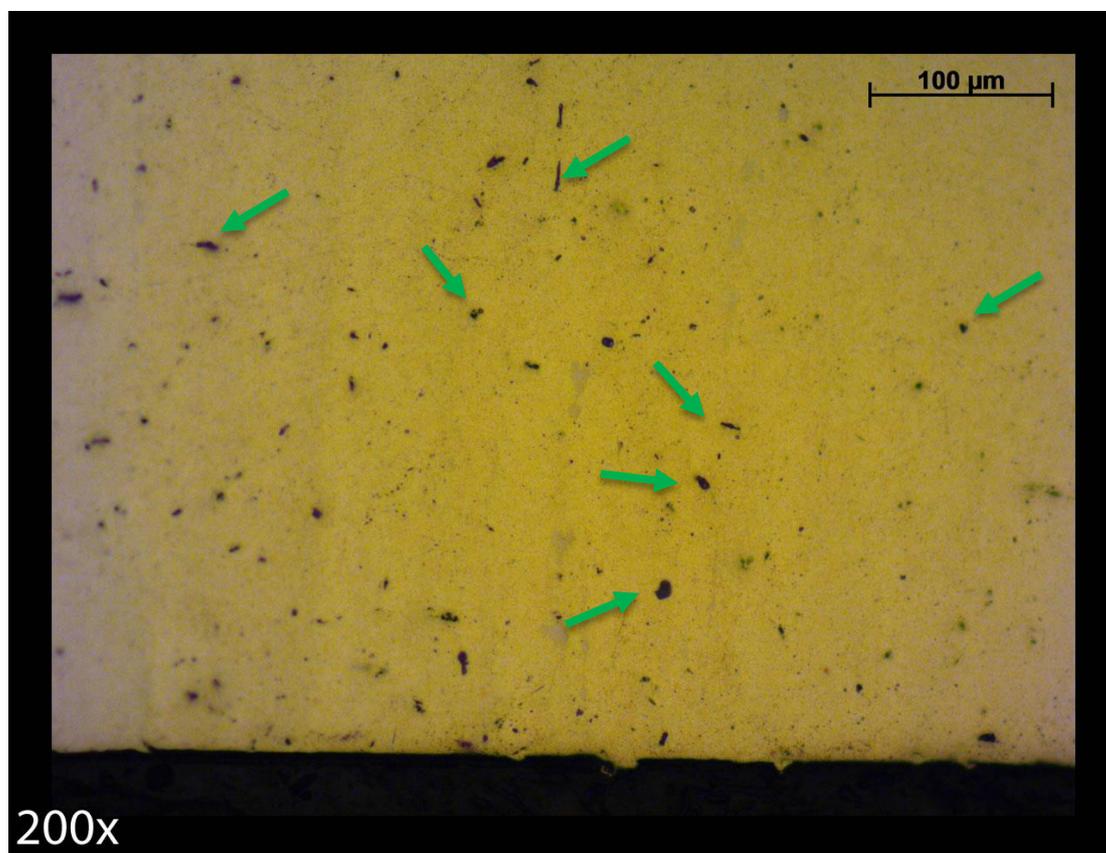
Símbolo	Nome	Significado
	Seta vermelha	Corrosão por <i>End grain pits</i> (pites profundos)
	Seta preta	Pites
	Seta azul	Compostos Intermetálicos (IMs)
	Seta verde	Inclusões;

#### 4.1.1. Amostras sem ataque químico

A amostra 07A14, imersa em água por 14 dias, é representada pelas **Figura 22**, **Figura 23**, e **Figura 24**, com aumento de 200, 500 e 1000 vezes, respectivamente.

A finalidade dessas imagens é deixar claro alguns pontos presentes na matriz metálica. Sem o ataque químico o contorno de grão é muito pouco evidente, logo, defeitos como inclusões se torna muito evidentes, como indicado pelas setas verdes.

Sendo assim, para análise posterior das amostras atacadas é possível afirmar o que são inclusões.



**Figura 22 - 07A14 - Amostra sem ataque químico. Aumento de 200 vezes. Fonte: Autoria própria.**

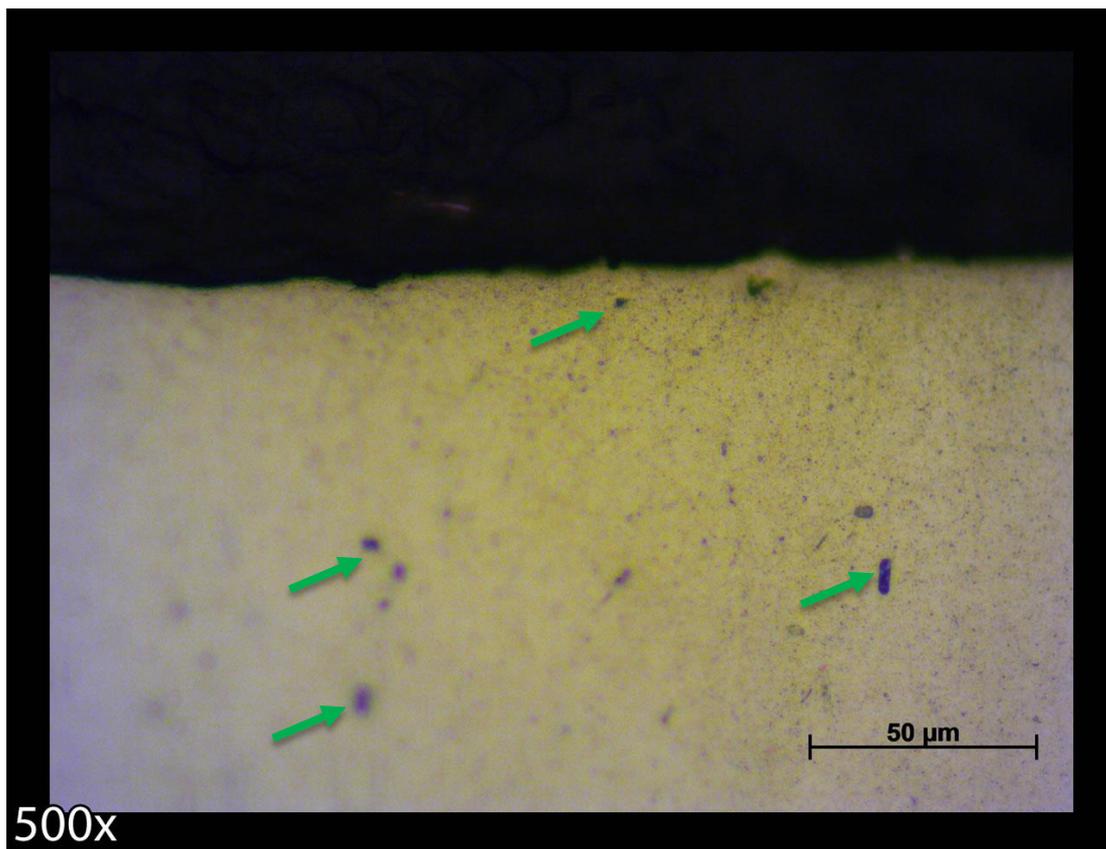


Figura 23 - 07A14 - Amostra sem ataque químico. Aumento de 500 vezes. Fonte: Autoria própria.

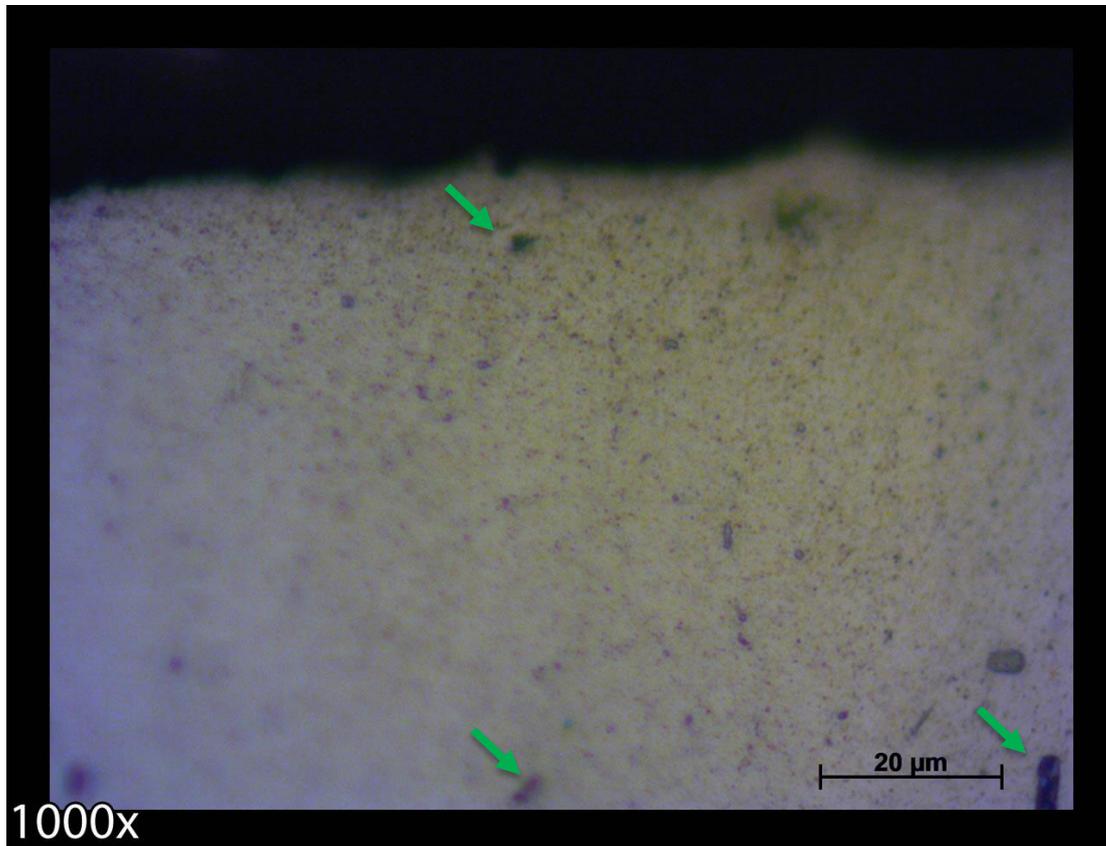
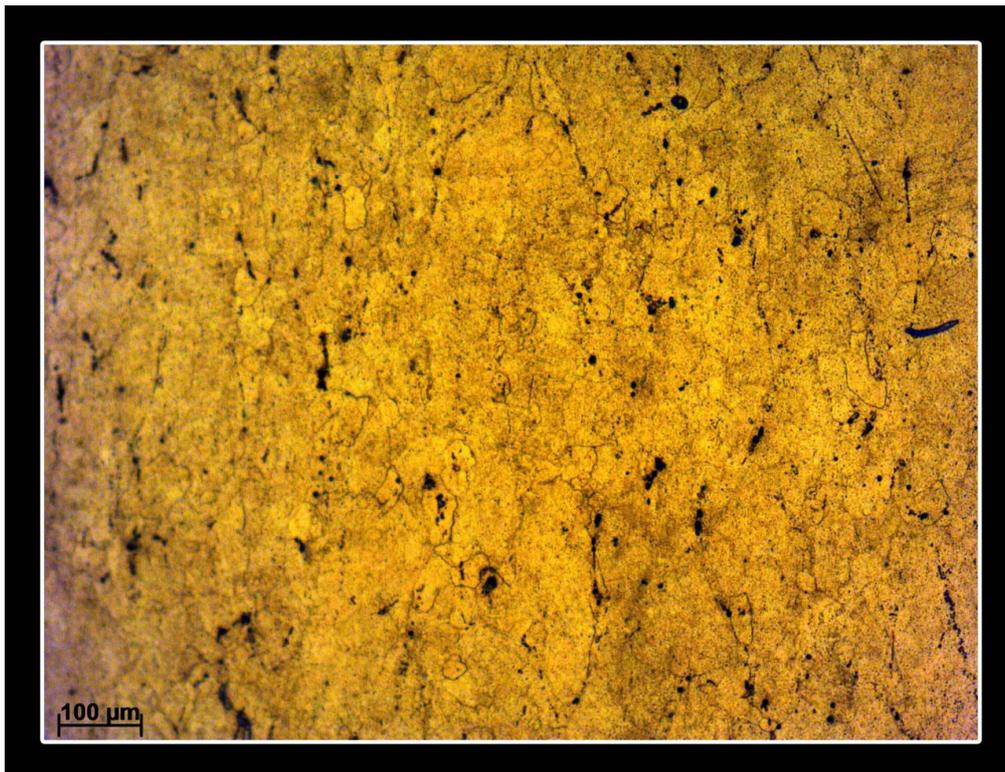


Figura 24 - 07A14 - Amostra sem ataque químico. Aumento de 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.2. Amostra RE-00

Essa amostra não foi submetida ao fluido e serve como padrão de referência, seu aspecto morfológico está mostrado na **Figura 25**. Na figura não se nota os grãos alongados como na **Figura 21** (amostra 06F14). Isso ocorre porque a amostra foi retirada na direção perpendicular à dos grãos, ou seja, o que aparece na imagem da **Figura 25** nada mais é que a seção transversal desses grãos.



**Figura 25** –Microestrutura da amostra RE-00 – Região Central – Aumento de 100 vezes. Fonte: Autoria própria.

Na **Figura 26**, representando a borda direita da amostra RE-00, as setas verdes indicam inclusões presentes nessa região da amostra.

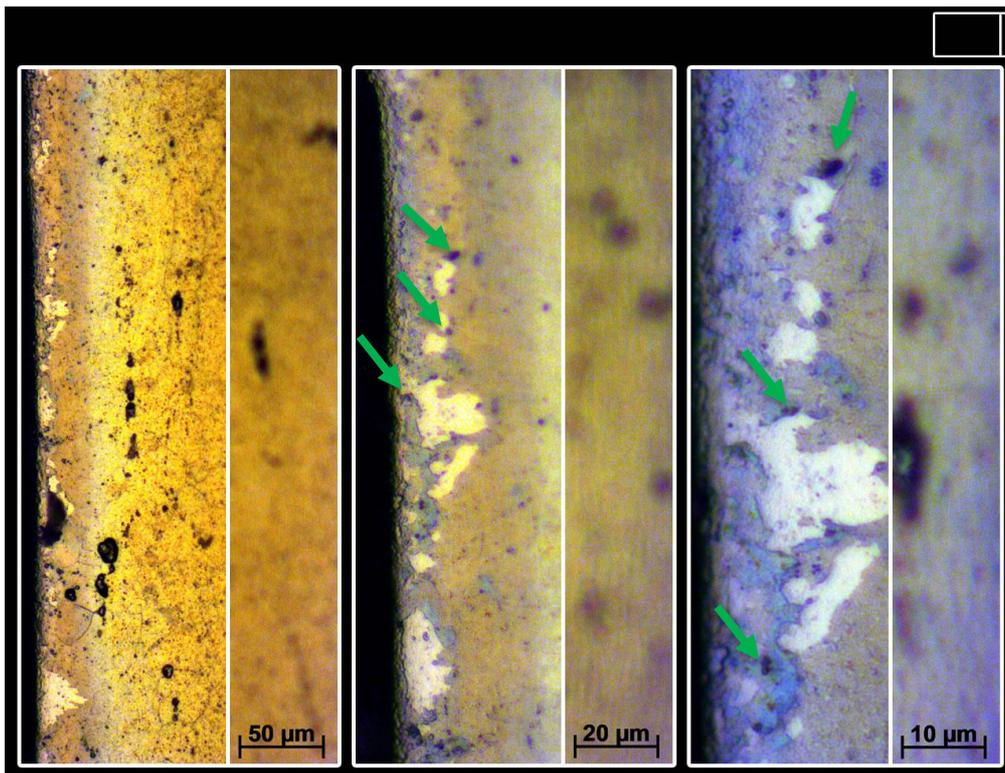


Figura 26 - Microestrutura da amostra RE-00 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

Como afirmado por *Rossino et al, 2010*, algumas regiões apresentam segundas fases denominadas de “Compostos Intermetálicos” (IMs), indicadas pelas setas em azul nas imagens da **Figura 26**, **Figura 27**, **Figura 28** e **Figura 29**. Exceto pela **Figura 27**, existem muito poucos contornos de grãos expostos pelo fato da amostra não ter sofrido nenhum tipo de ação corrosiva (*ROSSINO, ASHIUCHI, et al.*).

Na borda esquerda da amostra RE-00 (**Figura 27**), pode-se notar grandes inclusões circulares pelas elipses em vermelho, enquanto que as setas em verde indicam inclusões menores.

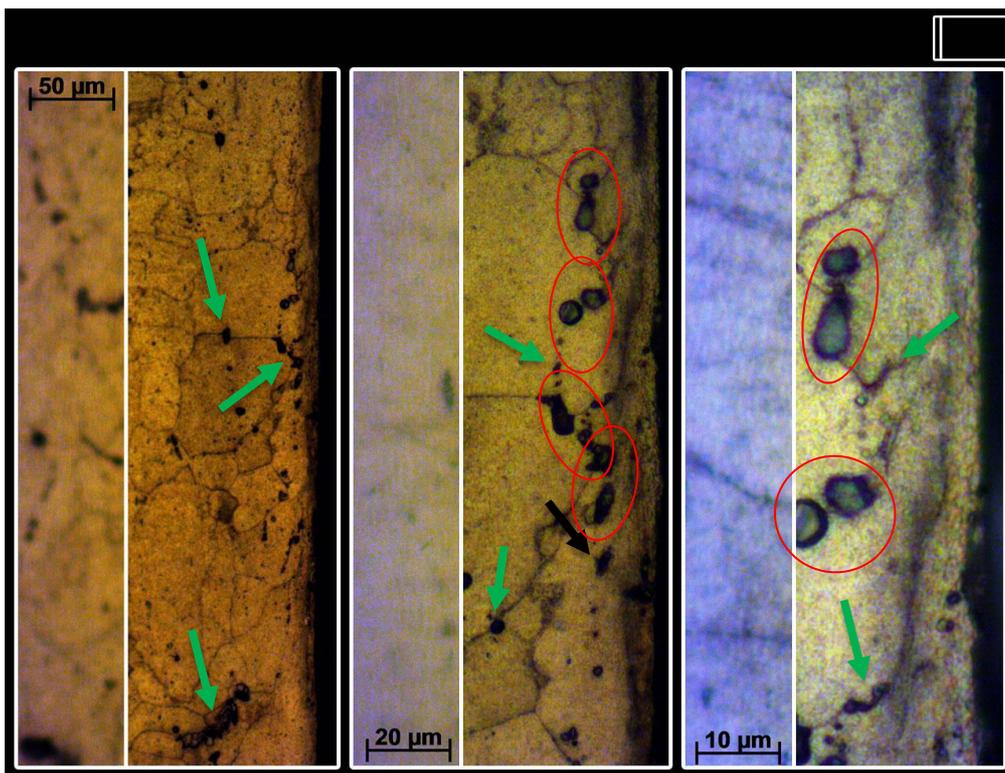


Figura 27 - Microestrutura da amostra RE-00 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

Na borda inferior da amostra RE-00 (**Figura 28**) é mostrado que, além de inclusões, identificadas pelas setas em verde, há presença de compostos intermetálicos (setas em azul), sendo possível identifica-los apenas no aumento de 1000 vezes.

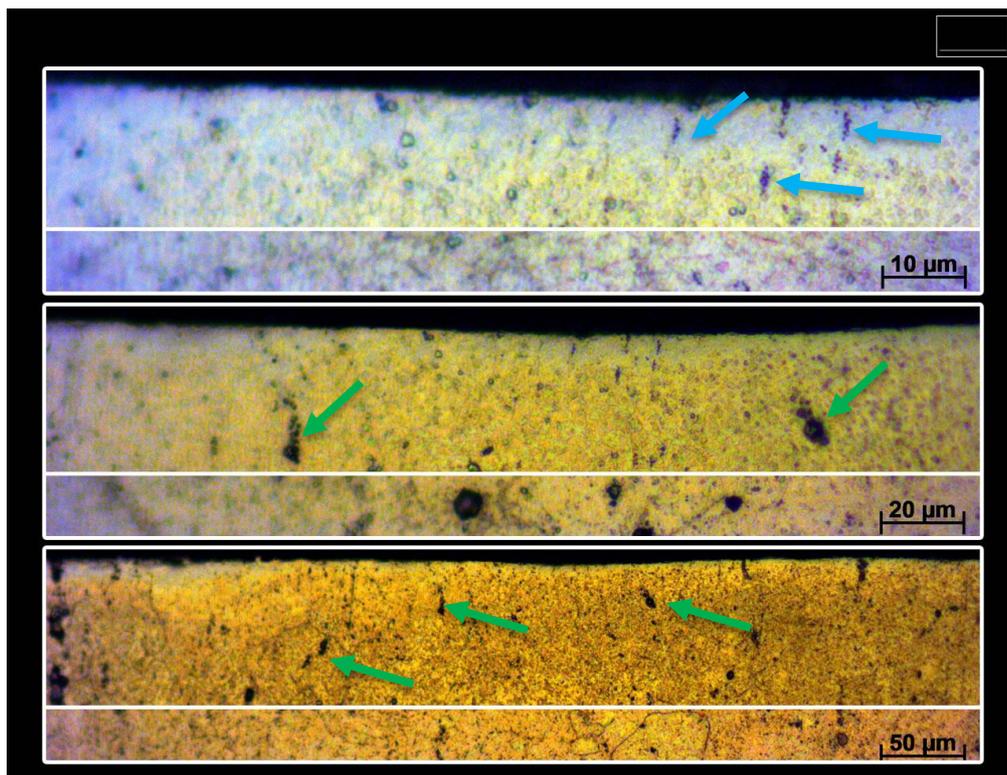


Figura 28 - Microestrutura da amostra RE-00 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

Na **Figura 29**, representando a borda superior da amostra RE-00, não foi diferente: as setas verdes representam inclusões na amostra.

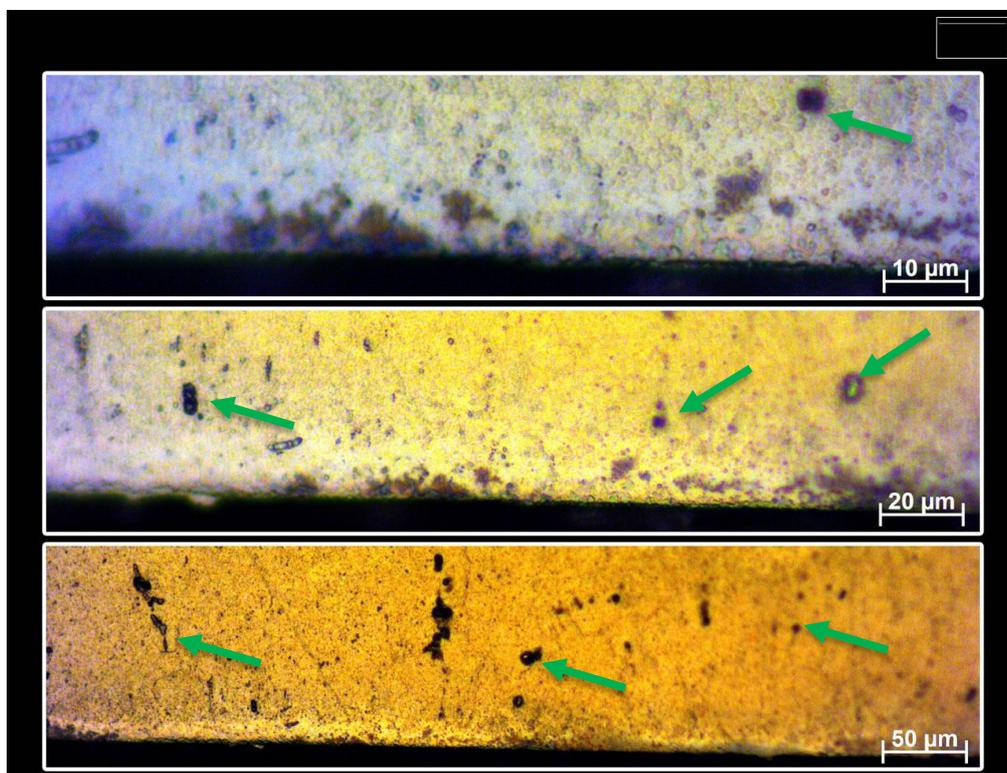


Figura 29 - Microestrutura da amostra RE-00 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.3. Amostras expostas por 07 dias

##### 4.1.3.1. Comparativo entre as amostras 03A07 e 08F07

Na borda direita da amostra 03A07 (**Figura 30**) percebeu-se que mesmo após ataque químico os contornos de grãos não foram nitidamente revelados. Porém é possível observar, pelas setas em preto, pontos que são possíveis pites; as em verde indicam inclusões.

Já na amostra 08F07 (**Figura 31**) os contornos de grãos aparecem com maior nitidez e com espessura variada. Pode-se observar pites no contorno de grão caracterizando a corrosão do tipo “mista” com pites profundos, identificada pelas setas em vermelho.

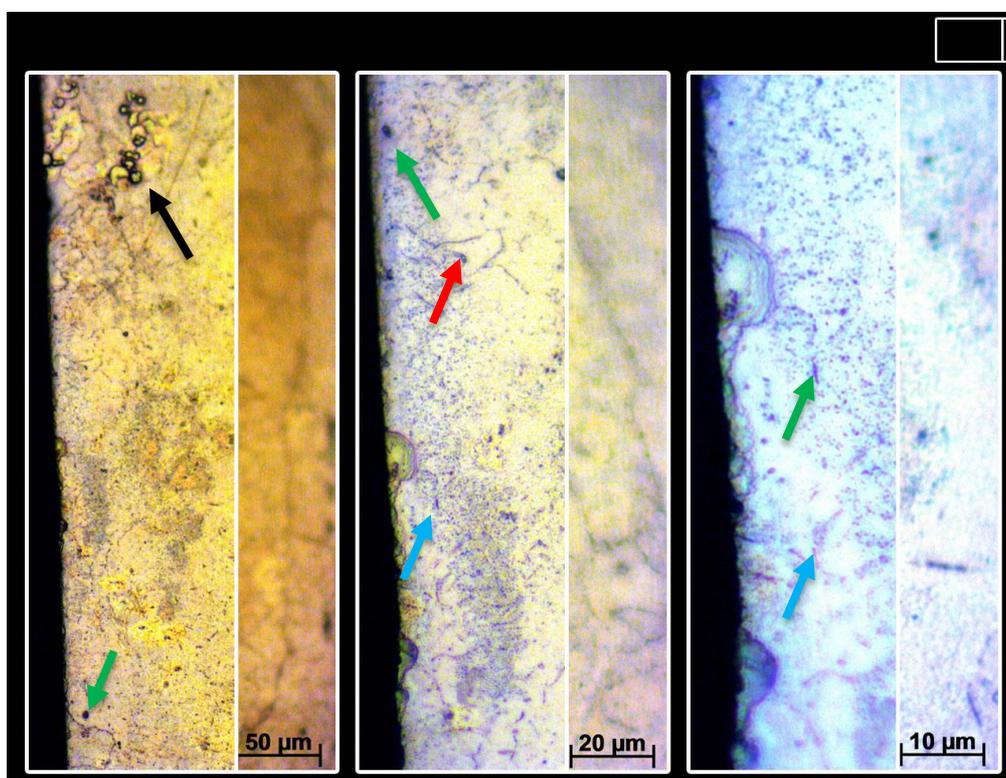


Figura 30 - Micrografia da amostra 03A07 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

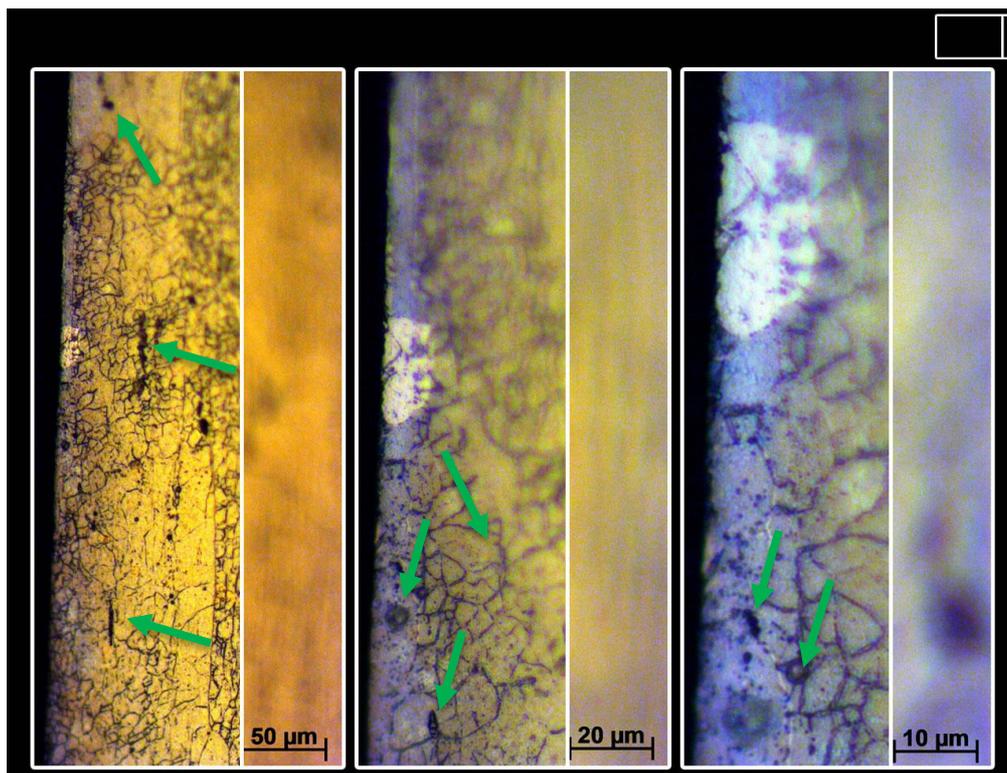


Figura 31 - Micrografia da amostra 08F07 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

Na amostra 03A07 (**Figura 32**) é possível observar, além de inclusões (setas verde), pequenos poros. Já na amostra 08F07 (**Figura 33**), é possível verificar regiões com corrosão intergranular, além de que a quantidade de pites presentes é praticamente nula, não sendo possível identificá-los. Na amostra 08F07 (**Figura 33**), também nota-se a corrosão intergranular, indicada pela exposição dos contornos de grãos, porém sem evidência de pites. Vale ressaltar que a corrosão intergranular não foi indicada por setas por ser nítida no contorno de grão, este que foi posto em evidência pelo ataque químico.

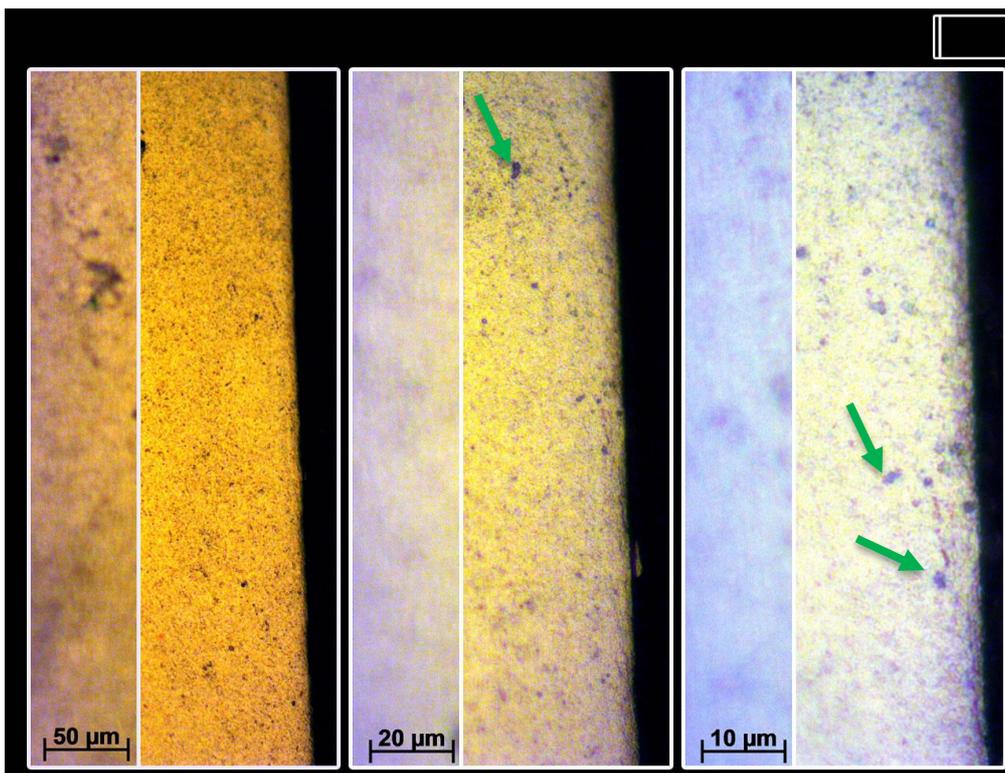


Figura 32 - Micrografia da amostra 03A07 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

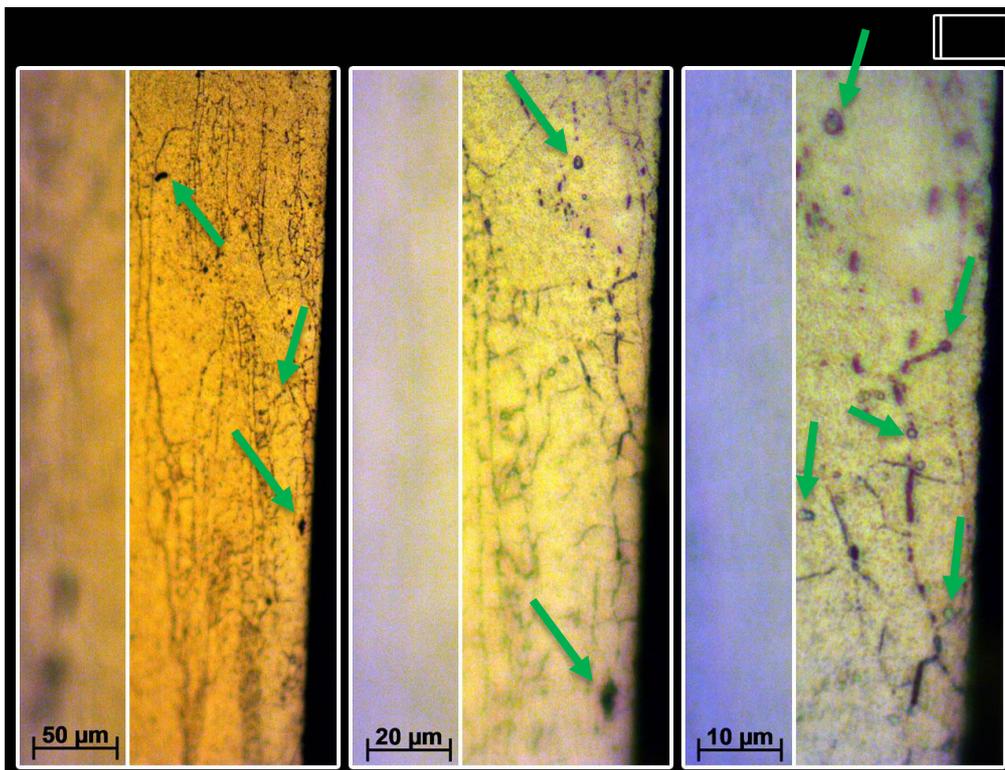


Figura 33 - Micrografia da amostra 08F07 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

A **Figura 34** e **Figura 35**, respectivamente, amostras 03A07 e 08F07, apresentam a borda superior de cada uma delas. Pode-se notar uma corrosão

muito mais acentuada na amostra 08F07 devido a maior densidade de contornos de grãos expostos. Pelas setas vermelhas também pode-se afirmar que há pites profundos nos contornos de grãos.

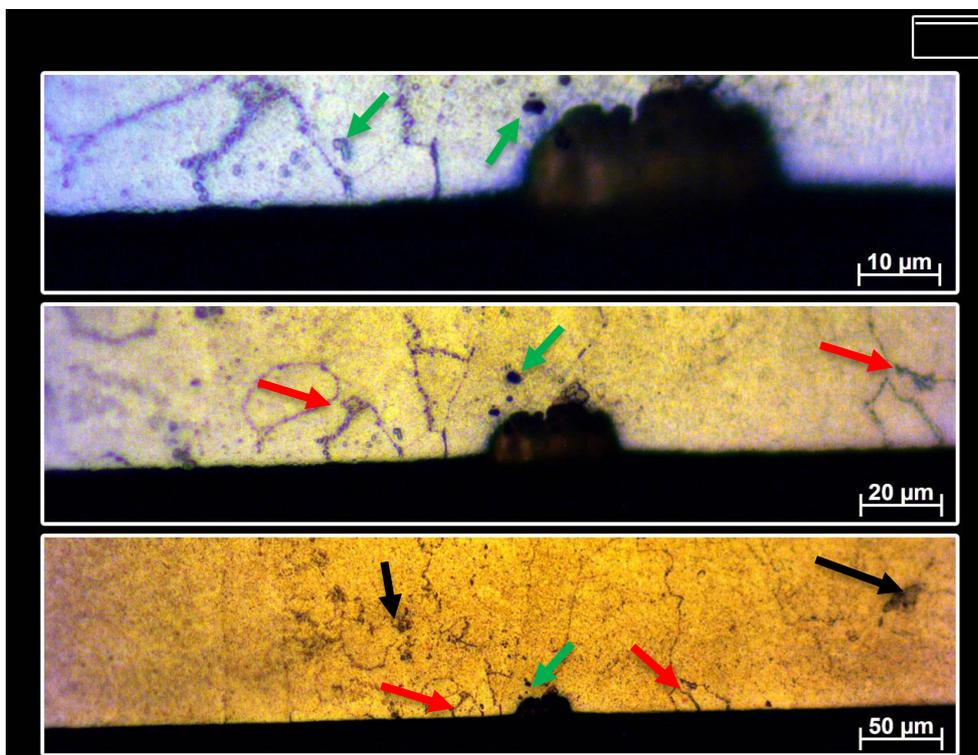


Figura 34 - Micrografia da amostra 03A07 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

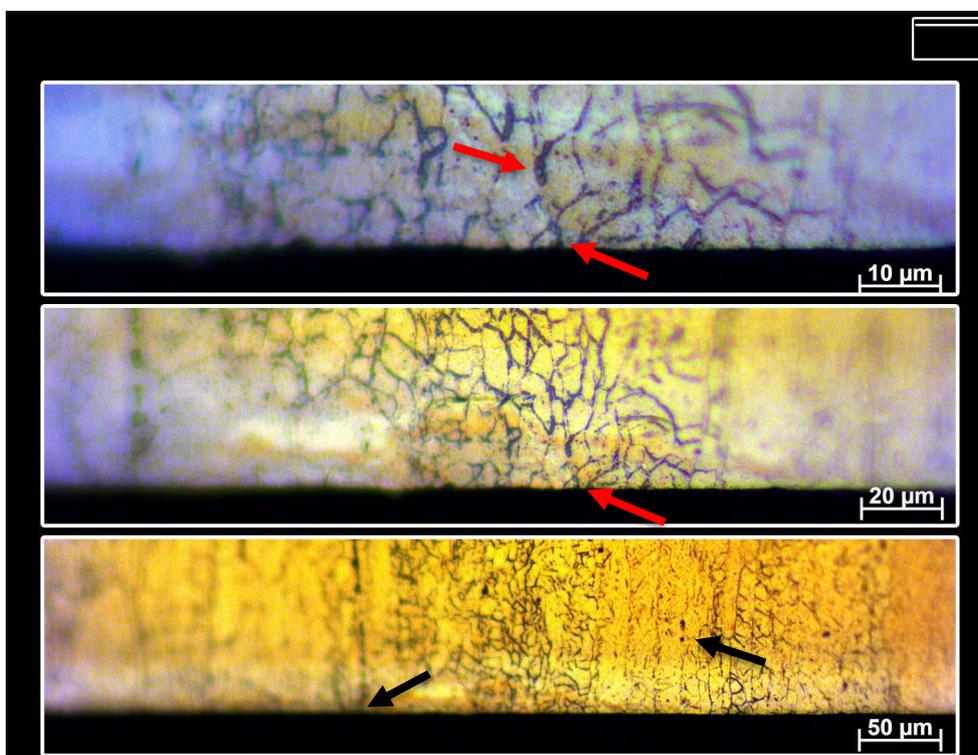


Figura 35 - Micrografia da amostra 08F07 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

Na borda inferior das amostras 03A07 e 08F14, representada pela **Figura 36** e **Figura 37**, respectivamente, é possível notar maior incidência de pites na amostra 03A07 e maior efeito da corrosão intergranular, com contornos de grãos de espessura significativamente maior em alguns regiões, quando comparada à amostra 08F07, como mostram os quadros em vermelho (**Figura 37**), evidenciando a fragilização do contorno de grão.

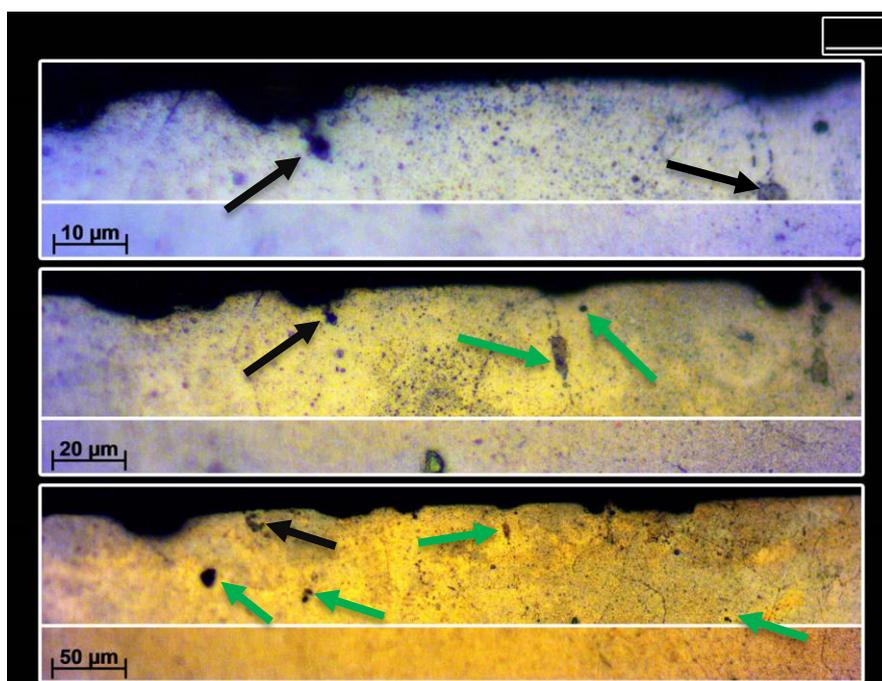


Figura 36 - Micrografia da amostra 03A07 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

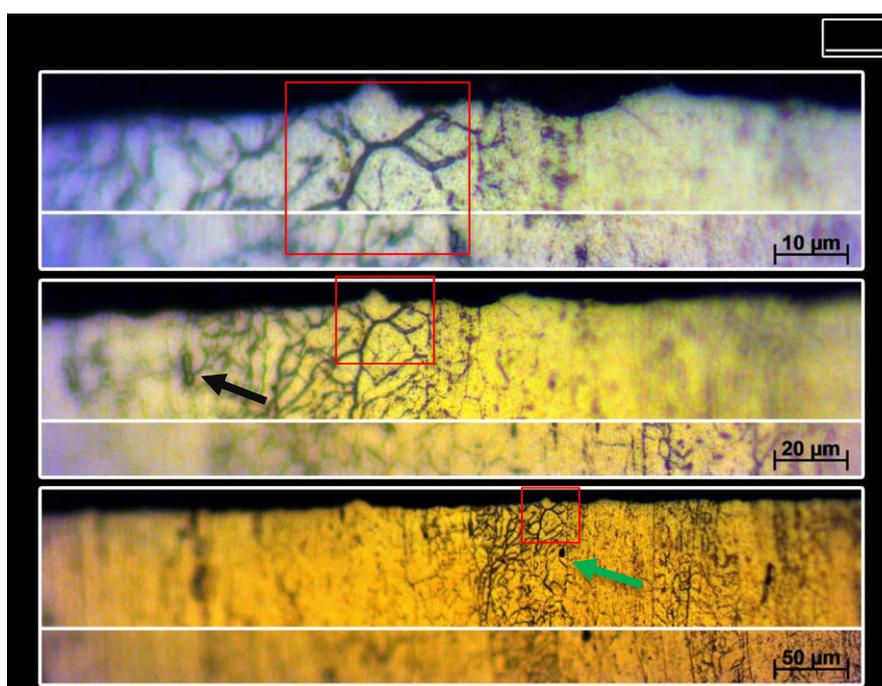


Figura 37 - Micrografia da amostra 08F07 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.4. Amostras expostas por 14 dias

##### 4.1.4.1. Comparativo entre as amostras 02F14 e 07A14

Comparando a borda direita das amostras 02F14 e 07A14, apresentadas pela **Figura 38** e **Figura 39**, respectivamente, pode-se notar que existe uma maior densidade de contornos de grãos expostos na amostra 07A14, cuja imersão foi somente em água.

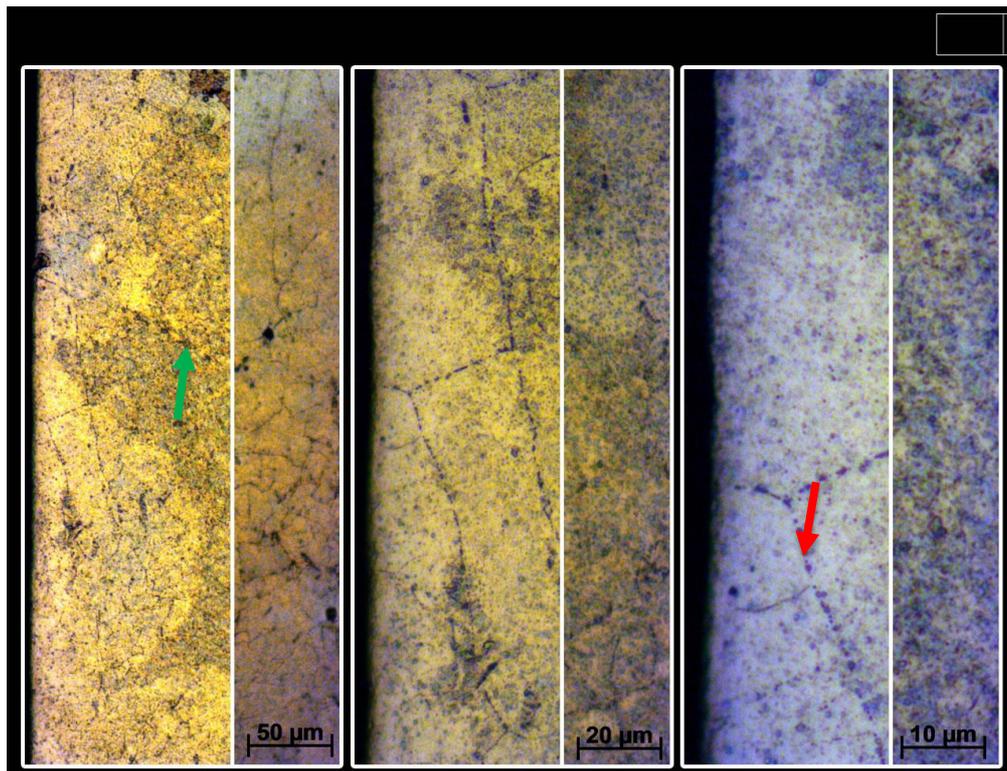


Figura 38 - Micrografia da amostra 02F14 – Borda Direita - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

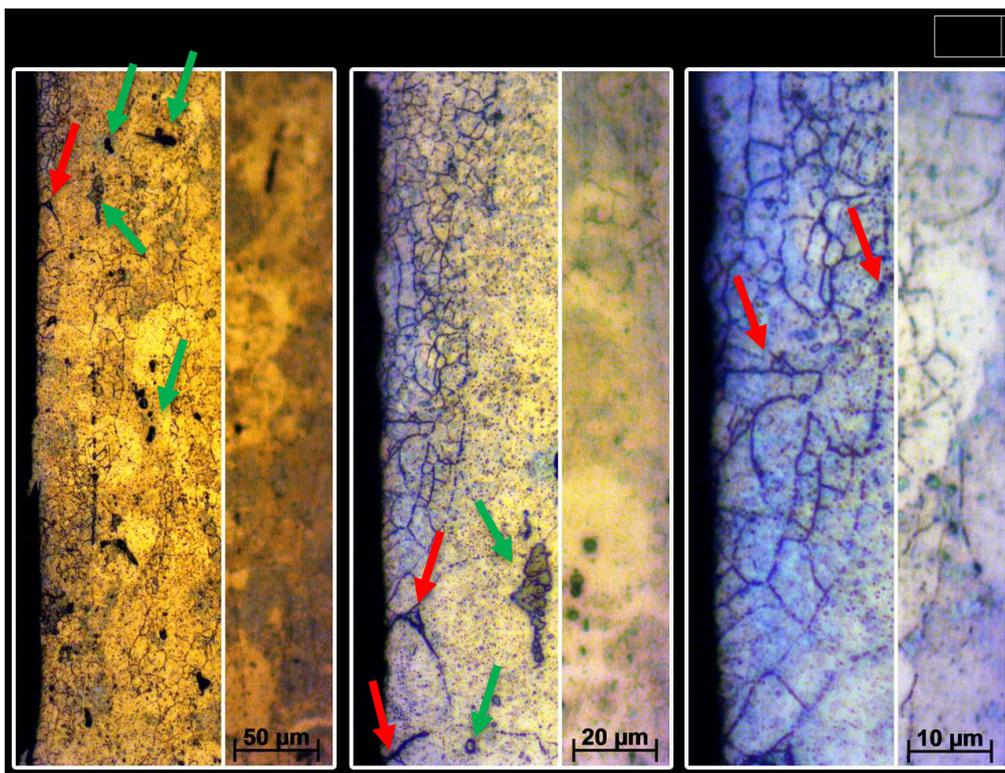


Figura 39 - Micrografia da amostra 07A14 – Borda Direita - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

A amostra 07A14 (**Figura 41**), que mostra a outra borda da amostra, possui contornos de grãos muito nítidos e maior incidência de pites quando comparada à amostra 02F14 (**Figura 40**), que basicamente expõe apenas inclusões ou poros, representados pelas setas verdes.

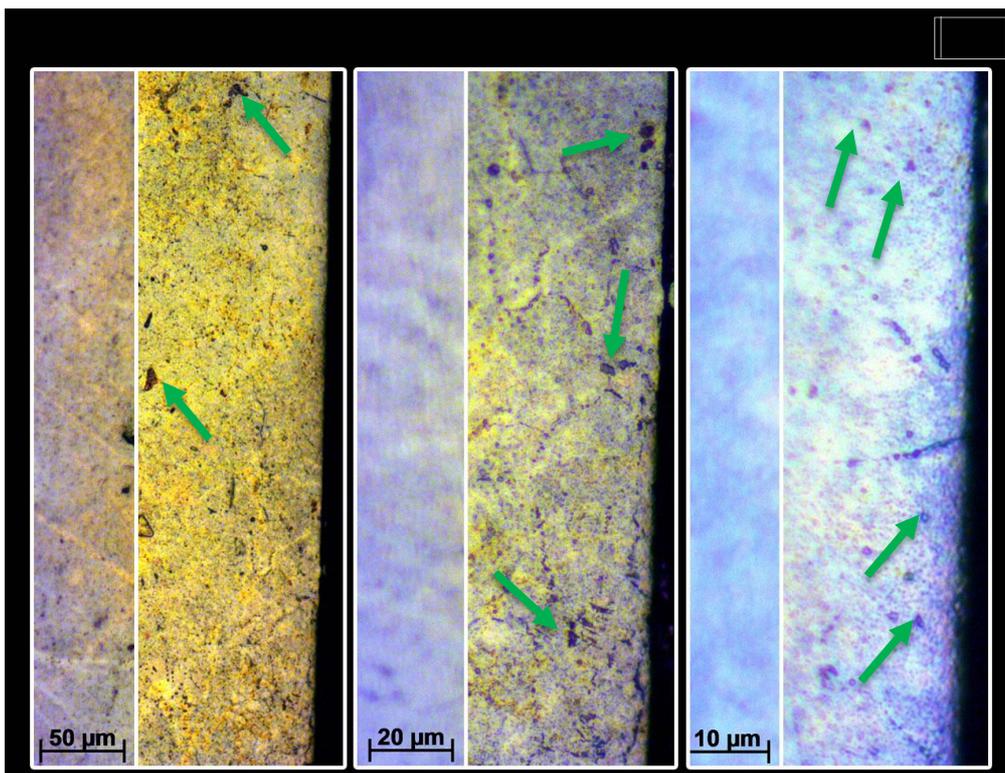


Figura 40 - Micrografia da amostra 02F14 – Borda Esquerda - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

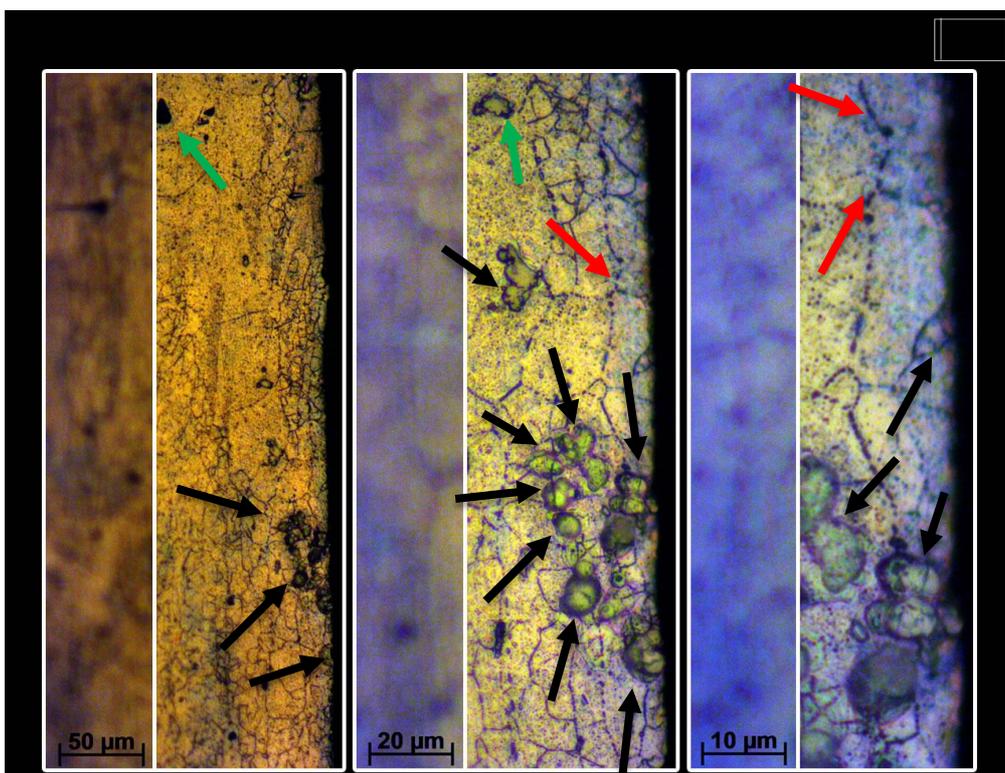


Figura 41 - Micrografia da amostra 07A14 – Borda Esquerda - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

A **Figura 42**, que contempla a amostra 02F14, possui uma estrutura diferenciada e tem sua região destacada por uma elipse em vermelho. Tal

fenômeno não respeita a região de contorno de grão e adentra à amostra, tendo sua espessura reduzida conforme a profundidade, conhecido como corrosão transgranular. A amostra 07A14 (**Figura 43**) apresenta pites, corrosão mista e, na região destacada, há uma estrutura que pode ser definida como uma grande inclusão.

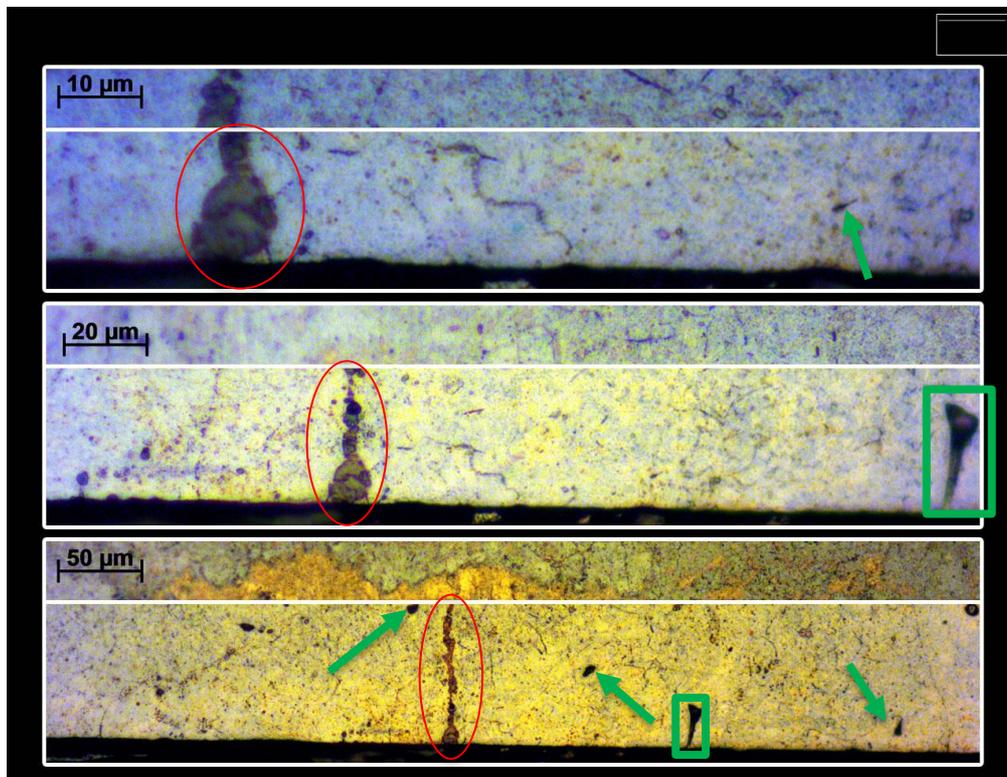


Figura 42 - Micrografia da amostra 02F14 – Borda Superior - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

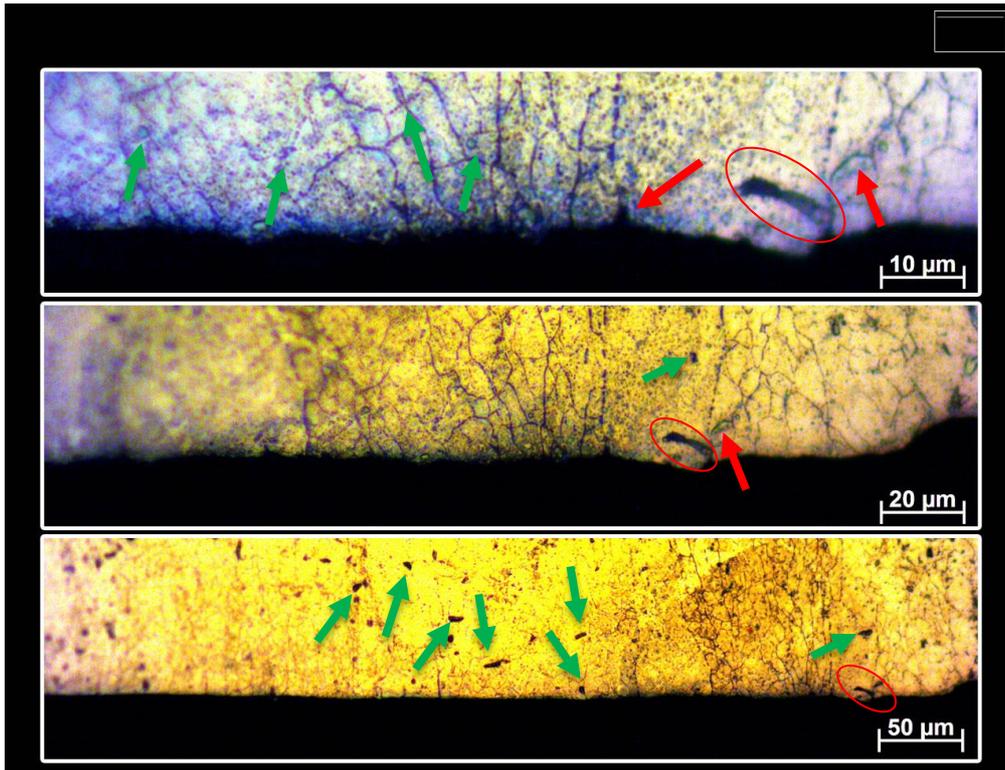


Figura 43 - Micrografia da amostra 07A14 – Borda Superior - Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

Na amostra 02F14 (**Figura 44**) há regiões nítidas de corrosão intergranular, porém, com baixa densidade de contornos de grão expostos. Novamente, é notada a presença de pites. Na borda inferior da amostra 07A14, apresentada na **Figura 45**, nota-se a presença de pites e corrosão intergranular com menor densidade quando comparada à sua borda esquerda. Isso ocorre pelo fato da região possuir grãos maiores e a corrosão favorecida aqui é a corrosão intergranular.

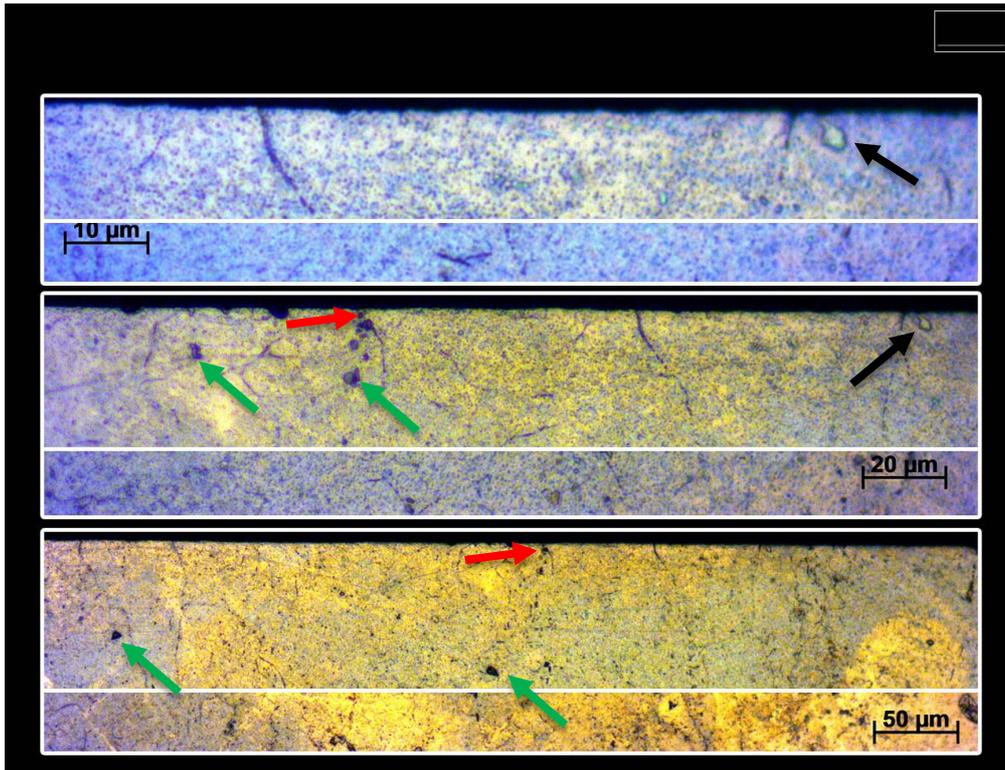


Figura 44 - Micrografia da amostra 02F14 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

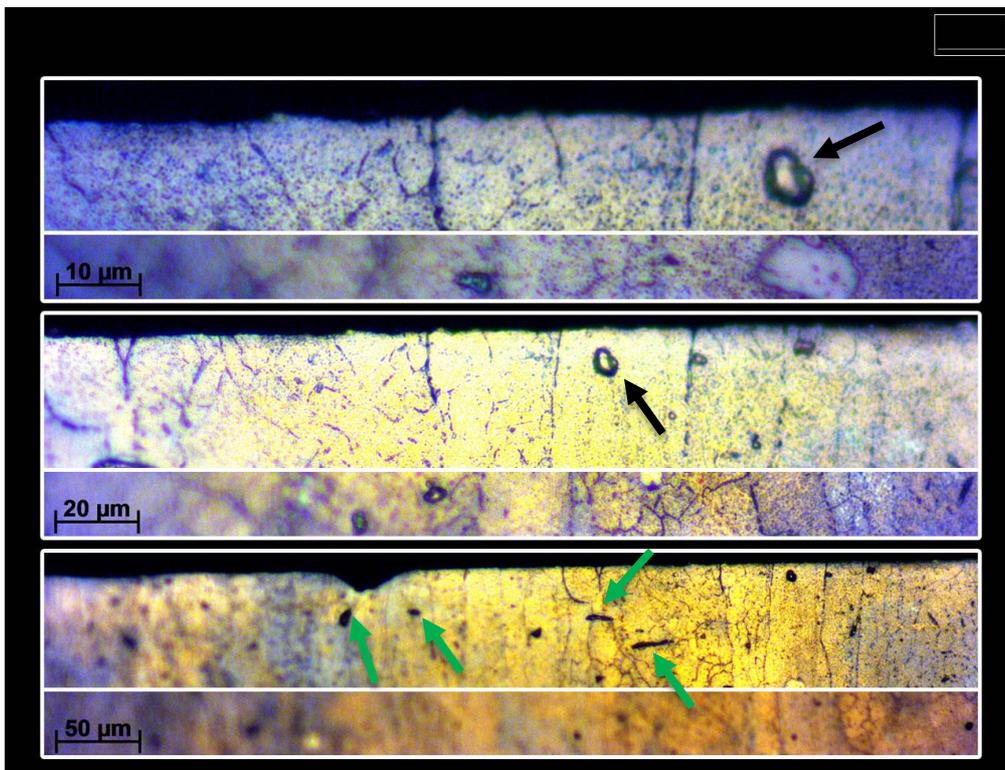


Figura 45 - Micrografia da amostra 07A14 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.5. Amostras expostas por 35 dias

##### 4.1.5.1. Comparativo entre as amostras 01A35 e 12F35

As amostras 01A35 e 12F35 estiveram em imersão em água e fluido de corte, respectivamente, durante 35 dias. Essas amostras são de fundamental importância para a análise do efeito da corrosão intergranular causada pelos meios corrosivos. São elas que foram submetidas à condição de corrosão mais extrema, devido ao maior tempo de imersão, logo, os resultados mais evidentes foram extraídos da análise dessas amostras.

A borda direita das amostras 01A35 e 12F35 são representadas pela **Figura 46** e **Figura 47**, respectivamente. Pode-se notar grãos menores na **Figura 46** e, conseqüentemente, maior densidade de contornos de grãos. A presença de *End grain pit* (setas vermelhas) foi constatada na amostra 12F35, já as setas verdes representam inclusões.

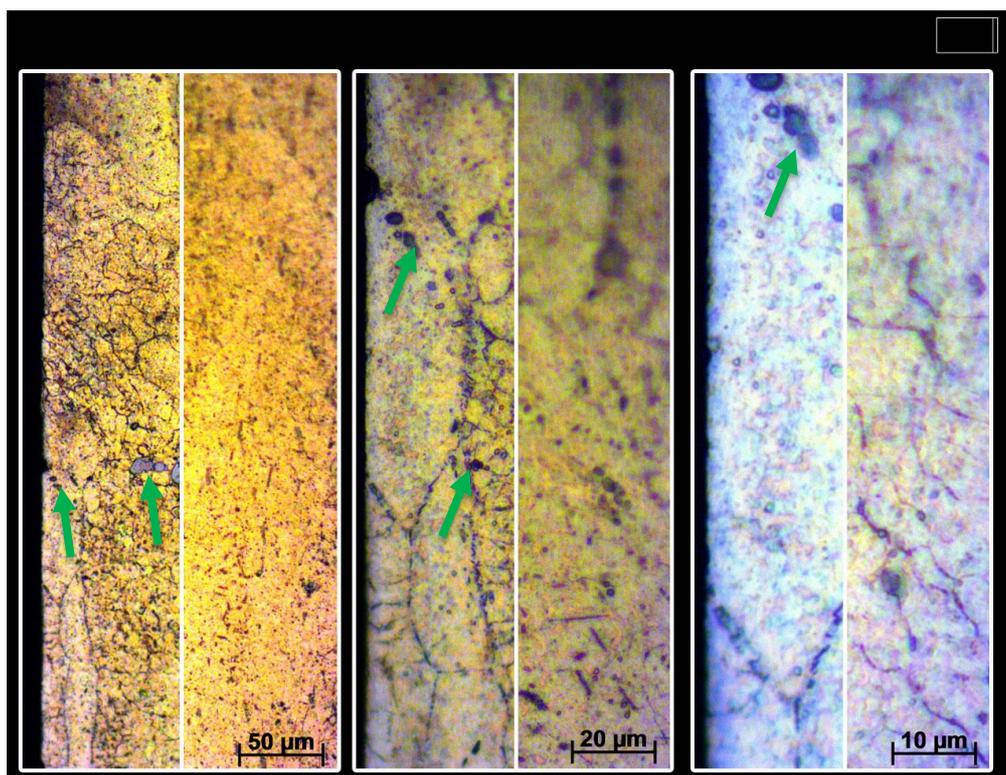


Figura 46 - Micrografia da amostra 01A35 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

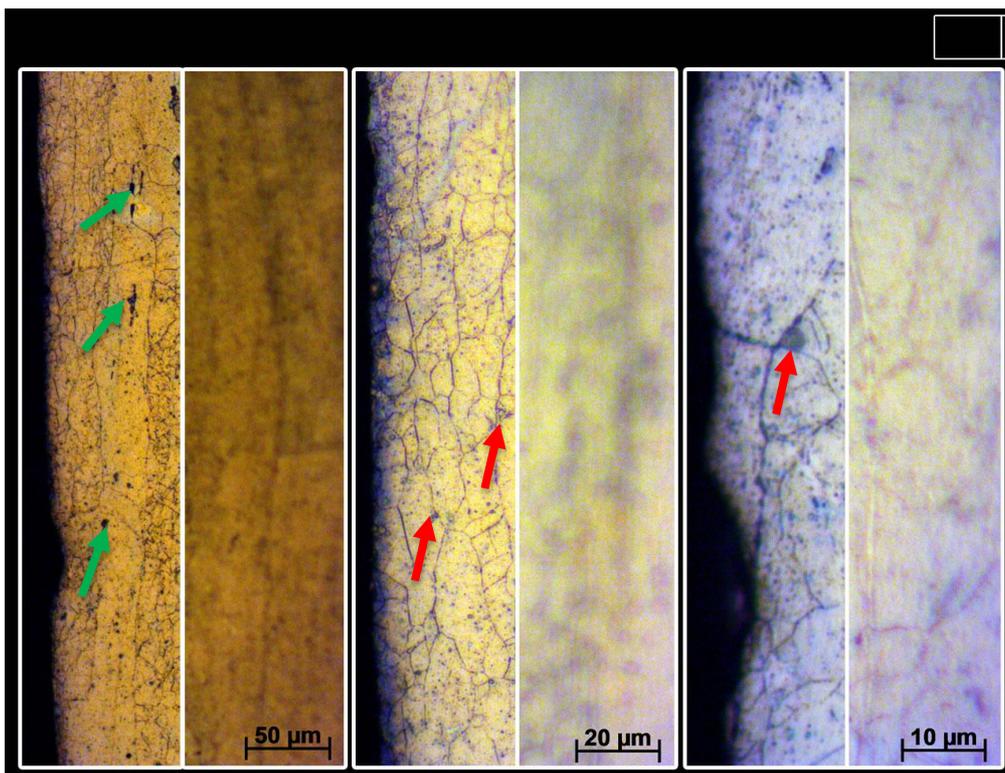


Figura 47 - Micrografia da amostra 12F35 – Borda Direita – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

A **Figura 48** e **Figura 49** representam a borda esquerda das amostras 01A35 e 12F35, respectivamente. Na amostra 01A35 os grãos são mais uniformes e estão presentes em maior quantidade. Já a amostra 12F35 possui grãos alongados e maiores, havendo menor densidade de contornos de grãos na imagem. Em ambas as amostras, além da corrosão intergranular, há contornos de grãos com pites profundos (setas vermelhas), além das constantes inclusões ou poros (setas verdes).

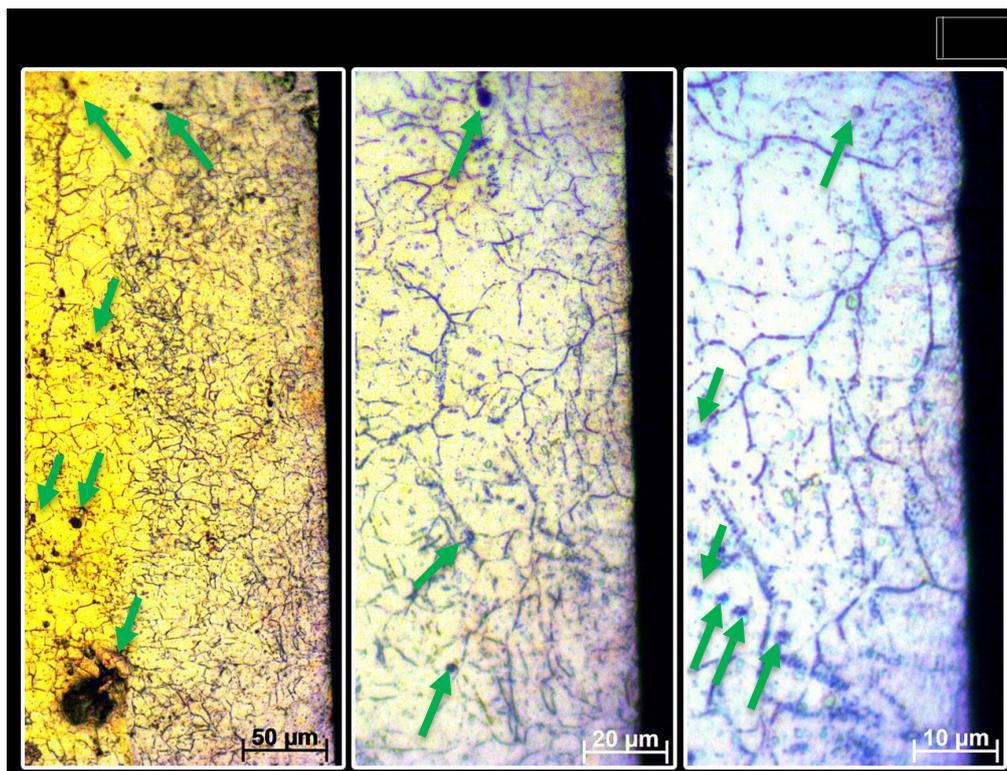


Figura 48 - Micrografia da amostra 01A35 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

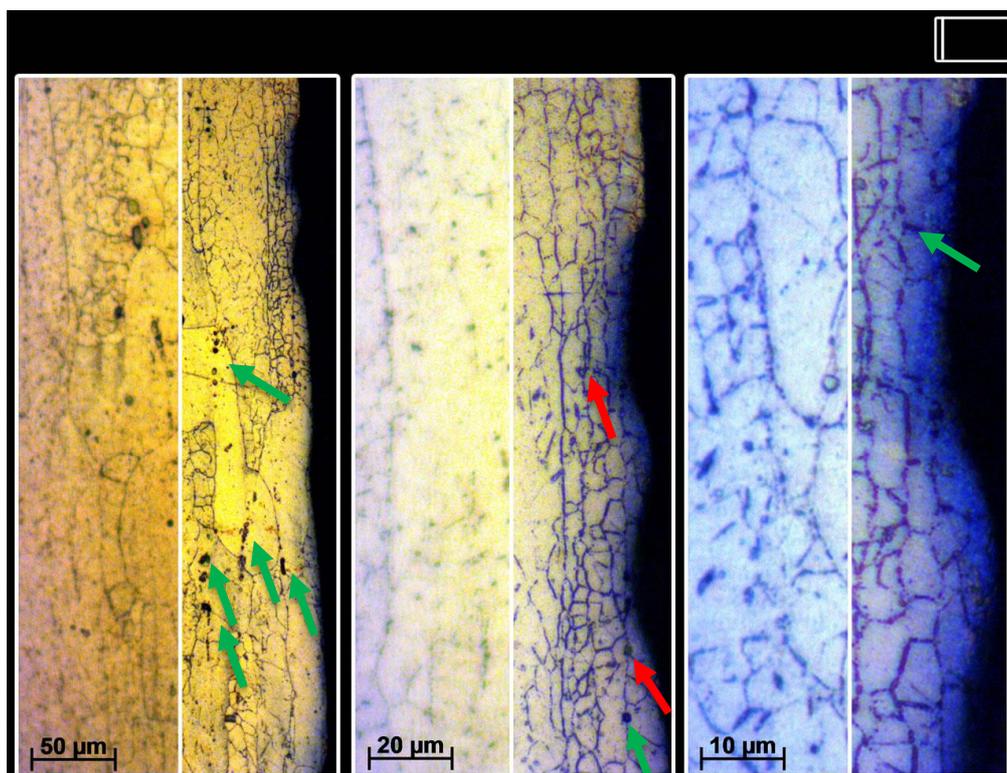


Figura 49 - Micrografia da amostra 12F35 – Borda Esquerda – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

A borda superior das amostras 01A35 e 12F35 é contemplada pela Figura 50 e Figura 51, respectivamente. Na primeira há uma formação

puntiforme intergranular que se encontra destacada pelo quadro em vermelho. Trata-se de um acumulado de uma fragilização do contorno de grão que adentrou a amostra até certa profundidade. Na segunda amostra, 12F35, encontram-se pites representados pelas setas pretas, inclusões representadas pelas setas verdes, e, corrosão intergranular acentuada devido à grande densidade de contornos de grãos na região.

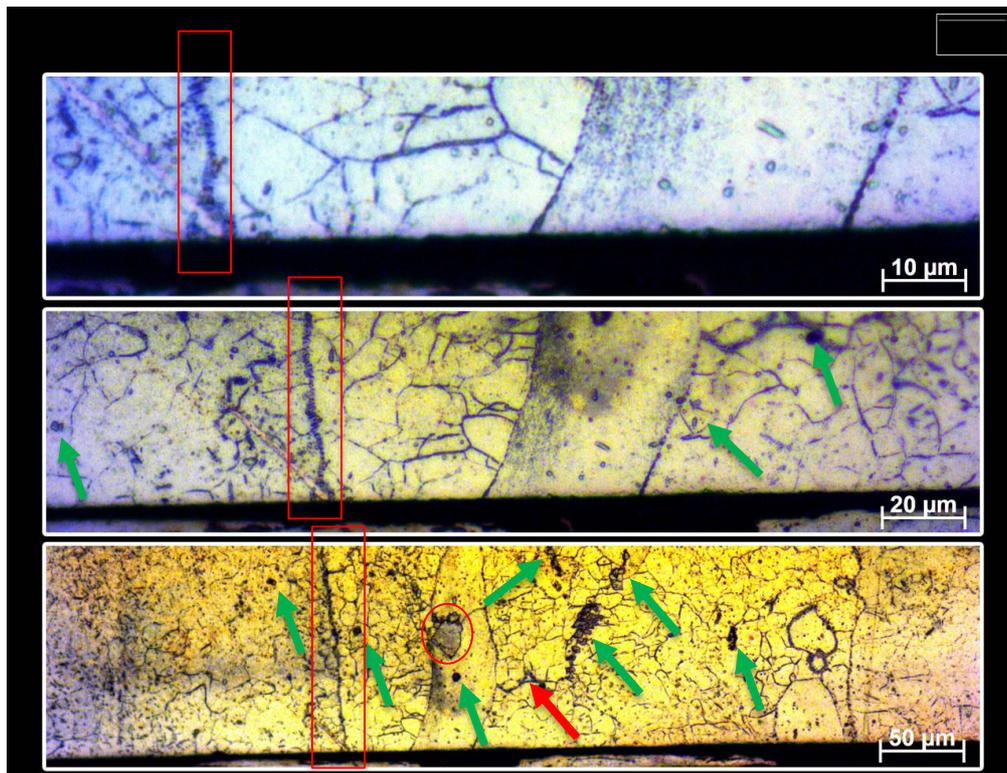


Figura 50 - Micrografia da amostra 01A35 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

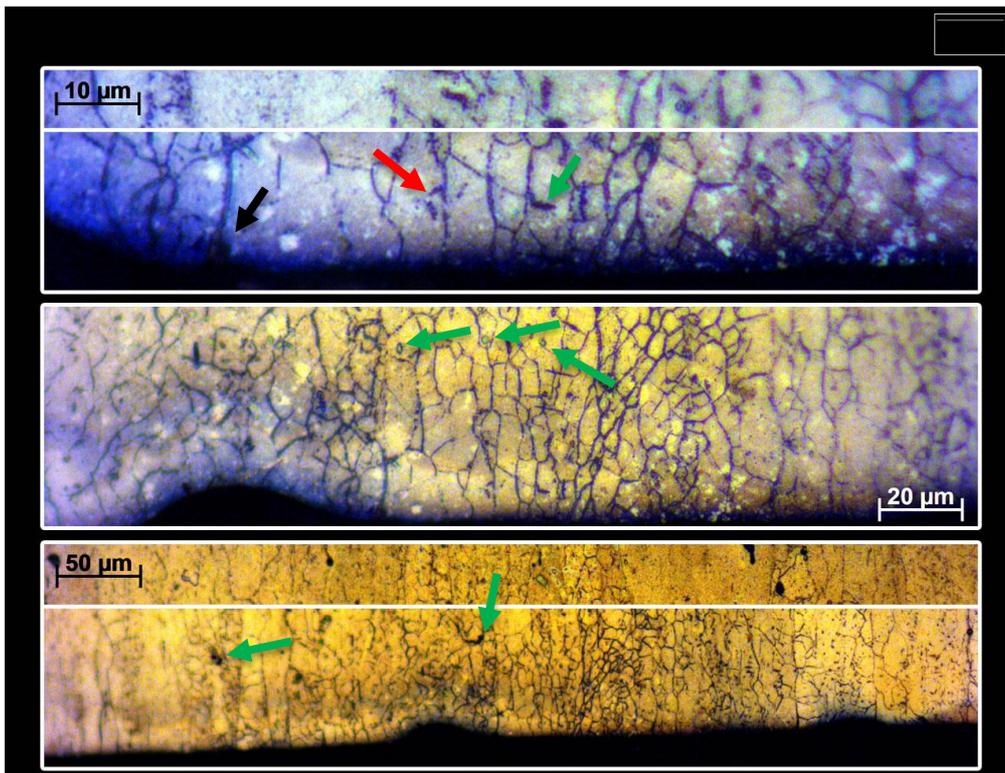


Figura 51 - Micrografia da amostra 12F35 – Borda Superior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

A **Figura 52** e **Figura 53** pertencem à borda inferior e representam as amostras 01A35 e 12F35, respectivamente. Na amostra 01A35 (**Figura 52**), destacada pelo quadro em vermelho, há uma formação que possui morfologia de acumulado de pites. Ao lado é possível verificar indicados pelas setas pretas e inclusões indicadas pelas setas verdes.

Na **Figura 53** pode-se observar a corrosão intergranular ocorrendo pela formação inicial de pites profundos na superfície externa, adentrando a amostra 12F14, como mostrado nas setas em vermelho.

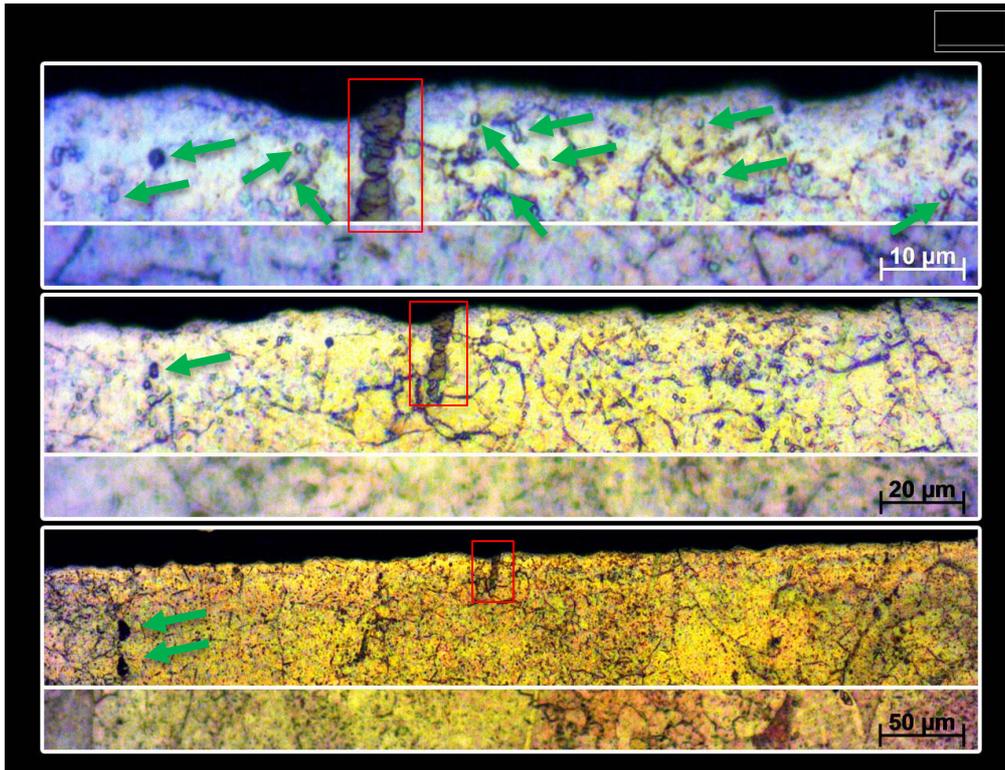


Figura 52 - Micrografia da amostra 01A35 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

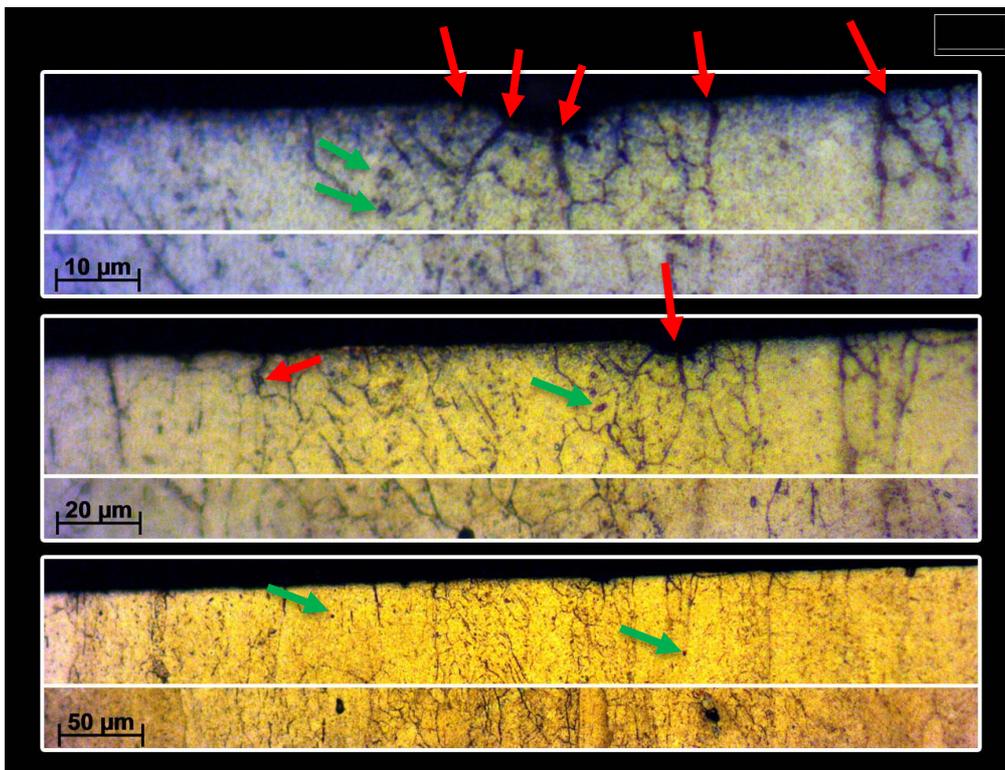


Figura 53 - Micrografia da amostra 12F35 – Borda Inferior – Aumento de 200, 500 e 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.6. Amostras submetidas à 450 °C.

##### 4.1.6.1. Comparativo entre as amostras L1A35 e L2F35

As amostras L1A35 e L2F35 são aquelas que seriam usadas como referência para analisar a influência, ou não, do fenômeno de “Polarização Por Concentração” na corrosão intergranular. Essas amostras foram imersas em balões independentes, ou seja, não estiveram em contato com nenhuma outra amostra durante o período de imersão. Sendo assim, os resultados obtidos pela observação das imagens capturadas de suas bordas se tornariam parâmetro de comparação com outras amostras.

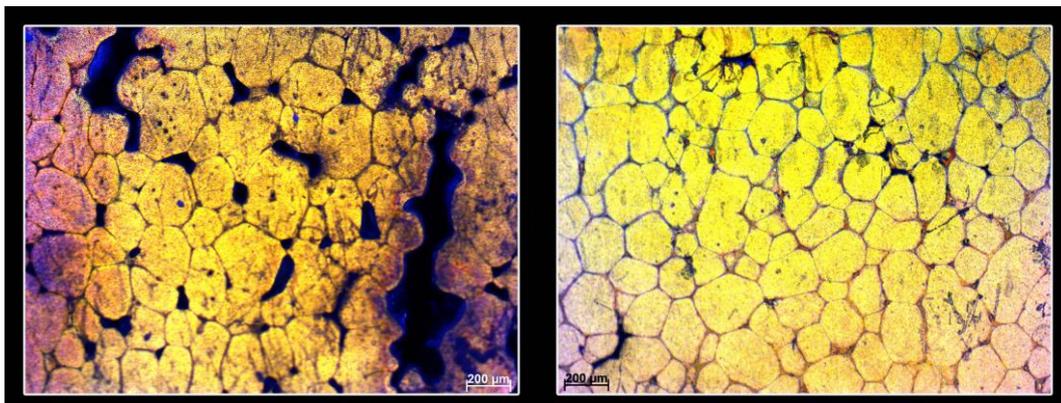
Porém, o superaquecimento causado pelo mau funcionamento do equipamento elevou as amostras L1A35 e L2F35 até 450 °C. Como o problema ocorreu durante um período em que não havia nenhum observador, não se pode afirmar exatamente por quanto tempo as amostras foram submetidas a essa temperatura.

As micrografias apresentadas na **Figura 54**, **Figura 55**, **Figura 56** e **Figura 57** são divididas em lado esquerda e direito, sendo que o lado esquerdo representa a amostra L1A35 e o lado direito a amostra L2F35. Informações sobre o aumento que as amostras foram submetidas durante a obtenção das imagens estão na legenda das mesmas.

Observando cada uma das imagens, nota-se que houve fragilização praticamente de toda a amostra devido a exposição a alta temperatura. Houve separação de boa parte dos grãos pelo fenômeno de *creep damage* (FURTADO e MAY, 2004), termo utilizado para degradação de matérias em altas temperaturas.

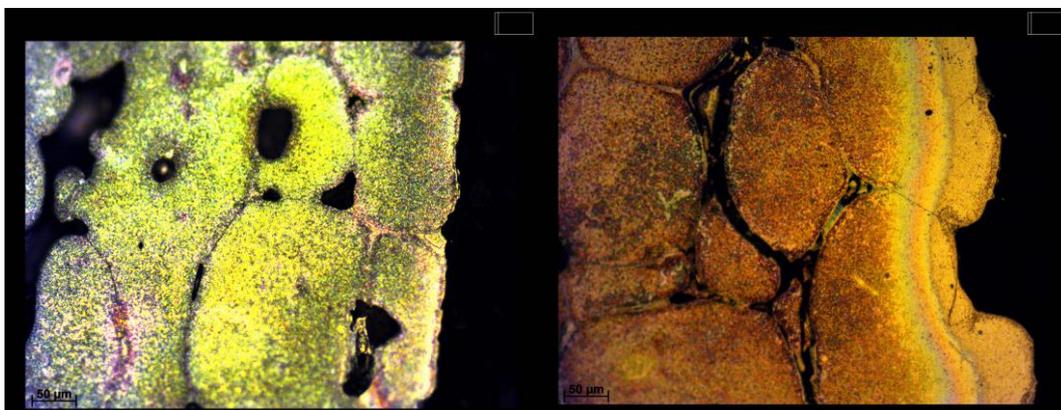
Na **Figura 54** é mostrada a amostra L1A35 à esquerda e a amostra L2F35 à direita. O aumento das imagens é de 50 vezes. Nota-se grande efeito do *creep damage* principalmente na amostra da esquerda, a qual estava imersa em água. Como houve o incidente com as mantas aquecedoras, não se sabe ao certo por quanto tempo a amostra foi submetida à alta temperatura, pois, mesmo sendo equipamentos iguais, provavelmente o tempo suportado pela resistência da manta, em cada caso, não foi igual, logo, comparar as duas

levando em consideração somente esse parâmetro não passaria de especulação.

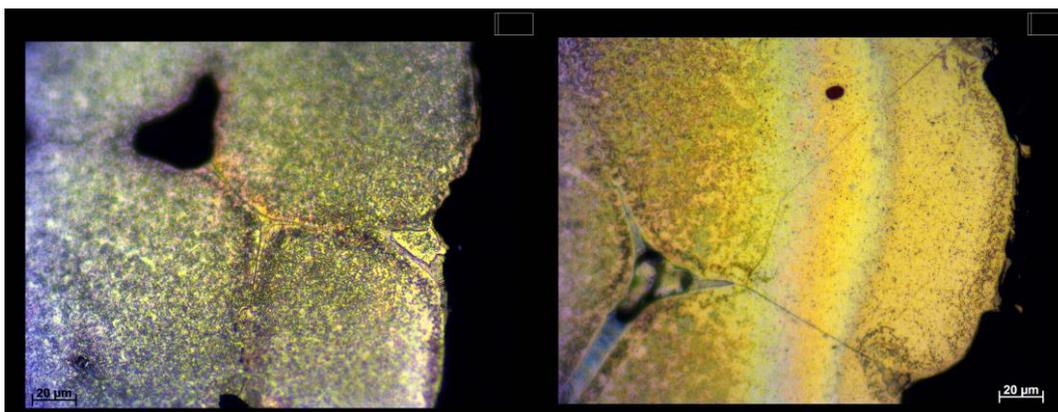


**Figura 54 –** Micrografias das amostra L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita) – Falha no equipamento. Aquecimento até 450 °C. Aumento de 50 vezes. Fonte: Autoria própria.

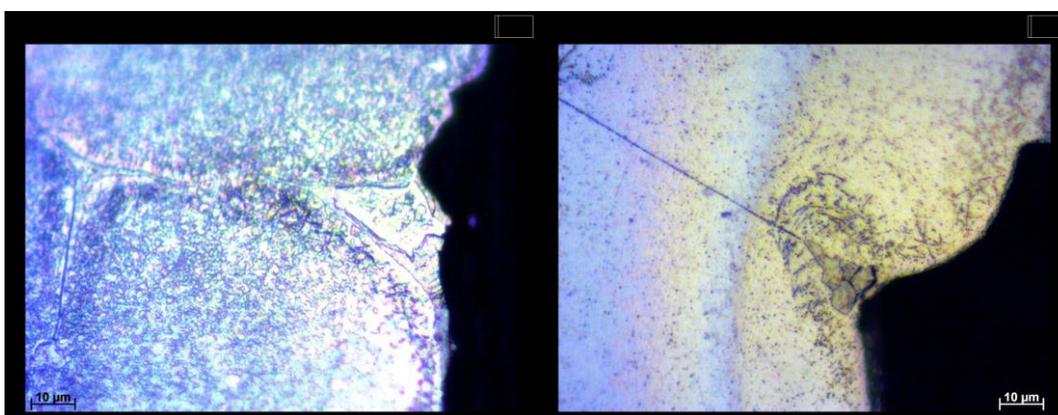
A **Figura 55** apresenta a borda esquerda com aumento de 200 vezes das figuras L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita). Assim como na **Figura 54** o *creep damage* foi maior na amostra L2A35. A **Figura 56** e **Figura 57** também representam a mesma região das amostras, porém com um maior aumento. O valores são de 500 e 1000 vezes, respectivamente.



**Figura 55 -** Micrografia da amostra L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita) –Borda Esquerda – Falha no equipamento. Aquecimento até 450 °C. Aumento de 200 vezes. Fonte: Autoria própria.



**Figura 56 - Micrografia da amostra L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita) – Borda Esquerda – Falha no equipamento. Aquecimento até 450 °C. Aumento de 500 vezes. Fonte: Autoria própria.**



**Figura 57 - Micrografia da amostra L1A35 (esquerda) e L2F35 (direita) – Borda Esquerda – Falha no equipamento. Aquecimento até 450 °C. Aumento de 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.**

#### 4.2. Discussão

Os resultados se mostraram válidos a fim de comparar a influência do fluido de corte na corrosão intergranular da liga 7050-T7451. As condições simuladas condizem com o que é encontrado durante o processo de usinagem, pois, localizadamente, o contato entre a liga e o fluido de corte ocorre em um espaço de tempo muito curto, porém, a tensão exercida pela ferramenta de corte é muito alta, elevando muito a temperatura, pontualmente, o que facilita a corrosão naquela região. Com a finalidade de averiguar a gravidade do fenômeno da corrosão e assegurar o uso do fluido de corte sem maiores riscos à integridade do material, foi projetado um sistema que submeteu, por um longo período de tempo, as amostras de alumínio à água e ao fluido de corte, levando em consideração uma temperatura média razoável que não compromettesse o tratamento térmico feito no material.

Foi possível observar diferenças em como a corrosão aconteceu, de acordo com o tempo de exposição e meio de imersão. Nas amostras imersas em água e fluido de corte, no período de sete dias, foi possível notar que a amostra que sofreu ação do fluido de corte apresentou densidade de contornos de grãos evidentes mais elevada. Isso indica que o fluido de corte agiu como agente corrosivo na região de contorno de grão e tornou-a mais susceptível ao ataque químico. Nas amostras imersas em água a microestrutura foi muito pouco revelada, ratificando que sua integridade física, após o período de imersão, foi pouco afetada.

Nota-se também que o comprimento dos grãos alongados dificulta a propagação da corrosão das bordas direita e esquerda dessas amostras, pois os grãos possuem orientação preferencial partindo da borda superior para a borda inferior. Para penetrar na amostras, a corrosão precisa vencer a matriz metálica ou contornar o grão, logo, quanto maior o grão na região de borda, menor será a penetrabilidade da corrosão naquela região. Quando havia maior quantidade de grãos na região de borda houve grande concentração de corrosão intergranular, expondo a microestrutura. Isso ocorreu devido ao sentido da laminação que o bloco do qual as amostras foram retiradas foi submetido.

A corrosão intergranular foi facilitada pelo longo período de tempo de imersão, além da temperatura elevada. Com esses parâmetros, a difusão dos elementos de liga para o contorno de grão ocorre mais facilmente, formando uma segunda fase que possui potencial eletroquímico diferentes da matriz de Al, sendo assim, uma pilha galvânica localizada é gerada, deixando a região de contorno de grão mais susceptível à corrosão. Esse fenômeno não ocorre no interior do grão pelo fato da difusão nesse meio necessitar de maior energia, não fornecida pelo sistema em questão, logo, a corrosão transgranular é muito menos observada (GENTIL, 1996).

Os pites estiveram presentes em algumas amostras, tanto na matriz metálica quanto nos contornos de grão. Os *end grain pits* ou “pites profundos” ocorrem em várias amostras nos contornos de grão. Nas amostras com bordas com maior densidade de grãos, ou seja, grãos menores, esse fenômeno é mais acentuado. Nas amostras imersas em fluido de corte foi notada a presença de mais pontos de *end grain pits*. Isso impacta diretamente nas propriedades

mecânicas do material, já que esses defeitos microestruturais são grandes concentradores de tensão, agindo como nucleadores de trinca.

Para as amostras imersas nos meios corrosivos por 14 dias houve uma inversão de resultados. A água se mostrou mais efetiva para corroer as regiões intergranulares do que o fluido de corte.

De acordo com a literatura, baixa concentração de NaCl é suficiente para causar pites em amostras de alumínio (DE, SAGAR, *et al.*, 2010). O fluido de corte possui aditivos minerais mas sua base é vegetal, ou seja, um óleo. O óleo presente no fluido atuou como um mecanismo que, após um determinado período, protegeu a amostra da corrosão causada pela água.

As amostras de 35 dias ratificam a afirmativa anterior ao apresentar uma corrosão intergranular mais acentuada na amostra imersa em água, sendo o efeito da corrosão mais efetivo.

A corrosão intergranular ocorreu em todas as bordas imersas, tanto em fluido de quanto em água, e suas variações foram causadas também pelas variações microestruturais. Quando os grãos são menores, a densidade de contornos de grãos também é menor, sendo assim, pode-se considerar que a área susceptível à corrosão naquela região é maior.

A princípio, foi considerado que o fenômeno de “Polarização por Concentração” poderia afetar os resultados da corrosão nas bordas das amostras. Por ter ocorrido contato direto entre algumas faces durante o período de imersão, seria interessante utilizar amostras que fosse imersas isoladamente nos meios corrosivos, porém, as amostras que serviriam de referência sofreram problema de superaquecimento devido à falha no equipamento. Sendo assim, visualmente não foi possível identificar se houve realmente interferência causada por esse efeito.

Apesar do acidente ocorrido e da perda da referência, o resultado foi válido para analisar o fenômeno do empobrecimento por cobre. Este é o fator que mais influencia a corrosão intergranular em ligas de alumínio, pois a migração do cobre para o contorno de grão facilita a formação de uma segunda fase que gera diferença de potencial e contribui para a corrosão nessa região (GENTIL, 1996).

Com o aumento acidental da temperatura a difusão também foi facilitada, e houve migração acelerada dos elementos de liga para o contorno

de grão. A alta concentração de Zn na liga fez com que houvesse uma susceptibilidade ainda maior da microestrutura à corrosão, pois, esse elemento atua como ânodo nos contornos de grão, formando uma pilha galvânica localizada, como indica a literatura (ALONSO-FALLEIROS, 2013).

O resultado das micrografia das amostras expõem que durante o aquecimento exagerado, tanto da amostra imersa em água, quanto em fluido de corte, os fenômenos de empobrecimento por cobre e difusão atuaram nos contornos de grão causando grande perda de material, fragilizando a amostra, levando a separação parcial dos grãos por *creep damage*, resultando nas imagens capturadas (FURTADO e MAY, 2004).

Devido ao elevado número de amostras analisadas muitos dos resultados se mostraram repetidos, sendo assim, foram assumidos pontos de interesse a fim de uma análise comparativa entre os parâmetros que regeram o experimento. As amostras que não foram explicitamente comparadas com as outras tiveram suas imagens adicionadas ao trabalho através do Apêndice A.

## 5. CONCLUSÃO

É possível afirmar que o sistema elaborado para expor o material à corrosão se mostrou válido e o resultado da pesquisa pôde ser obtido com certa clareza. Sendo assim, o experimento permitiu pontuar algumas conclusões parciais:

1. As amostras imersas por sete dias apresentaram corrosão intergranular com pouca penetração corrosiva na amostra, sendo que o fluido de corte apresentou maior efeito sobre o material;
2. Quando comparado a água, o fluido de corte não possui influência no processo de corrosão intergranular nas amostras de alumínio em até 14 dias de imersão, pois a amostra com água apresentou-se ligeiramente mais afetada pela corrosão;
3. Amostras com 35 dias de imersão em água tiveram, visualmente, suas bordas mais atacadas do que o material imerso em fluido de corte;
4. As condições de ensaio de corrosão tentaram simular as condições de usinagem a fim de testar a corrosividade do fluido de corte, e os resultados indicam que não há aumento significativo quando se compara o uso do fluido de corte à água.

O fluido de corte mostrou um bom comportamento quanto à corrosão intergranular, e as análises das micrografias permitem afirmar que a influência do óleo de Pinhão-manso mais aditivos diluído em água, quando em contato com a liga específica, não modifica significativamente a corrosividade da água.

Para que a afirmativa fosse completamente constatada seria necessário uma análise mais aprofundada utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), assim, todos os pontos de interesse indicados pelas setas nas imagens analisadas poderiam ser identificados.

## 6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1 – Utilizar recursos como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para melhor avaliar os resultados obtidos;

2 – Elaborar um sistema onde cada amostra seja imersa sem que sua superfície esteja em contato com qualquer outra para evitar mascaramento dos resultados;

3 – Produzir corpos-de-prova nas dimensões citadas pela ASTM e, após o período de imersão em água e fluido de corte, avaliar as propriedades mecânicas do material através de ensaios de tração.

4 – Utilizar fluidos de cortes comerciais diferentes para testar seus efeitos sobre as propriedades do material;

5 – Realizar ensaios de carregamento cíclico para averiguar a influência da corrosão intergranular na resistência a fadiga do material.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRBUS. Airbus beats order target and sets new company delivery records. **Airbus**, 2012. Disponível em: <<http://www.airbus.com/presscentre/pressreleases/press-release-detail/detail/airbus-beats-order-target-and-sets-new-company-delivery-records/>>. Acesso em: 2014 nov 8.
- ALONSO-FALLEIROS, N. Corrosão Intergranular. **Departamento de Engenharia de Metalurgia de Materiais**, São Paulo, 2013. Disponível em: <[http://www.pmt.usp.br/lpe/Corrosao/12\\_Intergranular.pdf](http://www.pmt.usp.br/lpe/Corrosao/12_Intergranular.pdf)>. Acesso em: 3 Abr 2015.
- ASM INTERNATIONAL. Aluminium Properties and Physical Metallurgy - Handbook., 1984. Disponível em: <<http://www.asminternational.org>>. Acesso em: 27 out. 2014.
- BARROS NETO, B. D.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos**: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 3ª Edição. ed. Campinas: [s.n.], 2007. 480 p.
- BRADASCHIA, C. **Fundição de Ligas Não-Ferrosas**. São Paulo: ABM, 1988. 20 p.
- BRANDT, J. L. **Aluminium Properties and Physical Metallurgy**. [S.l.]: ASM Internacional, 1984.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. Tradução de Sérgio Murilo Staile Soares e José Roberto Moraes d'Almeida. 7ª Edição. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008. 705 p.
- CAMARGO, A. M. Firmeza no ar. **Revista alumínio**, 2013. Disponível em: <<http://www.revistaaluminio.com.br/recicla-inovacao/29/artigo242842-1.asp>>. Acesso em: 28 out 2014.
- CAMPBELL, F. C. (Ed.). **Fatigue and Fracture**: Understanding the Basic. [S.l.]: ASM International, 2012. 698 p.
- CARDOSO, K. P. Óleo de Pinhão-manso e fluido de corte emulsionável: estabilidade oxidativa e propriedades lubrificantes, 4 Dez 2012. Disponível em: <<https://prezi.com/vyanaba6kekn/copy-of-untitled-prezi/>>. Acesso em: 23 Nov 2014.
- CARDOSO, K. R. et al. Microstructure evolution of AA7050 Al alloy during Equal-Channel Angular Pressing. **Materials Research**, São Carlos, v. 15, Setembro 2012.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processo de Fabricação e Tratamento**. 2ª Edição. ed. São Paulo: McGraw-Hill, v. 2, 1986.

- DE, S. et al. Quantification of pitting in two tempers of 7050 aluminium alloy by non-destructive evaluation. **Corrosion Science**, Jamshedpur, n. 52, p. 1818-1823, Jan 2010.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8ª Edição. ed. São Paulo: [s.n.], 2013. 242 p.
- FERRARI, J. V. **Estudo da corrosão localizada da liga de alumínio 7475-T761 por espectroscopia de impedância eletroquímica global e local em meio de sulfato de sódio**. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), 2011.
- FURTADO, C. H.; MAY, I. L. High Temperature degradation in power plants and refineries. **SciELO**, São Carlos, v. 7, n. 1, p. 103-110, Jan 2004. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392004000100015](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392004000100015)>. Acesso em: 28 Mai 2015.
- GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª Edição. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1996. 346 p.
- JAMBO, C. M. H.; FÓFANO, S. **Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2009.
- KEY TO METALS. Aluminium Alloys - Effects of Alloying Elements. **Key to Metals - The World's Most Comprehensive Metals Database**, 2010. Disponível em: <<http://www.keytometals.com/Article55.htm>>. Acesso em: 28 out 2014.
- KNIGHT, S. P.; SALAGARAS, M.; TRUEMAN, A. R. The Study of intergranular corrosion in aircraft aluminium alloys using X-ray tomography. **Corrosion Science**, 12 nov. 2010. doi: 10.1016/j.corsci.2010.11.005.
- MAYERS, M.; CHAWLA, K. **Mechanical Behavior of Materials**. 2ª Edição. ed. New York: Cambridge, 2009. 882 p.
- MCCAFFERTY, E. **Introduction to Corrosion Science**. Alexandria: Springer, 2010.
- MCDONALD, M.; BOYKETT, R.; JONES, M. **Fatigue Testing of AA7050-T7451 with Various Corrosion Prevention Surface Treatments**. Port Melbourne: Air Vehicles Division DSTO - Defense Science and Technology Organisation, 2013. 113 p. Australian Government - Department of Defense.
- MIL-H-6088G. Military Specification: Heat Treatment of Aluminium Alloy. **EverySpec**, 1 abr 1991. Disponível em: <[http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-H/MIL-H-6088G\\_17472/](http://everyspec.com/MIL-SPECS/MIL-SPECS-MIL-H/MIL-H-6088G_17472/)>. Acesso em: 28 out 2014.
- PIRES, R. R.; MORAES, L. F. M. D. **Melhorias Implementadas nas Aeronaves Visando a Diminuição na Corrosão ao Longo da Vida Econômica**. 6º COTEQ Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos e 22º CONBRASCORR – Congresso Brasileiro de Corrosão. Salvador: [s.n.]. 2002. p. 4-14.

- REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. 4<sup>a</sup>. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- ROHDE, R. A. **Metalografia - Preparação de amostras**. URI - Universidade Regional Integrada. [S.l.], p. 30. 2010.
- ROSA, E. D. **Análise da Resistência Mecânica - Mecânica da Fratura e Fadiga**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 407 p.
- ROSSINO, L. S. et al. Resistência à fadiga por fretting da liga AA7050-T7451. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 6, n. 3, p. 7.
- SANTOS, A. L. D. **Corrosão Intergranular em estruturas de alumínio 7050 utilizado na aviação**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, p. 49. 2014.
- STARKE, E. A. J.; STALEY, J. T. Application of Modern Aluminium Alloys to Aircraft. **Prog. Aerospace Sci.**, v. 32, p. 131-172, 1996.

## APÊNDICE A

Amostra 04F07

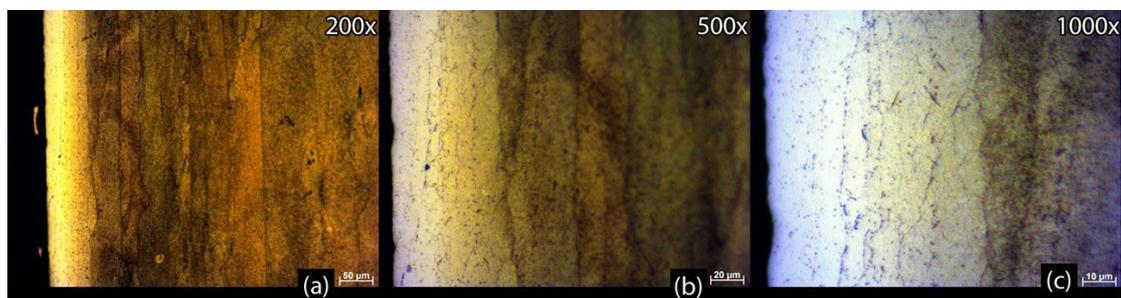


Figura 58 - Amostra 04F07 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

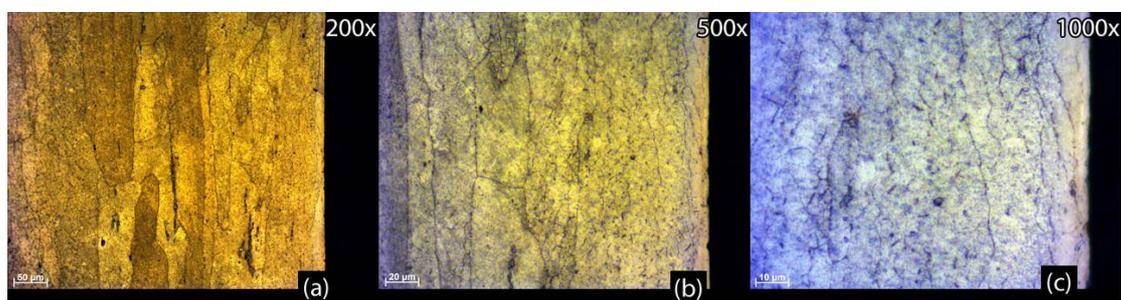


Figura 59 - Amostra 04F07 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

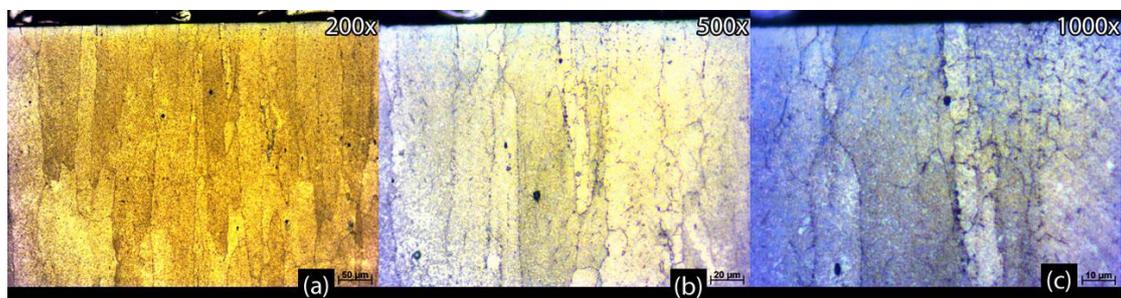


Figura 60 - Amostra 04F07 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

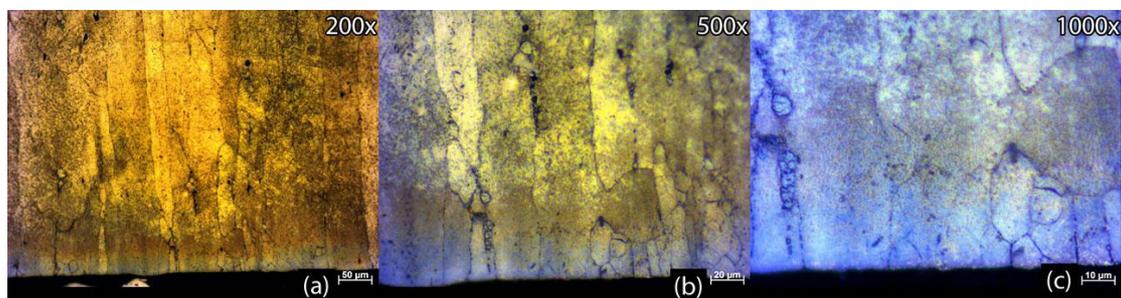


Figura 61 - Amostra 04F07 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

## Amostra 05A07

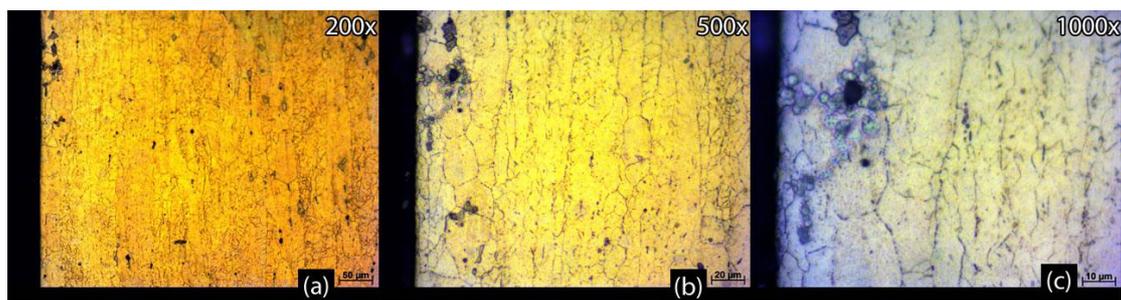


Figura 62 - Amostra 05A07 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

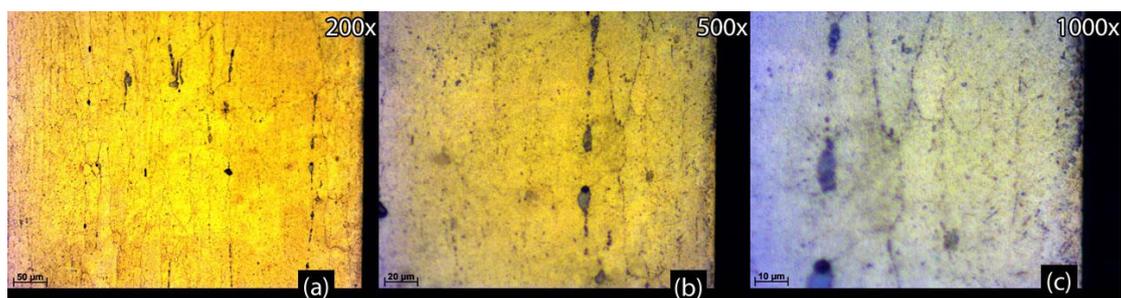


Figura 63 - Amostra 05A07 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

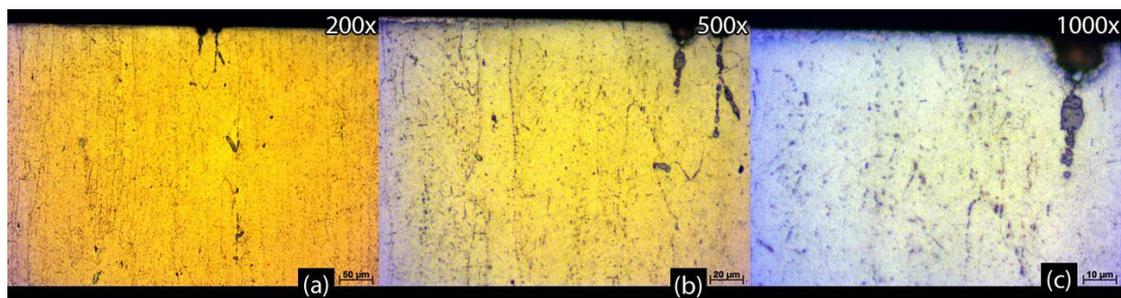


Figura 64 - Amostra 05A07 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

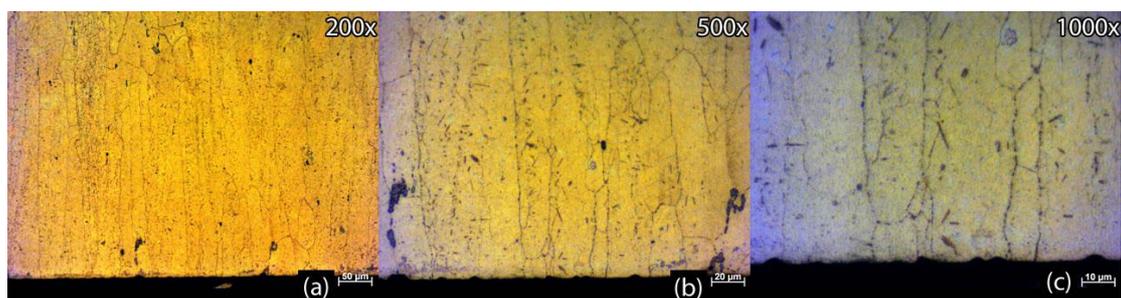


Figura 65 - Amostra 05A07 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

## Amostra 06F14

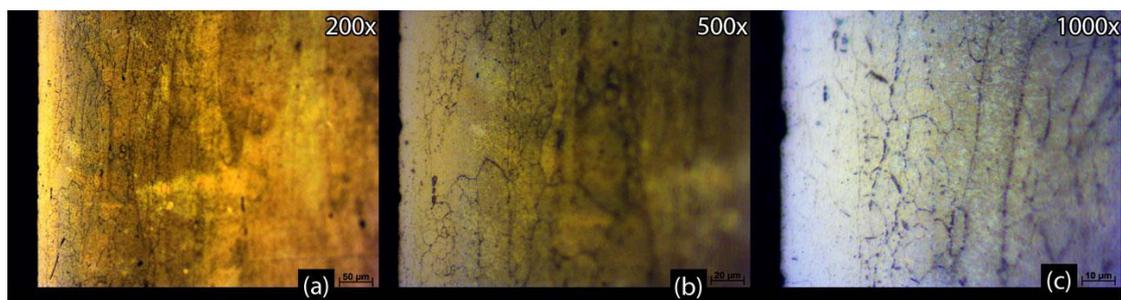


Figura 66 - Amostra 06F14 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

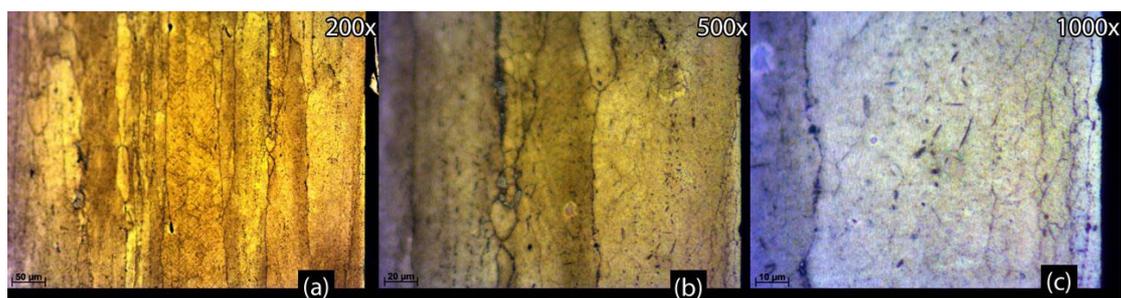


Figura 67 - Amostra 06F14 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

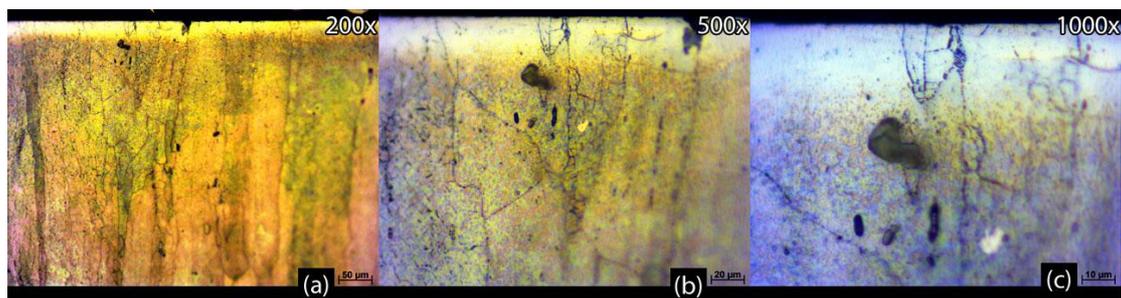


Figura 68 - Amostra 06F14 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

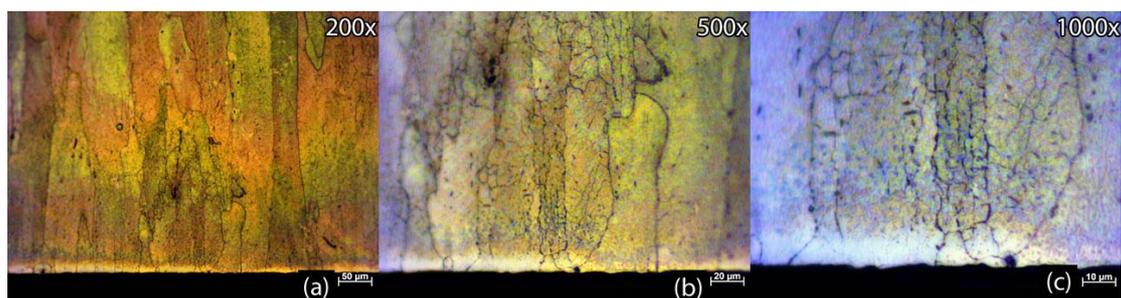


Figura 69 - Amostra 06F14 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

## Amostra 09A07

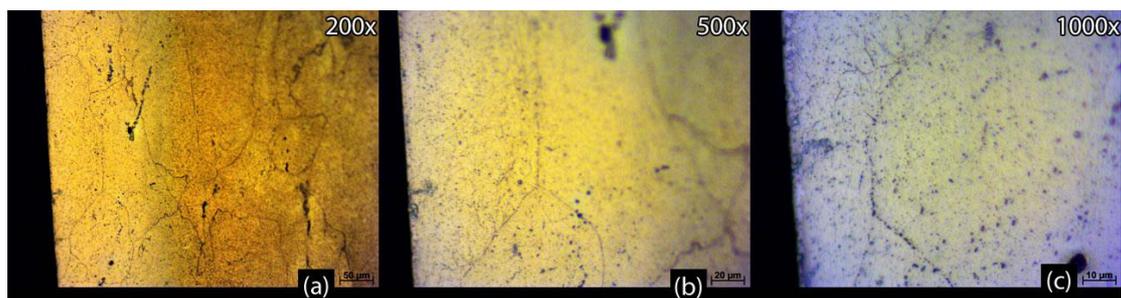


Figura 70 - Amostra 09A07 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

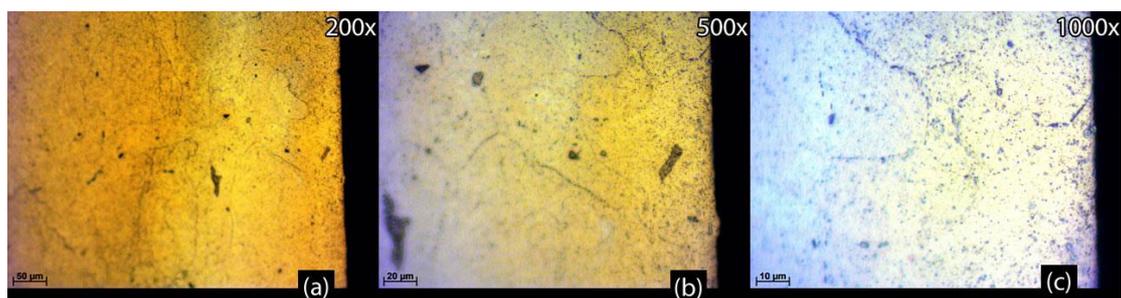


Figura 71 - Amostra 09A07 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

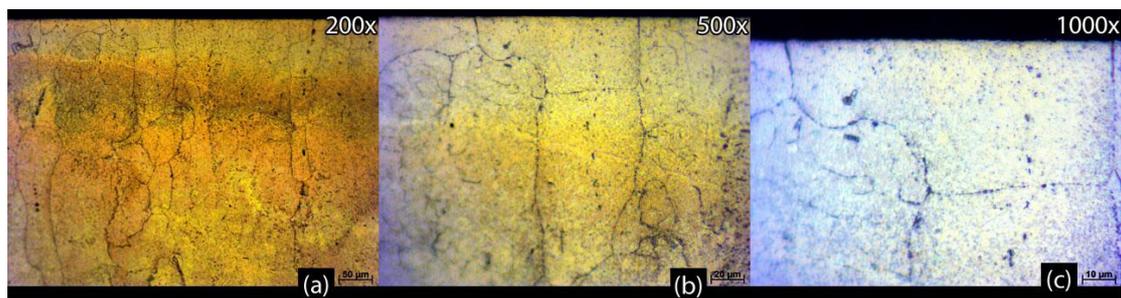


Figura 72 - Amostra 09A07 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

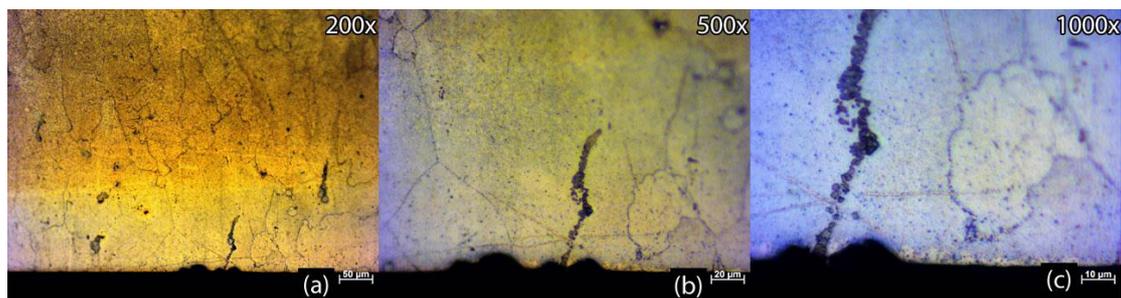


Figura 73 - Amostra 09A07 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

## Amostra 10F07

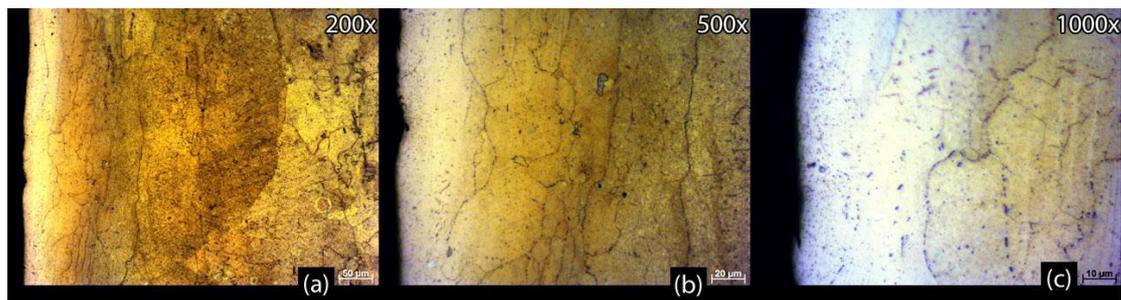


Figura 74 - Amostra 10F07 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

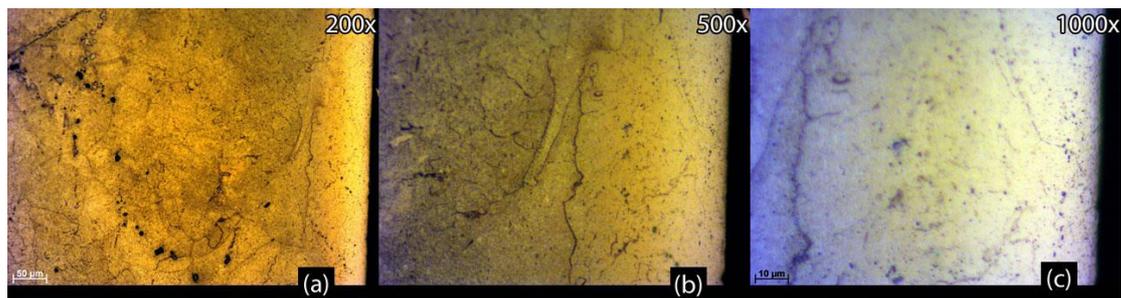


Figura 75 - Amostra 10F07 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

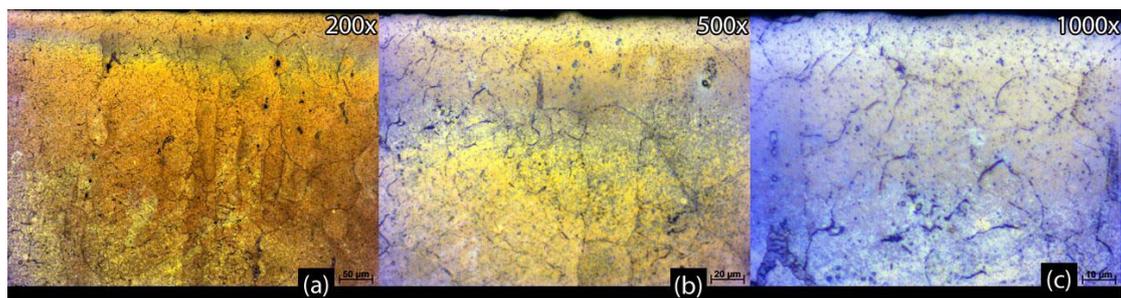


Figura 76 - Amostra 10F07 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

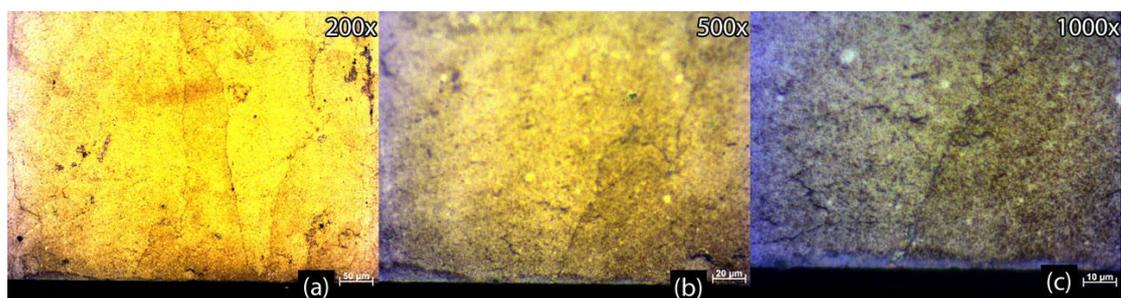


Figura 77 - Amostra 10F07 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

## Amostra 11A14

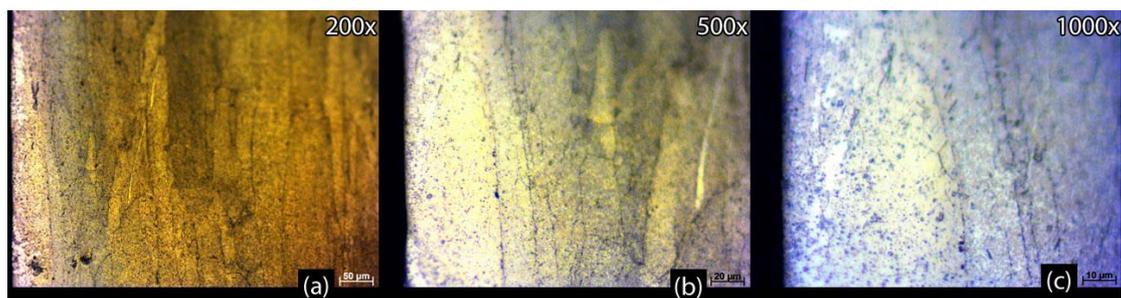


Figura 78 - Amostra 11A14 - Borda Direita - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

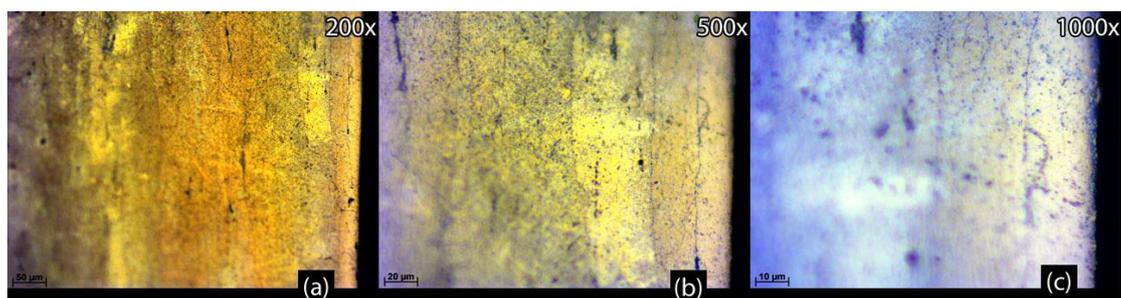


Figura 79 - Amostra 11A14 - Borda Esquerda - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

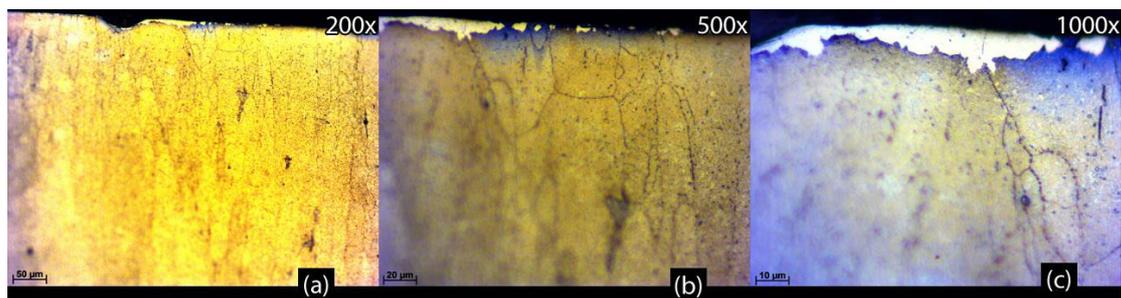


Figura 80 - Amostra 11A14 - Borda Inferior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.

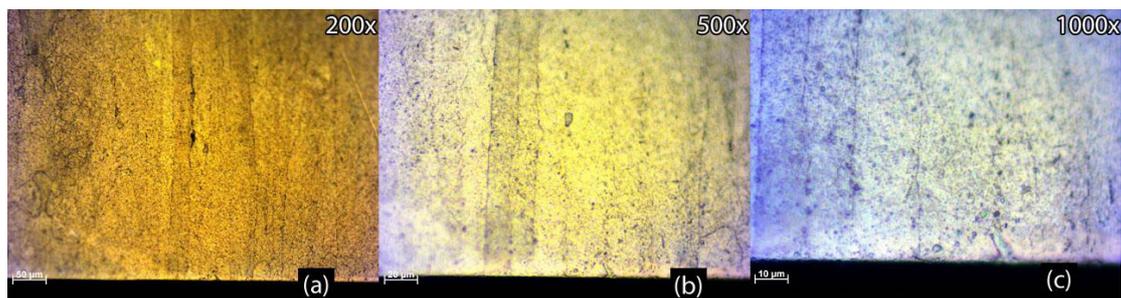


Figura 81 - Amostra 11A14 - Borda Superior - Aumentos de: (a) 200, (b) 500 e (c) 1000 vezes. Fonte: Autoria própria.