



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Arthur Werneck Ferreira

**CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA INIBIDORA E DO
DROSS EM CHAPAS GALVANIZADAS POR IMERSÃO A
QUENTE ATRAVÉS DE ANÁLISE E PROCESSAMENTO
DIGITAL DE IMAGENS**

Rio de Janeiro

2022

Arthur Werneck Ferreira

**CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA INIBIDORA E DO *DROSS* EM
CHAPAS GALVANIZADAS POR IMERSÃO A QUENTE ATRAVÉS DE
ANÁLISE E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Marília Garcia Diniz

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

F383 Ferreira, Arthur Werneck.
Caracterização da camada inibidora e do dross em chapas galvanizadas por imersão a quente através de análise e processamento digital de imagens / Arthur Werneck Ferreira. – 2022.
130f.

Orientadora: Marília Garcia Diniz.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Galvanização - Teses. 3. Metais - Superfícies - Teses. 4. Microscopia eletrônica - Teses. 5. Análise espectral - Teses. I. Diniz, Marília Garcia. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 669.056.9

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Arthur Werneck Ferreira

02 de setembro de 2022

Assinatura

Data

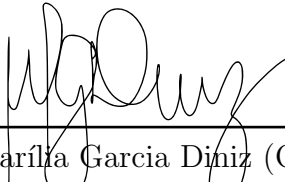
Arthur Werneck Ferreira

**CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA INIBIDORA E DO *DROSS* EM
CHAPAS GALVANIZADAS POR IMERSÃO A QUENTE ATRAVÉS DE
ANÁLISE E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.**

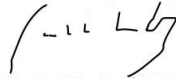
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Mecânica dos Sólidos.

Aprovada em 02 de Setembro de 2022.

Banca Examinadora:



Prof^ª. Dr^ª. Marília Garcia Diniz (Orientador)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) - PPG-EM



Prof. Dr. Carlos Roberto Xavier
Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA)



Prof. Dr. Daniel José Nahid Mansur Chalhub
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)



Prof. Ph.D. Norberto Mangiavacchi
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)



Prof. Dr. Vitor Santos Ramos
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Rio de Janeiro

2022

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus que me deu força de vontade, foco, resiliência e determinação para tirar o máximo de proveito possível deste curso.

Tenho que reconhecer que grande parte desta conquista devem-se aos meus pais, Valeria e Fernando, que foram incansáveis em me incentivar e aturar todos os momentos de estresse durante este período.

Minha gratidão à minha orientadora Dra. Marília Garcia Diniz, que foi um exemplo de profissionalismo, dedicação e parceria durante todo este tempo. Gratidão eterna.

Aos professores do PPGEM-UERJ, à todos os colegas e todas às pessoas que passaram pela minha vida e que de alguma forma contribuíram para meu desenvolvimento profissional, meu muito obrigado.

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

RESUMO

FERREIRA, A. W. **Caracterização da camada inibidora e do dross em chapas galvanizadas por imersão a quente através de análise e processamento digital de imagens**. 2022. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

O processo de galvanização por imersão à quente é amplamente utilizada pela indústria automobilística a fim de se obter um recobrimento de zinco (Zn) como proteção anticorrosiva para chapas de aço. Durante a galvanização, a difusão de ferro (Fe) do aço devido à alta temperatura do banho de zinco faz com que sejam formadas fases intermetálicas $Fe - Zn$. Estas fases possuem alto teor de ferro em sua composição química e, apresentam alta dureza e baixa tenacidade, fazendo com que, o revestimento de zinco fique susceptível a se desprender durante processos de conformação mecânica da chapa que, com isso, perderá a sua proteção. A fim de evitar a formação das fases, alumínio (Al) é adicionado ao banho de zinco, pois o ferro liga-se preferencialmente ao alumínio do que ao zinco. Forma-se então uma camada inibidora composta pela fase Fe_2Al_5 que fica situada entre o substrato (aço) e o revestimento e que impede a formação das fases. No entanto, se por algum motivo a fase se situar fora da região entre o substrato e o revestimento tem-se o que é chamado de chamado *Dross*, que pode ser considerado um defeito caso fique aparente na superfície revestida da chapa de aço. Este trabalho utilizou técnicas de caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), microanálise química por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) e Análise e Processamento Digital de Imagens (PDI) por segmentação colorida a fim de analisar a camada inibidora intermetálica e identificar a presença do defeito *Dross* em chapa de aço galvanizada a quente para uso em indústria automobilística. A camada inibidora apresentou $1,347 \pm 0,188 \mu m$ de espessura, representando 1,39% do revestimento estudado, com algumas poucas regiões com descontinuidades e presenças isoladas do defeito *Dross*. A técnica de segmentação colorida foi considerada eficiente e efetiva para a caracterização da camada inibidora para o material analisado e do *Dross*.

Palavras-Chave: Galvanização, camada inibidora, *Dross*, análise e processamento digital de imagens.

ABSTRACT

FERREIRA, A. W. **Characterization of the inhibitor layer and the dross in hot galvanized sheets through analysis and processing digital of images.** 2022. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The hot dip galvanizing process is widely used by the automotive industry in order to obtain a zinc (Zn) coating as an anti-corrosion protection for steel sheets. During galvanizing, the diffusion of iron (Fe) from the steel due to the high temperature of the zinc bath causes the formation of $Fe - Zn$ intermetallic phases. These phases have a high iron content in their chemical composition and have high hardness and low tenacity, making the zinc coating susceptible to detachment during the mechanical forming processes of the sheet, which will, therefore, lose its protection. In order to prevent the formation of the phases, aluminum (Al) is added to the zinc bath, as iron preferentially binds to aluminum than to zinc. An inhibitory layer is then formed, composed of the Fe_2Al_5 phase which is located between the substrate (steel) and the coating and which prevents the formation of the phases. However, if for some reason the phase lies outside the region between the substrate and the coating, there is what is called Dross, which can be considered a defect if it is apparent on the coated surface of the steel sheet. This work used characterization techniques by Scanning Electron Microscopy (SEM), chemical microanalysis by Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and Analysis and Digital Image Processing (PDI) by color segmentation in order to analyze the intermetallic inhibitor layer of and the presence of Dross defect in hot-dip galvanized steel sheet for use in the automobile industry. The inhibitor layer was $1.347 \pm 0.188 \mu m$ thick, representing 1.39% of the coating studied, with a few regions with discontinuities and isolated presence of the Dross defect. The color segmentation technique was considered efficient and effective for the characterization of the inhibitor layer for the analyzed material and Dross.

Keywords: Galvanization, inhibitor layer, Dross, digital image analysis and processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Exemplo de camadas intermetálicas ferro – zinco.....	15
Figura 2 — Imagem ilustrativa sobre o efeito do powdering	16
Figura 3 — Vida útil do aço galvanizado por imersão a quente.	23
Figura 4 — Fluxograma das etapas do processo de galvanização por imersão a quente.	24
Figura 5 — Esquema do banho de zinco no processo de galvanização a quente.	25
Figura 6 — Morfologia típica do revestimento GI.	28
Figura 7 — Formação das camadas intermetálicas ferro-zinco durante o tratamento térmico de recozimento de uma chapa de aço galvanizada.....	31
Figura 8 — Parte do diagrama binário contendo maiores percentuais de Zn e as fases presentes no revestimento GA	33
Figura 9 — Seção transversal de um aço galvanizado por imersão a quente (GA), com tempo de imersão de um minuto em banho de zinco fundente a 450 ° C	34
Figura 10 – Morfologia da superfície e seção de um revestimento GA típico contendo as fases gama (Γ), gama 1 (Γ_1), delta (δ) e zeta (ζ).....	34
Figura 11 – Fases intermetálicas para galvanização (GA) a temperatura de banho de 460 °C e tempo de imersão de 24 s.	35
Figura 12 — Estrutura típica do revestimento GI.	38
Figura 13 — Representação esquemática da formação da fase intermetálica com presença de 0,2 % de alumínio dentro do banho	39
Figura 14 — Aspecto superficial da camada zincada contendo partículas de <i>Top Dross</i> com magnificação de 500 x.	40
Figura 15 — Aspecto transversal da camada zincada contendo partículas de <i>Top Dross</i> com magnificação de 500 x.	41
Figura 16 — Camada zincada e partículas consideradas não problemáticas para o aspecto superficial.....	42
Figura 17 — Aspecto da seção transversal da camada inibidora (IL) para banho de zinco com teor de 0,5% de alumínio.	43

Figura 18 — Aspecto da seção transversal da camada inibidora (IL) para banho de zinco com teor de 0,8 % de alumínio.	43
Figura 19 — Análise semiquantitativa por EDS. Em destaque partículas de alumínio. Banho zincado com teor de 0,5 % de alumínio.....	44
Figura 20 — Análise semiquantitativa por EDS. Em destaque partículas de alumínio. Banho zincado com teor de 0,8% de alumínio.....	44
Figura 21 — Aspecto da seção transversal para chapa galvanizada em banho com teor de 0,2 % de zinco nas seguintes temperaturas de entrada: a) 440 °C b) 460 °C c) 480 °C.....	45
Figura 22 — Corte transversal de uma chapa galvanizada comum GI com gramatura de 100 g/m ² a qual se observa a camada intermetálica rica em Al na região da interface.....	46
Figura 23 — Mapeamento via EDS dos elementos Al, Fe e Zn em uma chapa galvanizada após dissolução eletroquímica eletroquímico a) imagem de topo da camada; b) elemento Al; c) elemento Fe e; d) elemento Zn.....	46
Figura 24 — Imagem digital formada por pixels quadrados. A região destacada foi ampliada em 17 vezes para mostrar as unidades formadoras da imagem. Cada pixel tem uma posição e uma intensidade de cor.	50
Figura 25 — Representação matricial de uma imagem bidimensional e a escala de tonalidades variando entre o preto e o branco	51
Figura 26 — Cubo de cores do sistema RGB (Red-Green-Blue).	52
Figura 27 — Imagens comparativas entre resolução e profundidade.	54
Figura 28 — Exemplos de histogramas de imagens	55
Figura 29 — Efeito do número de níveis de cinza na qualidade de uma imagem 442 x 299 com 256, 128, 64, 32, 16, 8, 4 e 2 níveis de cinza, respectivamente.	56
Figura 30 — Etapas do PDI.....	57
Figura 31 — Esquema de aquisição de imagem.....	58
Figura 32 — Exemplo de segmentação: (a) imagem em 256 tons de cinza; (b) imagem binária, já segmentada, isto é, com objetos de interesse brancos e fundo preto.	60
Figura 33 — Um exemplo de problema de PDI: (a) imagem original; (b) imagem das partículas de grafita (regiões); (c) área de cada partícula; e (d) distribuição das áreas.....	62

Figura 34 — Amostras de aço IF. Amostras cortadas e amostras embutidas. Já preparadas metalograficamente.....	64
Figura 35 — Imagem macro obtida por MEV de uma amostra embutida e preparada metalograficamente.....	65
Figura 36 — Imagem exemplo analisada por EDS. A fase contendo alumínio em destaque na cor verde.....	66
Figura 37 — Abertura da imagem no programa FIJI.....	67
Figura 38 — Imagem sendo editada pelo FIJI utilizando a função "Overlay Brush Tools".....	68
Figura 39 — Resultado da edição da imagem pelo software FIJI.....	68
Figura 40 — Representação da função segmento de reta.....	68
Figura 41 — Segmento de reta traçado em paralelo a barra de escala.....	69
Figura 42 — Função Set Scale a fim de calibrar o FIJI.....	69
Figura 43 — Exemplo de medida da espessura da camada inibidora.....	70
Figura 44 — Exemplo de medida da espessura da camada inibidora.....	71
Figura 45 — Exemplo de medida da espessura da camada inibidora.....	71
Figura 46 — Abertura da função "Color Treshold".....	72
Figura 47 — Parâmetros da função "Color Treshold".....	73
Figura 48 — Segmentação realizada de modo a selecionar apenas as regiões de interesse.....	73
Figura 49 — Análise dos parâmetros da região de interesse.....	74
Figura 50 — Imagem obtida por MEV da seção transversal do aço galvanizado.....	75
Figura 51 — Mapeamento por cores falsas feito pelo EDS. Região com elemento zinco identificado na cor roxa.....	76
Figura 52 — Mapeamento por cores falsas feito pelo EDS. Região com elemento zinco identificado na cor roxa.....	76
Figura 53 — Mapeamento por cores falsas feito pelo EDS. Região com elemento zinco identificado na cor roxa.....	76
Figura 54 — Três medições de espessura realizada em uma das imagens que identifica a camada de zinco através do mapeamento por cor falsa.....	77
Figura 55 — Medição da área da camada de zinco.....	79
Figura 56 — Medida do comprimento total da camada zincada.....	79

Figura 57 — Mapeamento por cores falsas identificando em verde região rica em alumínio (fase Fe_2Al_5).	82
Figura 58 — Medições da espessura da camada inibidora.....	83
Figura 59 — Camada inibidora (verde) apresentando heterogeneidade de espessura e descolamento.....	85
Figura 60 — Aspecto transversal da camada zincada contendo partículas de Top Dross com magnificação de 500 x	85
Figura 61 — Identificação do Dross em uma única região submetida à análise por EDS.....	86
Figura 62 — Identificação de Dross possivelmente aparente.	86
Figura 63 — Medição de porcentagem de fase alumínio por técnica de PDI..	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Fases intermediárias identificadas na camada zincada.....	29
Tabela 2 — Composição química do aço tipo IF utilizado para as análises..	63
Tabela 3 — Medidas de espessura de camada zincada.....	78
Tabela 4 — Estimativa da espessura da camada zincada (segunda metodologia).....	81
Tabela 5 — Espessuras da camada inibidora para o material analisado.....	84
Tabela 6 — Porcentagem de Al identificada nos mapeamentos.....	87

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 — Formação da partícula de Fe_2Al_5	35
---	----

LISTA DE SIGLAS

AA	Aços Acalmados ao Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGA	American Galvanizers Association
Al	Alumínio
B	Boro
C	Carbono
Cu	Cobre
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
IF	Interstitial Free
Fe	Ferro
GI	Galvanized Iron
GA	Galvannealed
HV	Dureza Vickers
mm	Milímetros
µm	Micrômetros
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MET	Microscópio Eletrônico de Transmissão
Mn	Manganês
Mo	Molibidênio
MO	Microscopia Óptica
N	Azoto
Nb	Nióbio

P	Fósforo
Pa	Pascal
Pb	Chumbo
s	Segundo
S	Enxofre
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
V	Vanádio
Zn	Zinco
µm	Micrômetro
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1. AÇOS LIVRES DE ELEMENTOS INTERSTICIAIS (IF)	19
2. GALVANIZAÇÃO	21
2.1. GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE	23
2.2. REVESTIMENTO GI – GALVANIZED IRON	27
2.3. REVESTIMENTO GA - GALVANNEALED	28
3. DEFEITOS SUPERFICIAIS RELACIONADOS ÀS ETAPAS DO PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO A QUENTE	36
3.1. A CAMADA INIBIDORA E O DROSS	36
4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS (PDI)	48
4.1. IMAGEM DIGITAL	49
4.2. PRINCIPAIS ETAPAS DO PDI	56
4.2.1. AQUISIÇÃO E DIGITALIZAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL.....	57
4.2.2. PRÉ-PROCESSAMENTO.....	59
4.2.3. SEGMENTAÇÃO	59
4.2.4. PÓS-PROCESSAMENTO.....	61
4.2.5. EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS	61
5. MATERIAIS E MÉTODOS	63
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
7. CONCLUSÕES	88
7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS	90
ANEXO 1	100
ANEXO 2	109
ANEXO 3	118
ANEXO 4	125

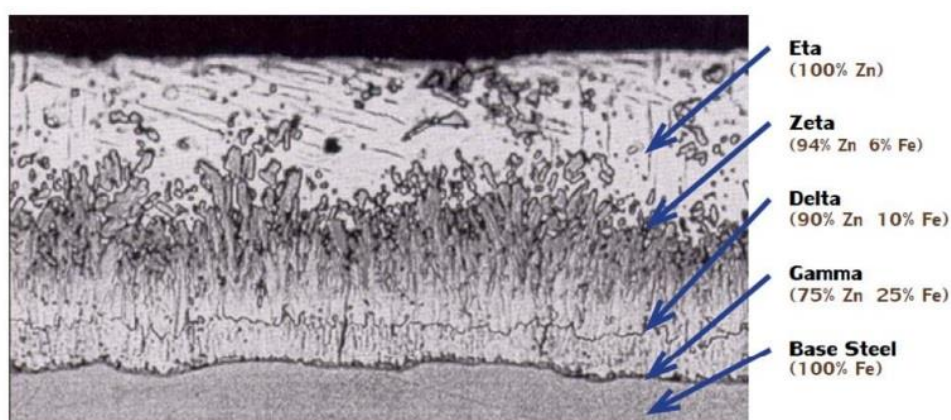
INTRODUÇÃO

A galvanização por imersão à quente é amplamente utilizada pela indústria automobilística a fim de garantir a qualidade das partes de aço de um automóvel que ficam expostas ao ambiente e, conseqüentemente, suscetíveis ao processo de corrosão.

O processo de galvanização consiste basicamente em inserir chapas de aço em um banho de zinco (Zn) líquido à elevada temperatura, por volta de $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Devido a esta alta temperatura parte do ferro (Fe) contido no aço é desassociado do mesmo, combinando-se com o zinco do banho.

A ligação entre zinco e ferro resulta na formação de fases intermetálicas compostas de $Fe-Zn$ com diferentes estequiometrias. Estas fases aderem à superfície do substrato de maneira estratificada até o topo do revestimento, onde, encontra-se uma fase, basicamente composta por zinco, denominada fase “eta” (η) (Cunha, 2021; Fonseca, 2006). A Figura 1 mostra um exemplo de revestimento de zinco em que foram identificadas as fases $Fe-Zn$. Na imagem estão indicados os teores percentuais de ferro e zinco contidos em cada uma delas.

Figura 1 – Exemplo de camadas intermetálicas ferro – zinco.



Fonte: CUNHA (2021)

A formação das fases intermetálicas $Fe-Zn$ de forma descontrolada no que tange aos teores percentuais de carbono é prejudicial ao revestimento devido ao fenômeno conhecido como *powdering*. Este fenômeno ocorre quando um material possui alta dureza e baixa ductilidade, o que, por consequência, o impossibilita de absorver energia em um processo de deformação plástica, como no caso de estampagem mecânica. A tendência é de que durante a conformação apareçam trincas e o material se torne quebradiço. No caso do recobrimento de zinco, as fases $Fe-Zn$ sob o efeito do *powdering*, prejudicam a aderência do revestimento, fazendo com que este se desprenda do substrato tornando o aço desprotegido dos efeitos corrosivos (Fonseca, 2006). A Figura 2 ilustra o efeito do *powdering* sobre um revestimento de zinco. As setas direcionadas para o alto indicam o desprendimento do revestimento .

Figura 2 — Imagem ilustrativa sobre o efeito do *powdering* em um aço galvanizado.



Adaptada de FONSECA (2006).

A fim de evitar a formação de fases $Fe-Zn$ pequenas quantidades de alumínio (Al) são adicionadas ao banho. Por questões termodinâmicas, o alumínio liga-se preferencialmente ao ferro. Forma-se então uma camada denominada “camada inibidora” na interface entre o substrato e o revestimento. Esta camada é composta por partículas de Fe_2Al_5 (Brepohl, 2013; Yang et al., 2013).

Quando as partículas de Fe_2Al_5 não se encontram na interface substrato/revestimento e, por algum motivo, se alojam nas proximidades da superfície do revestimento, cria-se o defeito superficial denominado *Dross*. Este defeito gera um aspecto superficial indesejável na chapa galvanizada, particularmente quando ficar visível/perceptível (Eleutério, 2019; Coni, 2004; Vieira et al. 2022; Brepohl, 2013).

A literatura apresenta trabalhos que estudam os mais diversos aspectos e características relacionadas ao processo de galvanização. Alguns exemplos são: Brepohl (2013), que caracterizou a camada intermetálica; Kania et al. (2020) que escreveu uma vasta revisão bibliográfica sobre os efeitos de adições de diversos elementos químicos ao banho de zinco; Coni (2004) estudou as propriedades mecânicas do aço galvanizado à quente; Vieira et al. (2021) que realizaram simulação numérica da trajetória do fluxo de zinco líquido para diferentes configurações do pote do banho e Vieira (2007), que em sua dissertação de mestrado avaliou os efeitos do tempo e da temperatura de tratamento térmico na formação das camadas intermetálicas e os efeitos do *powdering*. Contudo, não foram encontrados na literatura consultada para esta pesquisa registros de uma definição clara que diferencie a camada inibidora e o *Dross*. Ambos são formados essencialmente pela mesma fase (Fe_2Al_5), porém localizados em locais diferentes do revestimento. A camada inibidora é localizada na interface substrato/revestimento diferentemente do *Dross* que se localiza no topo do revestimento.

Este trabalho utilizou imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), microanálise química realizada por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) e técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) com o objetivo de caracterizar e quantificar a camada intermetálica inibidora e o *Dross* na camada de zinco gerada em chapa de aço do tipo IF (*Interstitial Free*) galvanizada por imersão à quente utilizada na indústria automobilística e validar a técnica de PDI por segmentação colorida. Além disso, este trabalho propõe uma definição que diferencie a camada inibidora e o *Dross*, visto que, a literatura consultada durante esta pesquisa não apresentou de forma clara essa distinção.

O trabalho divide-se em oito capítulos, sendo o primeiro esta introdução ao tema. Do segundo ao quinto capítulo é realizada uma revisão bibliográfica em que são cobertos, respectivamente os seguintes temas: aços *interstitial free*, processo galvanização por imersão a quente, defeitos gerados no processo e o Processamento Digital de Imagens (PDI). O sexto capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados. O sétimo capítulo discute os resultados obtidos. Por fim, o oitavo capítulo apresenta as principais conclusões deste estudo e ainda apresenta algumas sugestões de trabalhos futuros.

1. AÇOS LIVRES DE ELEMENTOS INTERSTICIAIS (IF)

Segundo diversos autores, como Paranhos (2010), Batista (2013), Marques (2008) e Fonseca et al (2009), os aços tipo IF (*Interstitial Free*) apresentam como vantagem de utilização o seu potencial de conformação. As características deste aço, dentre elas baixo limite de escoamento e resistência ao envelhecimento por precipitação, facilitam a fabricação de peças de difícil conformação mecânica, como painéis de automóveis com geometria complexa.

De acordo com Fonseca et al. (2009), o aço IF foi a solução encontrada para a obtenção de laminados de alta estampabilidade decorrente do controle adequado das variáveis do processo de recozimento contínuo. O seu desenvolvimento foi estimulado principalmente pela indústria automobilística por apresentar vantagens inerentes aos processos de conformação mecânica quando comparados aos aços acalmados comuns. Os mesmos autores ao compararem a estampabilidade de um aço IF com a de um aço AA, através de ensaios de tração, embutimento pelo método de Erichsen e ensaios pelo método de Lankford, concluíram que, de fato, os aços IF apresentam melhores características para a estampabilidade automobilística.

Os aços IF possuem como característica principal a presença de teores muito baixos de carbono aliados a presença de elementos de liga como titânio e manganês (Paranhos, 2010; Fonseca et al. 2009). Segundo Batista (2013), atualmente são utilizados pelas indústrias majoritariamente três tipos de aços IF, com características que possibilitam processos de estampagem extra profunda:

- estabilizados com titânio (IF-Ti);
- estabilizados com nióbio (IF-Nb);
- estabilizados com titânio e nióbio (IF- Ti + Nb).

Em especial, os aços dos tipos IF- Nb e IF- Ti + Nb são em sua maioria utilizados em conjunto com o revestimento de zinco aplicado por imersão a quente

(Batista, 2013; Marques, 2008). Este revestimento permite a proteção do aço ao fenômeno da corrosão atmosférica. Como esses aços são destinados majoritariamente na indústria automobilística para aplicações em que são utilizados processos de estampagem mecânica, é necessário atentar-se a qualidade da aderência do revestimento ao aço, a fim de que se evite o desprendimento deste durante a deformação plástica (Kania, 2020).

2. GALVANIZAÇÃO

O processo de galvanização consiste em depositar uma fina camada de metal puro ou liga metálica sobre a superfície de uma chapa de aço para que se oxide preferencialmente em relação ao metal base e assim o proteja quanto ao fenômeno da corrosão atmosférica. O zinco é o metal mais utilizado pelas indústrias ao redor do mundo para este recobrimento (Eleutério, 2019).

As principais formas de proteção oferecidas pelo revestimento de zinco são (Batista, 2013):

- atuar como metal de sacrifício (o aço a base de ferro é mais nobre do que a camada de zinco), ficando o revestimento sujeito aos danos mecânicos do processo de corrosão e protegendo o substrato;
- proteção devido a formação de uma barreira física entre o aço e o ambiente corrosivo;

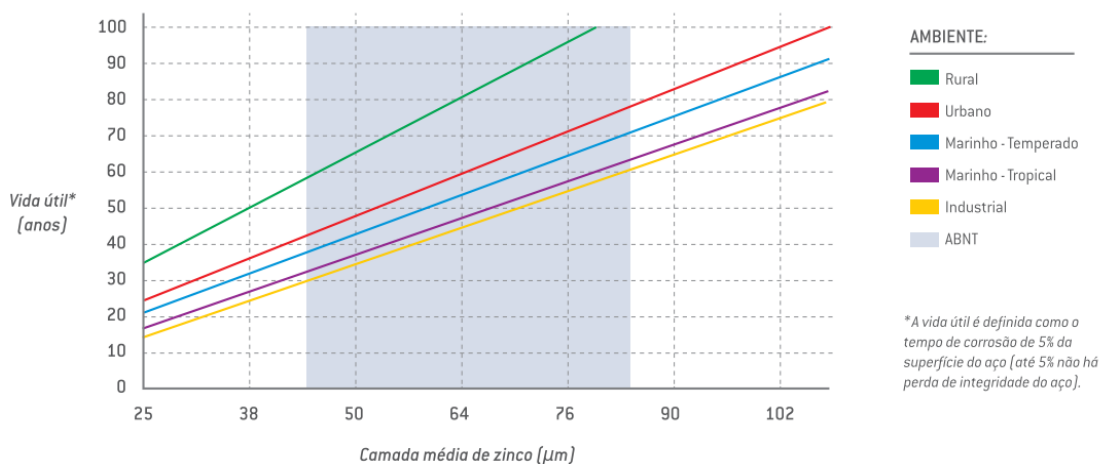
Por apresentar um maior potencial de oxidação quando comparado ao ferro, ao ser depositado sobre uma chapa de aço, o zinco atuará como ânodo ao ser colocado em um meio eletrolítico. Dessa forma o zinco sofrerá a corrosão cumprindo o seu papel de metal de sacrifício e evitando danos ao aço. Além disso, caso o recobrimento esteja totalmente íntegro e contínuo sobre a chapa galvanizada, este funcionará como uma barreira física impedindo a entrada de oxigênio entre o substrato e o revestimento e evitando o fenômeno da corrosão. (Paranhos, 2010)

De acordo com a literatura, todos os tipos de aços podem revestidos com zinco. Esse recobrimento apresenta vantagens como: agilidade de aplicação, facilidade de penetração do zinco em bordas e cantos, formação de uma camada de proteção íntegra e uniforme sobre toda a chapa de aço a ser recoberta, baixo custo e, ainda, a possibilidade de se controlar a espessura da camada zincada. (Paranhos, 2010; Eleutério, 2019; Félix, 2013).

Segundo Coni (2004) a espessura do revestimento é um fator relevante tanto desempenho quanto na durabilidade dos produtos revestidos. De modo geral quanto mais espesso o revestimento, maior a proteção contra a corrosão, entretanto, o aumento da espessura tende a ser prejudicial para a formabilidade e soldabilidade do material. Além disso espessuras muito grandes podem provocar desprendimento do zinco devido a diferenças termofísicas entre o revestimento de zinco e o aço. A caracterização da quantidade de revestimento se dá em termos de massa por unidade de área. Este valor é medido através da seguinte sequência: pesa-se uma seção do material revestido, seguida pela decapagem do revestimento e, posteriormente, realiza-se nova pesagem da seção decapada. Calcula-se então a diferença entre a área com revestimento e a mesma área sem o revestimento e com este valor tem-se a massa por unidade de área.

A literatura apresenta trabalhos experimentais que mostram que o tempo de vida do revestimento depende da espessura do mesmo e do ambiente de trabalho (Campanher, 2009). A Figura 3 ilustra uma relação desenvolvida pela *American Galvanizers Association* (AGA), entre tempo necessário para a primeira manutenção da camada galvanizada e a espessura do revestimento para diferentes ambientes. Faz-se necessário enfatizar que este tempo não corresponde à vida útil do revestimento e sim ao tempo necessário para que ocorra uma primeira manutenção no mesmo, que é necessária quando 5% do revestimento galvanizado apresenta óxido de ferro. Neste ponto, ainda há uma maior parte da chapa de aço recoberta, no entanto, existirão pontos em que será necessário a realização do reparo. O reparo no tempo correto faz com que a vida útil do revestimento aumente consideravelmente. A área sombreada azul representa as espessuras mínimas requeridas encontradas na norma ABNT NBR 6323 (2016).

Figura 3 — Vida útil do aço galvanizado por imersão a quente.



Fonte: ARMCO STACO (2014).

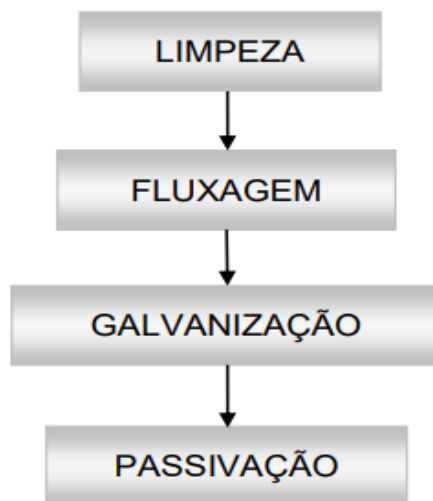
O zinco pode ser aplicado sobre o aço por eletrodeposição, aspersão térmica ou por imersão a quente (HD-Zn, *Hot-Dip Zinc Coating*), de forma contínua ou por batelada (Manhabosco, 2017). Cada um desses processos determina características particulares, vantagens e desvantagens da camada protetora. Este trabalho irá apresentar e dar destaque ao processo de galvanização por imersão a quente do tipo GI (*Galvanized Iron*) e GA (*Galvannealed*).

2.1. GALVANIZAÇÃO POR IMERSÃO A QUENTE

A galvanização por imersão a quente é amplamente utilizada por diversos setores produtivos como: agrícola, automobilística e civil. A sua versatilidade e baixo custo são as principais vantagens no que tange a utilização em larga escala (Manhabosco, 2017). Embora amplamente utilizado, a literatura atual disponível sobre o processo ainda não conseguiu explicar e entender algumas questões relativas ao mesmo. As principais dúvidas de pesquisadores que se dedicaram a estudar o tema se concentram na cinética de difusão entre o ferro e zinco, influência de determinados elementos sobre o banho de zinco e na formação do defeito conhecido como *Dross* (Vieira et al., 2022; Kania et al. 2020).

A Figura 4 apresenta um fluxograma das etapas do processo de galvanização por imersão a quente.

Figura 4 — Fluxograma das etapas do processo de galvanização por imersão a quente.



Fonte: MANHABOSCO (2017).

Ainda que possam ocorrer algumas variações e adaptações em processos de galvanização por imersão a quente, em geral, as etapas podem ser resumidas da seguinte forma (Manhabosco, 2017):

Etapa Limpeza:

A fim de garantir a perfeita interação e aderência entre a camada de zinco e o substrato, o material a ser galvanizado precisa passar por um rigoroso processo de limpeza antes de ser inserido no banho de zinco. A etapa de limpeza é subdividida em desengraxe e decapagem:

- a. Desengraxe: esta etapa tem por objetivo a remoção de substâncias orgânicas, como por exemplo óleos e graxas. Para isso o material a ser galvanizado é inserido em um banho de solução alcalina a alta temperatura por um tempo médio de 10 minutos.

b. Decapagem: Insere-se o material em banho com soluções ácidas. Objetiva-se a remoção de possíveis óxidos que estejam presentes na superfície do material.

Etapa Fluxagem:

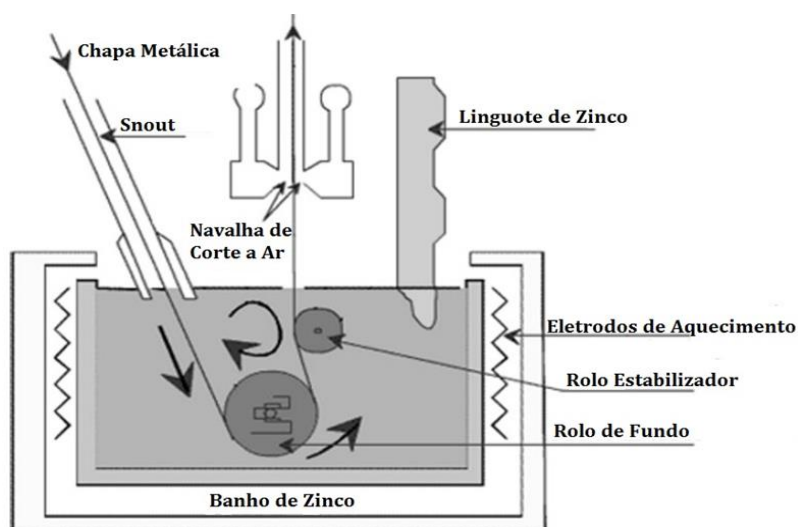
Tem como função dissolver sais e óxidos de ferro que ainda estejam remanescentes na superfície do material. Com essa etapa, além da limpeza pretende-se melhorar a interação entre o zinco fundido e o aço. Para cumprir com essas demandas, insere-se o material em uma solução salina por um com temperatura de 70 °C por um tempo médio de 1,5 minuto.

Etapa Galvanização:

A galvanização por imersão a quente consiste na imersão do metal em um banho de zinco líquido que pode ser puro ou conter pequenas adições de elementos de liga dependendo da aplicação do produto final (Kania et al., 2020). No geral a espessura dos revestimentos galvanizados por imersão a quente varia de 7 µm a 125 µm.

A Figura 5 mostra um esquema simplificado do pote do banho de zinco em que a chapa de aço é inserida para ser galvanizada.

Figura 5 — Esquema do banho de zinco no processo de galvanização a quente.



Fonte: Adaptado de FELIX (2017).

A chapa é imersa no pote contendo zinco fundido ($460 \pm 20^\circ\text{C}$) para obtenção do revestimento. A entrada da chapa é controlada por uma guia chamada *Snout*. Já dentro do banho, a chapa é forçada a passar entre dois rolos que orientam seu caminho através do mesmo. Na saída do pote de zinco o material passa por um conjunto de navalhas de ar que tem por objetivo remover o excesso de zinco e controlar a espessura do revestimento. (Silveira, 2015).

Após a etapa de controle do excesso de zinco o material passa por um conjunto de resfriadores que permitem a solidificação total do recobrimento. Em alguns casos, de acordo com a planta do processo de galvanização, o material ainda passa por um laminador de encruamento para ajuste da planicidade, rugosidade e propriedades mecânicas. Por fim, o material é submetido a um processo de aparar de bordas que visa a adequação da largura em função da sua aplicação, inspeção superficial e oleamento (Silveira, 2015).

Etapa Passivação:

A passivação tem por objetivo criar uma camada protetora de óxidos sobre o revestimento e, com isso aumentar a vida útil do mesmo. O tratamento é realizado pela imersão do material galvanizado em um eletrolito contendo ions oxidantes.

A indústria automobilística utiliza nos dias atuais majoritariamente dois tipos de revestimentos: o GI (*Galvanized Iron*) e o GA (*Galvannealed*). O tipo GI é aquele em que após a galvanização por imersão a quente, não recebe tratamento térmico e sua estrutura é composta por zinco na forma hexagonal. O revestimento do tipo GA recebe tratamento térmico após a etapa de imersão ao banho de zinco tendo sua estrutura composta por soluções sólidas intermediárias de zinco – ferro que se alojam de forma estratificada entre a interface do substrato até o topo da camada que contém apenas zinco. (Marques, 2008; Vieira, 2007; Batista 2013).

Atualmente os banhos de zinco fundido utilizados são compostos por aproximadamente 99% de zinco puro. O restante é composto por impurezas que podem ser indesejáveis ou adicionadas no processo. A principal, que existe em maior quantidade é o ferro (*Fe*), que entra no banho de forma indesejável como resultado da dissolução dos substratos presentes no aço, que atingem o ponto de saturação do banho de zinco líquido. Diversos elementos de liga como, por exemplo, chumbo, alumínio e silício, podem ser inseridos ao banho para situações em que se busca obter características específicas de revestimento em função da posterior aplicação e utilização do material. (Saravan & Srikanth, 2018; Kania et al., 2020).

2.2. REVESTIMENTO GI – GALVANIZED IRON

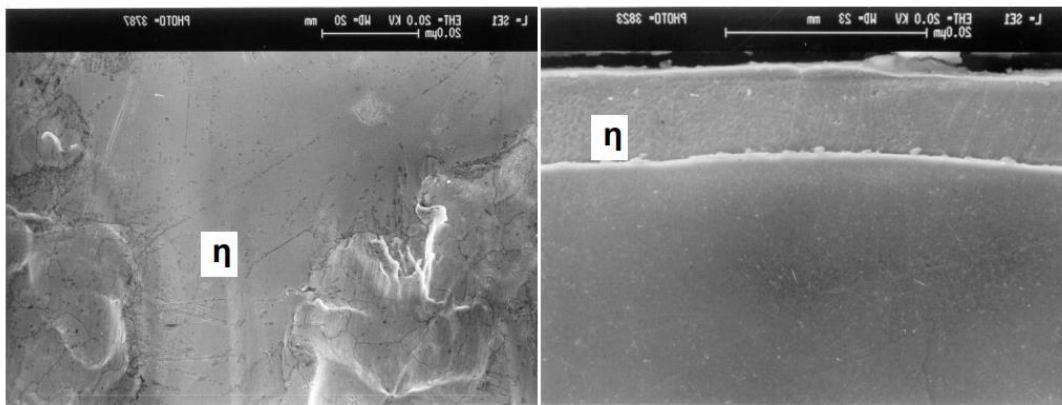
De acordo com Vieira et al. (2022), o revestimento de zinco mais utilizado nas indústrias automobilísticas da América do Norte e da Europa é o do tipo GI.

A obtenção deste tipo de revestimento ocorre com a inserção completa da chapa de aço em um banho de zinco fundido durante um tempo médio de 3 s, a uma temperatura de 450 °C. As principais características deste revestimento são a alta qualidade superficial, relativa ductilidade e a excelente aderência ao substrato. Para este tipo de recobrimento, tem-se uma espessura de camada revestida que varia entre 5 a 20 µm (Manhabosco, 2017).

A composição química do banho de zinco para a formação do revestimento do tipo GI engloba a adição de teores mínimos de 0,20 % alumínio. A estrutura característica deste tipo de revestimento é formada por uma camada contendo zinco puro, denominada fase “eta” (η), e uma fina camada contendo fases formadas por *Fe-Al* inseridas dentro de uma matriz de *Zn* e que se localiza na interface entre o substrato (aço) e o revestimento. Essa fase é denominada “camada inibidora” pois impede a nucleação e o crescimento exagerado das fases intermetálicas ferro - zinco. (Eleutério, 2019).

A Figura 6 mostra uma morfologia típica do aço com revestimento GI contendo a fase η no detalhe (à esquerda) e sobre o substrato de aço. As imagens foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 6 — Morfologia típica do revestimento GI.



Fonte: ELEUTÉRIO (2019).

2.3. REVESTIMENTO GA - GALVANNEALED

O grande diferencial dos revestimentos GA é o fato de que chapa de aço, após o passar pelas etapas que configuram a galvanização, receber um tratamento térmico de recozimento com temperaturas que variam entre 450 °C e 520 °C. Este tratamento visa a formação de fases ferro – zinco entre o substrato e o topo da camada zincada. A formação de fases ferro – zinco de forma controlada e com teores de ferro de até 10 % favorece o revestimento no que tange a sua soldabilidade, rugosidade e pintabilidade (Shmidt et al., 2009; Alvarenga & Lins, 2016; Oliveira & Rios, 2013). A Tabela 1 apresenta as fases que já foram identificadas e algumas de suas características.

Tabela 1 — Fases intermediárias identificadas na camada zincada.

Principal Fase	Fórmula Química	Dureza (HV)	Teor de Ferro (% massa)
η	Zn	37	<0,03
ζ	$FeZn_{13}$	270	5 - 6
δ	$FeZn_7$	450-470	7 - 12
Γ_1	$FeZn_4$	500-550	17 - 19
Γ	Fe_3Zn_{10}	450	23 - 28

Fonte: Adaptado de MARQUES (2008).

Afim de evitar confusões, é necessário neste ponto do trabalho fazer uma distinção entre os dois tipos de mecanismos de formação das camadas intermetálicas de acordo com a literatura consultada. Duas situações são constatadas:

a) Banhos de zinco com teores de alumínio menores que 0,20 % :

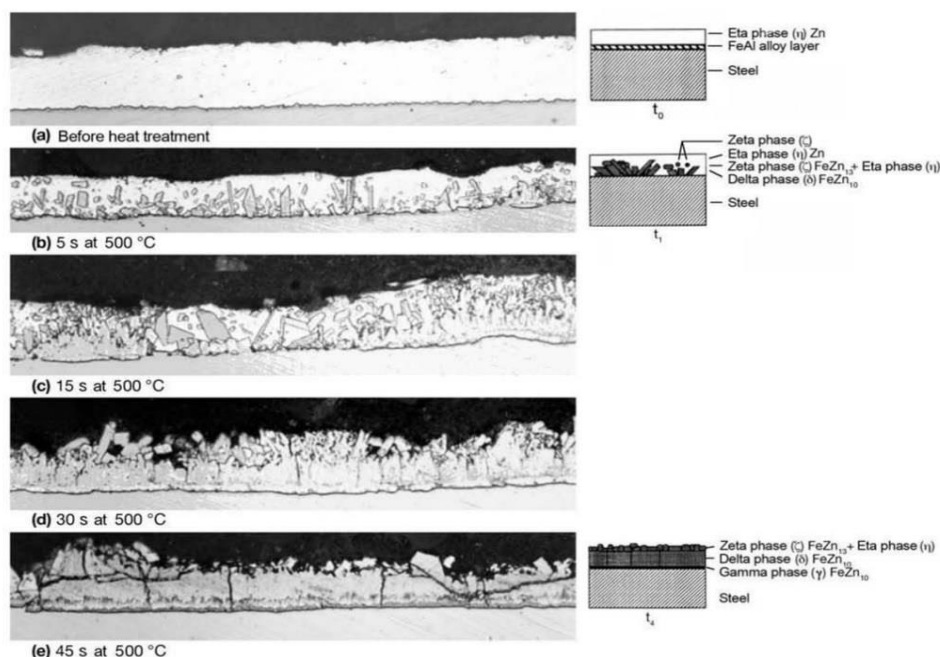
Caso o banho de zinco não apresente ou possua quantidades menores do que a necessária para a formação das camadas inibidora composta de $Fe - Al$ (em geral, 0,20% de Al), a formação das fases intermetálicas $Fe - Zn$ se dará por um mecanismo de difusão entre o ferro e o zinco que pode sofrer a influência diversos fatores como impurezas contidas no banho (exemplo: porcentagens de Si e P), composição química da chapa de aço, a temperatura do banho e o tempo e a velocidade de imersão no banho (Pokorny et al., 2016). Faz-se aqui a ressalva de que não há um consenso na literatura sobre esta porcentagem de alumínio necessária para a formação da camada inibidora. Autores como Schmidt et al. (2009) identificaram a camada inibidora para porcentagens de alumínio de 0,10 % em um estudo para uma temperatura de banho de zinco de 465 °C. No entanto o número 0,20% estipulado neste trabalho pode ser considerado como um valor de garantia para a qual a partir deste a camada inibidora é formada.

b) Banhos de zinco com teores de alumínio iguais ou maiores que 0,20 %:

Caso o banho de zinco contenha a porcentagem de alumínio suficiente para a formação da camada inibidora composta de $Fe - Al$, esta será rompida durante o tratamento térmico de recozimento (processo esse que caracteriza a galvanização do tipo GA) posterior a etapa de galvanização. Neste caso, a camada inibidora funcionará como uma barreira para evitar o crescimento excessivo e descontrolado das diversas camadas $Fe - Zn$. A maneira pelo qual se dará a formação das camadas intermetálicas em detrimento da camada inibidora é chamado de *out-burst*.

O *out-burst* caracteriza-se por uma explosão reativa que ocorre através dos contornos de grão do substrato, fazendo com que a camada inibidora seja dissolvida (Vieira, 2007). A figura 7 mostra a dinâmica de *out-burst* durante a formação das fases intermetálicas em função do tempo durante um tratamento térmico de recozimento realizado a 500 °C. Percebe-se que antes do início do tratamento térmico (na imagem: *before heat treatment*), há uma camada inibidora (*FeAl alloy layer*) entre o aço (*steel*) e a fase (*phase*) “eta”. À medida que o tratamento térmico ocorre a camada inibidora é dissolvida e formam-se as fases intermetálicas $Fe - Zn$. Neste caso, a camada inibidora funciona como uma barreira para impedir o crescimento excessivo das fases $Fe - Zn$.

Figura 7 — Formação das camadas intermetálicas ferro-zinco durante o tratamento térmico de recozimento de uma chapa de aço galvanizada.



Fonte: C. R. XAVIER e P. R. RIOS extraídas de COULPAERT (2008).

A presença das fases intermediárias $Fe - Zn$ espessas e com teores de zinco superiores a 10% é prejudicial ao revestimento de zinco pois, torna o revestimento frágil, pouco tenaz, e suscetível à ocorrência de *powdering* (isto é, deterioramento da aderência do revestimento sobre o substrato). A deterioração da aderência torna-se um problema extremamente grave quando, durante os processos de estampagem do aço que foi galvanizado, ocorre o desprendimento do revestimento de zinco do substrato. O aço fica, dessa forma, desprotegido quanto a corrosão (Vieira, 2007; Alvarenga & Lins, 2016; Oliveira & Rios, 2013).

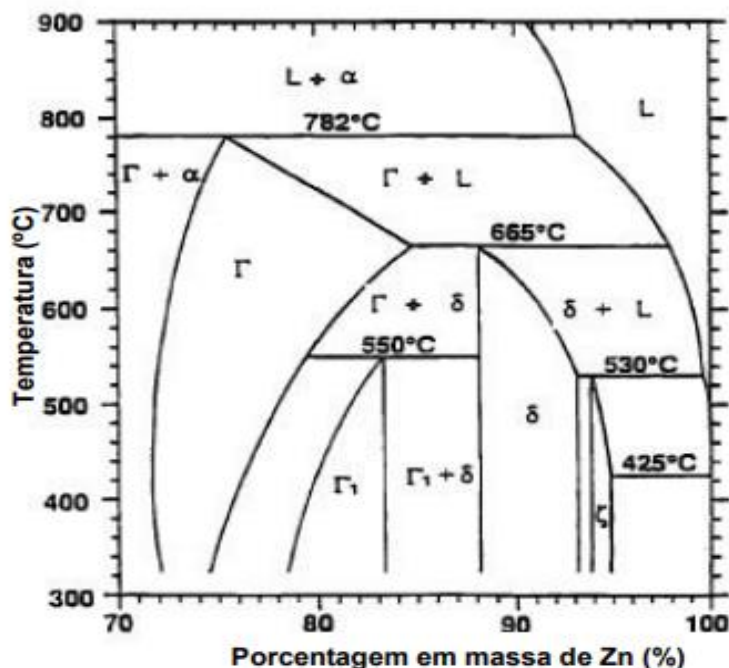
O *powdering* é atribuído a altas concentrações de ferro no revestimento e, em especial, desenvolvimento excessivo da fase Γ e Γ_1 que, como pode ser observado na Tabela 1, são as duas fases possuem maior dureza e, conseqüentemente, de maior resistência mecânica. Em contrapartida estas fases absorvem pouca energia no processo de estampagem mecânica (deformação plástica) fazendo com que a camada zincada perca a sua aderência ao substrato (Vieira, 2007).

Azadeh e Toroghinejad (2009) avaliaram o efeito do tratamento térmico na formabilidade de aços com baixos teores de carbono que foram galvanizados por imersão a quente em banhos de zinco com porcentagem de 0,17 % de alumínio. Para a avaliação, foram realizadas análise microestrutural e ensaios de Erichsen em amostras de aço IF que sofreram a galvanização dos tipos GI e em amostras de aço IF que sofreram galvanização GA com tempos e temperaturas de recozimento pós galvanização diversos. Como resultado, os autores concluíram que as amostras que sofreram processo tipo GI apresentaram um limite de formabilidade entre 2 a 7% maiores do que aqueles que sofreram processo GA. Isto se deve ao fato de que o processo GA possibilitou a nucleação e crescimento de fases ferro – zinco formadas durante o tratamento térmico enquanto, no processo GI, a camada inibidora impediu a formação destas fases indesejáveis.

Quanto maior a temperatura e tempo de tratamento térmico a que for submetido o material após a galvanização, maior a difusão de *Fe* do substrato e conseqüentemente maior a formação e espessura da fase Γ . A presença da fase δ , em detrimento fase Γ , é preferível para aplicações em engenharia pois esta, por possuir menos da metade de teor de ferro quando comparada a fase Γ , é mais tenaz e possui maior capacidade de absorver esforços e deformações mecânicas (Vieira, 2007; Gogola et al., 2020)

A Figura 8 mostra parte do diagrama de equilíbrio binário e indica a formação das fases *Fe - Zn* presentes no revestimento GA.

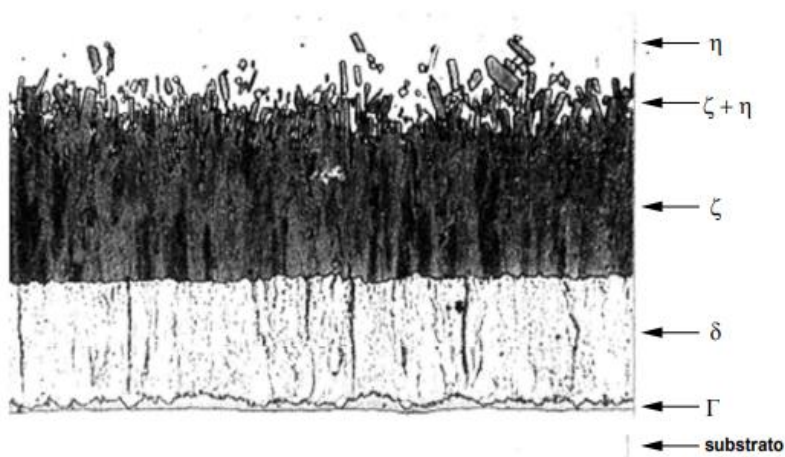
Figura 8 — Parte do diagrama binário contendo maiores percentuais de Zn e as fases presentes no revestimento tipo GA.



Fonte: ELEUTÉRIO (2019).

As camadas intermediárias *Fe - Zn* presentes em um revestimento obtido por galvanização a quente apresentam-se de forma estratificada e gradual, não existindo uma linha de demarcação clara entre elas. Há casos em que pode ocorrer uma mistura entre duas das que estão em contato, não sendo fácil determinar quando se dá o término de uma e o início de outra. O percentual de ferro diminui gradativamente desde a interface do substrato até o topo do revestimento que contém apenas zinco. A proporção em que cada fase estará presente varia em função de fatores como composição química do banho, tempo para a nucleação das fases, e aporte térmico fornecido. A Figura 9 apresenta a microestrutura de uma seção transversal de uma chapa de aço galvanizada em condições normais, com temperatura de zinco fundente na faixa de 440 °C a 480°C (Batista, 2013; Eleutério 2019, Marques 2008).

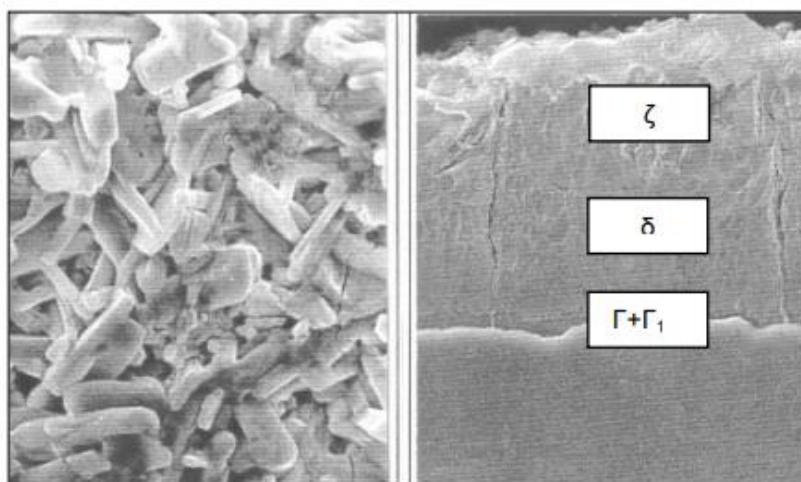
Figura 9 — Seção transversal de um aço galvanizado por imersão a quente (GA), com tempo de imersão de um minuto em banho de zinco fundente a 450 °C.



Fonte: MARQUES (2008).

A Figura 10 mostra a morfologia da superfície e a seção transversal de um revestimento GA típico contendo as fases gama (Γ), gama 1 (Γ_1), delta (δ) e zeta (ζ).

Figura 10 – Morfologia da superfície e seção de um revestimento GA típico contendo as fases gama (Γ), gama 1 (Γ_1), delta (δ) e zeta (ζ).



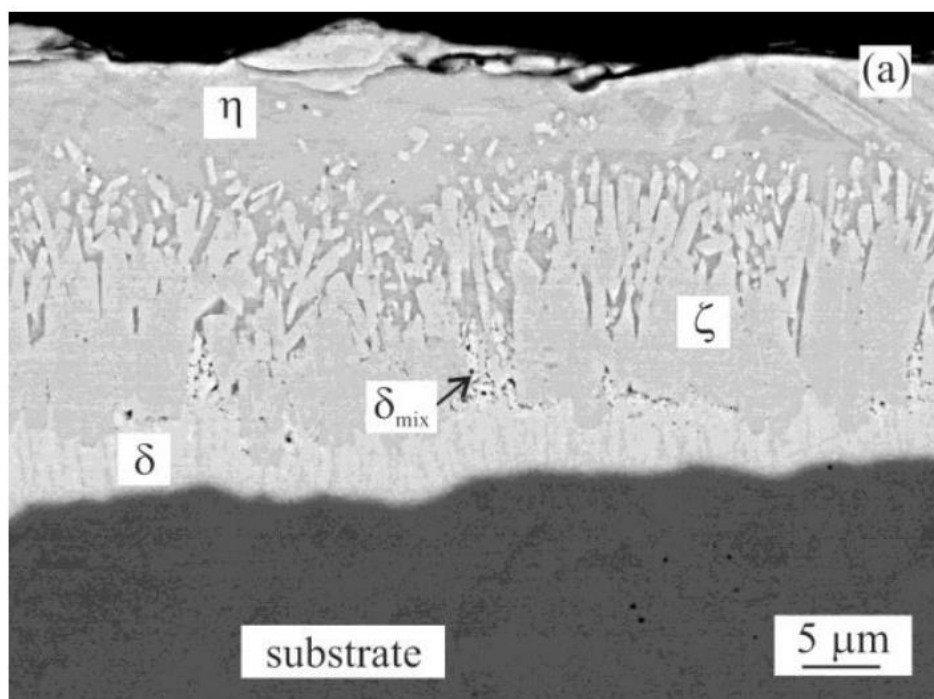
Fonte: ELEUTÉRIO (2019).

Gogola et al. (2020), analisaram a formação de fases intermetálicas em amostras de aço de alto teor de carbono. Para isto realizaram o processo de galvanização para banhos de zinco puro, para tempos de imersão de banho variando entre 450 °C a 490 °C e tempos de imersão entre 24 s a 60 s. Os autores concluíram

que o aumento do tempo de imersão no banho de zinco aumentou a espessura total da camada intermetálica, ao passo que o aumento da temperatura do banho fez decrescer a fração volumétrica da fase ζ e aumentar a fração volumétrica da fase δ . Segundo os autores, a fase Γ não foi encontrada, pois a mesma, conforme a literatura, para aços com o alto teor de carbono pode aumentar o tempo necessário para a formação desta fase para tempos de imersão de banho superiores a 7 minutos.

A Figura 11 mostra a seção transversal indicando as fases intermetálicas para a amostra de aço que foi galvanizada em banho de temperatura de 460 °C para tempo de imersão de 24 s.

Figura 11 – Fases intermetálicas para galvanização (GA) a temperatura de banho de 460 °C e tempo de imersão de 24 s.



Fonte: GOGOLA et al. (2020).

3. DEFEITOS SUPERFICIAIS RELACIONADOS ÀS ETAPAS DO PROCESSO DE GALVANIZAÇÃO A QUENTE

Saravanan & Srikanth (2018), classificam os defeitos superficiais em “grandes” ou “pequenos”. Para serem considerados notados e provocarem a rejeição do material galvanizado, esses defeitos devem ser vistos a olho nu pelo ser humano (a resolução do olho humano é 0,1 mm). Conseqüentemente, um defeito objetivo deve ser maior do que 100 µm. Baseado na origem do defeito superficial encontrado nas superfícies galvanizadas por imersão a quente, eles podem ser classificados em seis categorias. São elas:

1. Defeitos originados do substrato do aço;
2. Defeitos originados com a limpeza química do aço;
3. Defeitos originados do forno de recozimento;
4. Defeitos originados do banho de zinco;
5. Defeitos relacionados ao jato de ar;
6. Defeitos relacionados com a laminação do aço.

Este trabalho se propôs a analisar, avaliar e mensurar camada inibidora e o defeito conhecido como *Dross*. Este é um defeito originado do banho de zinco. Na próxima seção serão discutidos os aspectos e relação entre a camada inibidora e o *Dross*.

3.1. A CAMADA INIBIDORA E O DROSS

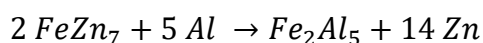
De acordo Saravan & Srikanth (2018), Manhabosco (2017), Felix (2013), Felix et al. (2017) a fim de inibir as reações entre ferro - zinco e evitar a formação de camadas intermetálicas *Fe - Zn* espessas e com alto teor de ferro, devem ser adicionadas porcentagens de alumínio iguais ou superiores a 0,2% ao banho de zinco. Por questões de afinidade termodinâmicas ferro liga-se preferencialmente ao alumínio em detrimento ao zinco. Impedir a formação de camadas *Fe - Zn* espessas, faz-se necessário pois, estas são prejudiciais à aderência do revestimento de zinco ao substrato de aço (*powdering*), em especial devido à

formação da fase intermetálica Γ , fazendo com que o zinco se desprenda quando a chapa de aço passa pelo processo de conformação mecânica. Este desprendimento da camada de zinco faz, conseqüentemente, que o material perca a sua proteção contra a corrosão.

Muitas pesquisas vêm sendo conduzidas nos últimos anos no intuito de melhorar a resistência a corrosão sem que, para isso, seja necessário utilizar o artifício de um aumento excessivo da espessura da camada zincada. Além disso pesquisadores tem buscado explicações para fatos ainda pouco explorados sobre processo de galvanização, como por exemplo a cinética de formação das fases ferro zinco e os efeitos de adições de elementos de liga. Novas ligas zincadas com alumínio, tem sido objeto de numerosos estudos como por exemplo os casos dos revestimentos compostos de $Zn-5\%Al$ e $Zn-55\%Al$. (Costa et al., 2021; Kania et al. 2020).

Coni (2004) descreve, em sua dissertação de mestrado, da seguinte forma a reação entre o ferro e alumínio:

“Quando a peça de aço imerge no banho de zinco fundido, parte do ferro presente na peça é dissolvida promovendo a formação, inicial, do composto $FeZn_7$. Se a concentração de alumínio é alta, o composto $FeZn_7$ se converte em Fe_2Al_5 , segundo a Equação 1”.



Equação 1 — Formação da partícula de Fe_2Al_5

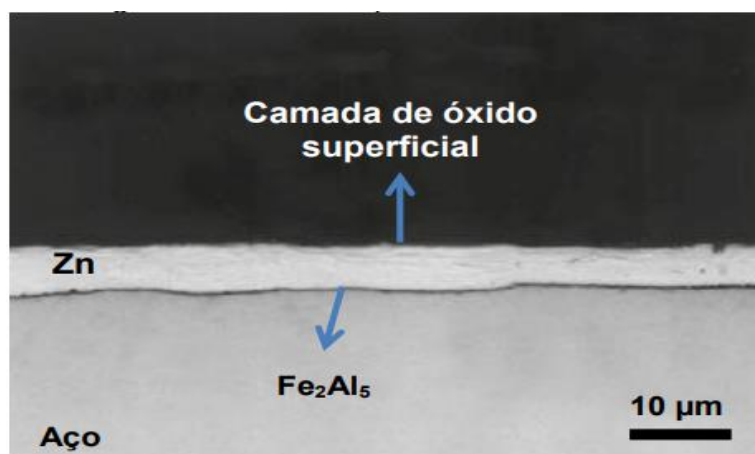
As fases $FeZn_7$ e Fe_2Al_5 são denominadas como *Dross*. Em função das diferenças de densidade dos elementos químicos (zinco é 6700 kg/m³, do componente $FeZn_7$ é 7300 kg/m³ e do Fe_2Al_5 é 4200 kg/m³) o $FeZn_7$ precipita-se no fundo do banho de zinco e é denominado como “*Bottom Dross*”. De forma contrária, as partículas de Fe_2Al_5 , conhecido como “*Top Dross*”, ficam na parte

superior do banho, sobrenadante. O resultado é a inserção destas fases na camada galvanizada e a possível visualizaçãdo de defeitos na peça recoberta, alterando sua aparência e não alcançando o controle de qualidade desejado. A taxa de formação é função da temperatura de entrada da chapa de aço no banho e da solubilidade do alumínio e do ferro no banho zincado (Félix et al., 2017; Rachmat & Ogawa, 2018; Coni, 2004).

A literatura não apresenta um conceito muito bem definido para a distinção entre o *Top Dross* e a camada inibidora. Ambos são formados por partículas de Fe_2Al_5 . Quando essas partículas formam uma camada fina entre o substrato e a base do revestimento tem-se a chamada camada inibidora. A Figura 12 mostra as fases comuns do revestimento tipo GI, contendo uma camada de Fe_2Al_5 entre a camada zincada e o substrato. Esta camada é requerida e benéfica para o revestimento.

Quando estas partículas de Fe_2Al_5 se localizam no topo do revestimento, tem-se o chamado *Dross* que pode ser considerado um defeito caso afete o aspecto superficial da chapa galvanizada.

Figura 12 — Estrutura típica do revestimento GI.

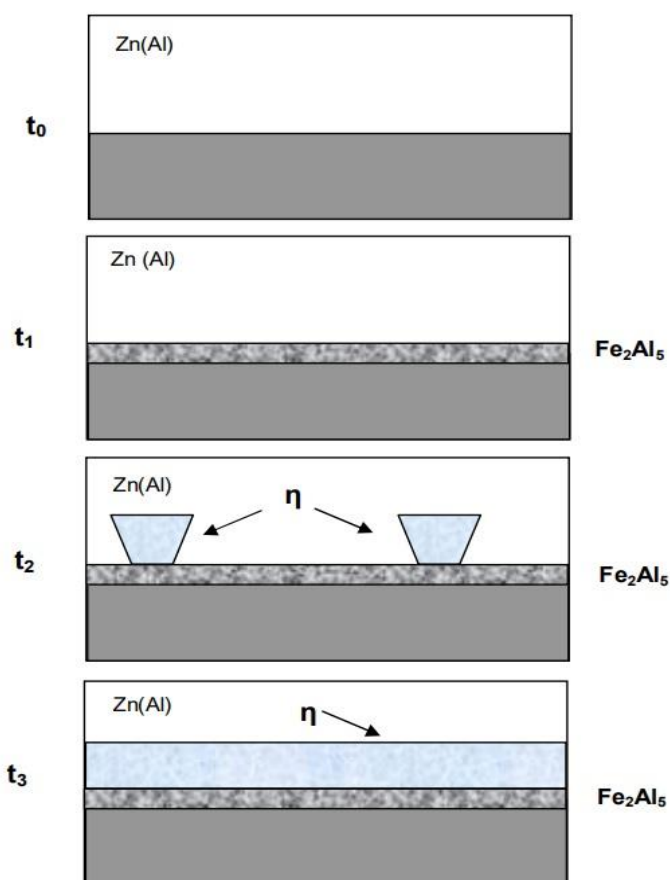


Fonte: MANHABOSCO (2017).

A Figura 13 apresenta de forma esquemática a sequência de etapas que caracteriza a formação da camada inibidora. O instante inicial é representado por t_0 e , à medida que o tempo passa ocorre o desenvolvimento das fases,

onde $t_0 < t_1 < t_2 < t_3$. O tempo t_0 marca a entrada da chama no banho de zinco líquido. Em t_1 , inicia-se a formação da fase Fe_2Al_5 , cuja reação é instantânea. No tempo t_2 ocorre a nucleação e, posteriormente, o crescimento da fase η , ou seja, Zn . Em t_3 ocorre o fim do processo (Brepohl, 2013).

Figura 13 — Representação esquemática da formação da fase intermetálica com a presença de 0,2% de alumínio dentro do banho.



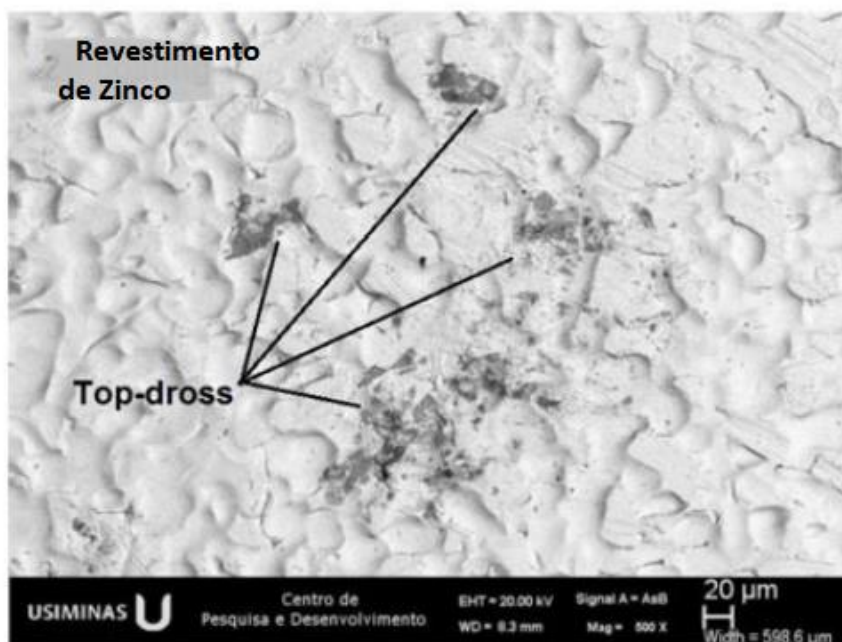
Fonte: BREPHOL (2013) apud MARDER (2000).

Diversos trabalhos têm procurado entender e usar metodologias para evitar a formação do *Dross* nas chapas galvanizadas. Vieira et al. (2021) realizaram estudo através de simulação computacional avaliando a fluidodinâmica das partículas de *Dross* em banhos zincado para diferentes posicionamentos do indutor elétrico no pote de zinco (Figura 3). Para a simulação, os autores utilizaram duas configurações do pote: a primeira com o indutor elétrico na lateral e a segunda com o indutor elétrico frontal. A mudança

da posição do indutor elétrico alterou o fluxo do banho de zinco, alterando, conseqüentemente, o caminho tomado pelas partículas de *Dross* durante o processo. Foi concluído que partículas maiores precipitam-se na superfície do banho de zinco com mais facilidade do que partículas menores.

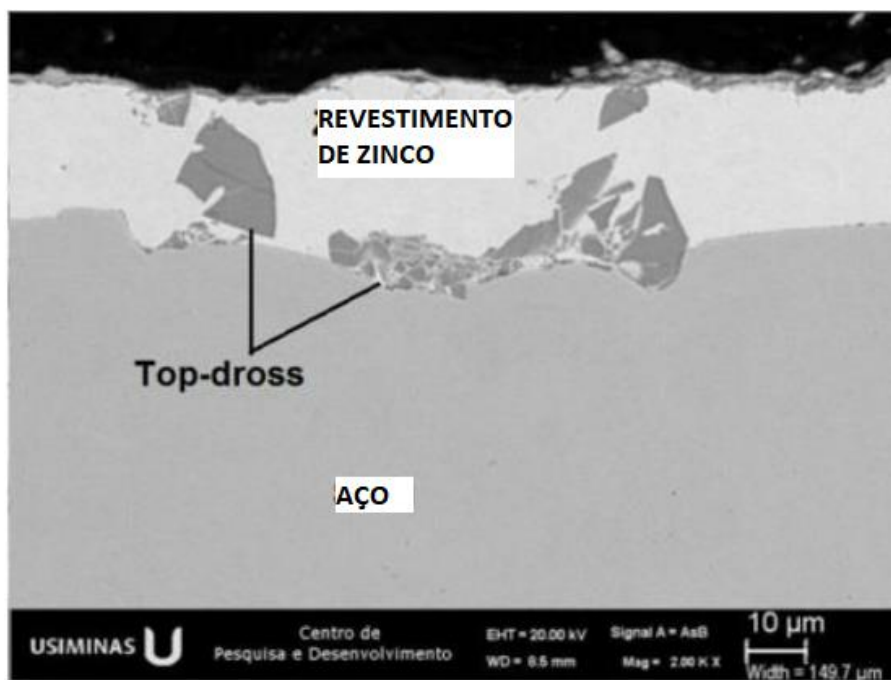
Em outro trabalho, Vieira et al. (2022) analisaram através de simulação computacional a ocorrência de partículas de *Dross* variando o posicionamento e as proporções do lingote de zinco está submerso no banho em diferentes proporções. Foi constatado que quando o lingote está totalmente inserido no banho de zinco, há uma maior ocorrência de partículas de *Dross*. As Figuras 14 e 15, mostram os aspectos morfológicos e as fases presentes na superfície e a da seção transversal de chapa galvanizada contendo *Top-Dross*, fase rica de alumínio e que dependendo do tamanho poderá ser considerada indesejável na camada zincada.

Figura 14 — Aspecto superficial da camada zincada contendo partículas de *Top Dross* com magnificação de 500 X.



Fonte: Adaptado de VIEIRA et. al. (2022)

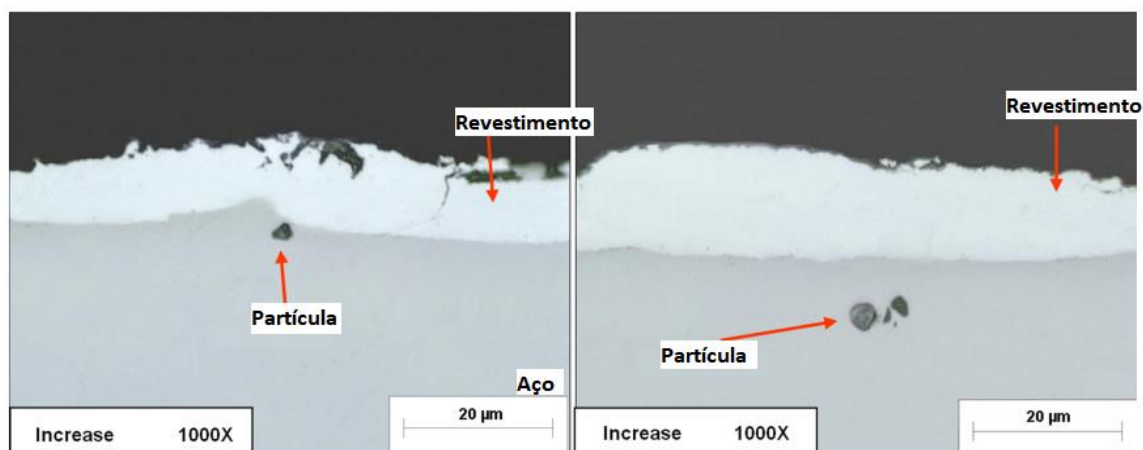
Figura 15 — Aspecto transversal da camada zincada contendo partículas de Top Dross com magnificação de 500X.



Fonte: Adaptado de VIEIRA et. al. (2022).

Felix et. al. (2017) estudaram os efeitos que a instalação de um sistema de controle automático para alterar o posicionamento do *Snout* (guia de entrada da chapa de aço no banho de zinco) possa ter na formação do *Dross* em banho zincados. Os autores concluíram que, a implementação de um sistema de controle automático para o posicionamento do *Snout* é capaz de diminuir o tempo gasto na operação em relação ao posicionamento manual do mesmo. Assim, com menor tempo necessário para que a chapa fique imersa no banho de zinco, obteve-se como consequência uma redução de 4,56 % de *Dross* nas chapas galvanizadas. A Figura 16, mostra a caracterização do *Dross* realizada pelos autores.

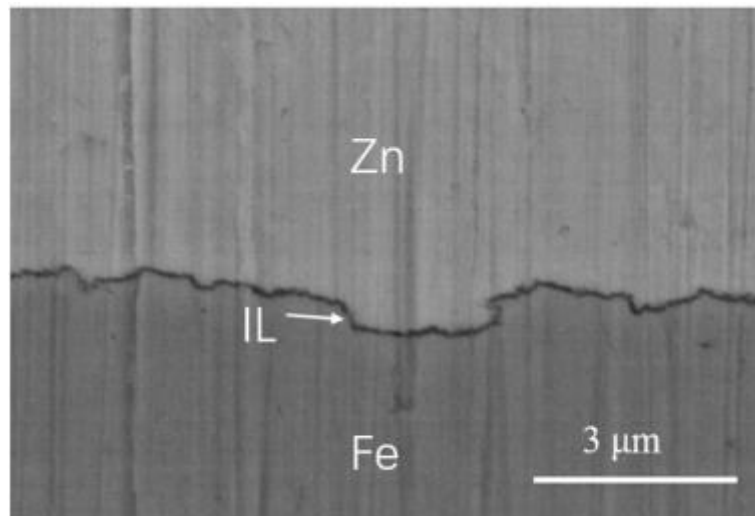
Figura 16 — Camada zincada e partículas consideradas não problemáticas para o aspecto superficial.



Fonte: Adaptado de FELIX et. al. (2017).

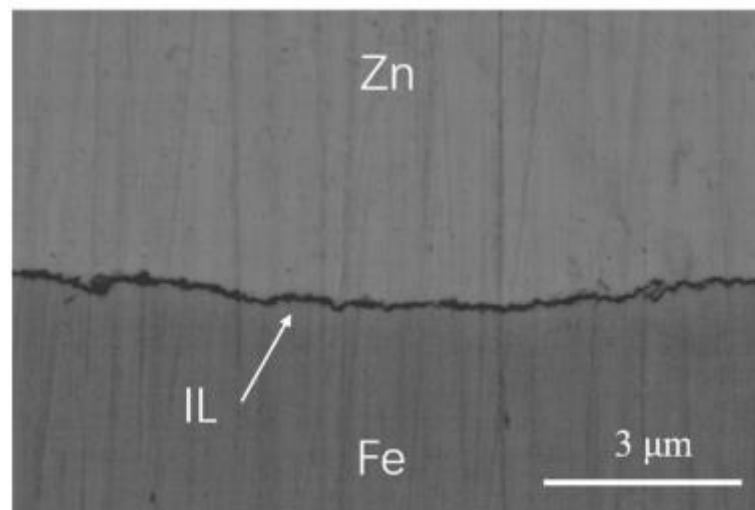
Ting Min et al. (2018), estudaram os efeitos que o teor de concentração de alumínio possui na formação da camada inibidora (*inhibition layer - IL*). Para isto os autores, realizaram o processo de galvanização a quente para os seguintes teores e alumínio no banho de zinco: 0,0%, 0,1%, 0,2%, 0,5% e 0,8%. Concluíram que para os teores 0,0 e 0,1 não foi possível identificar a formação camada inibidora. Para os teores de 0,2 %, 0,5% e 0,8%, foi possível identificar a camada inibidora e verificar que quanto maior o teor de alumínio adicionado ao banho mais espessa é a camada inibidora. As Figuras 17 e 18 apresentam as seções transversais obtidas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), para amostras que passaram por banhos com teores de zinco 0,5 % e 0,8 %, respectivamente. As Figuras 19 e 20 apresentam a análise química semiquantitativa obtida por Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), para estas mesmas condições de teores de alumínio, destacados em verde os pontos mapeados em que são encontradas partículas de alumínio.

Figura 17 — Aspecto da seção transversal da camada inibidora (IL) para banho de zinco com teor de 0,5% de alumínio.



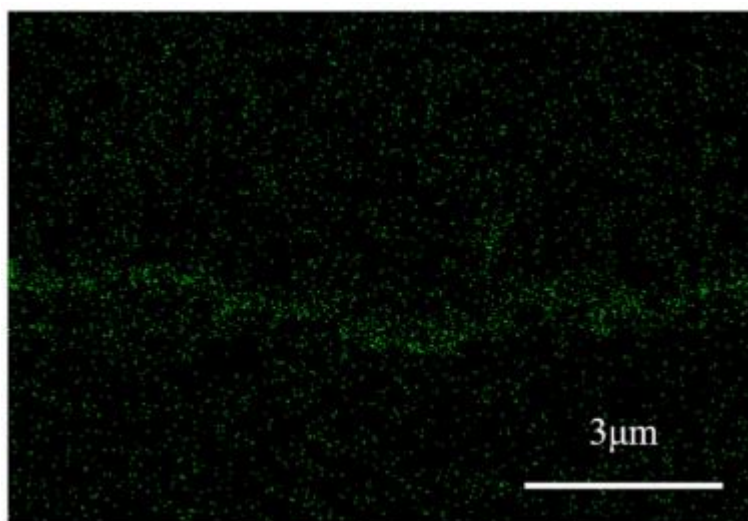
Fonte: MIN et al. (2018).

Figura 18 — Aspecto da seção transversal da camada inibidora (IL) para banho de zinco com teor de 0,8% de alumínio.



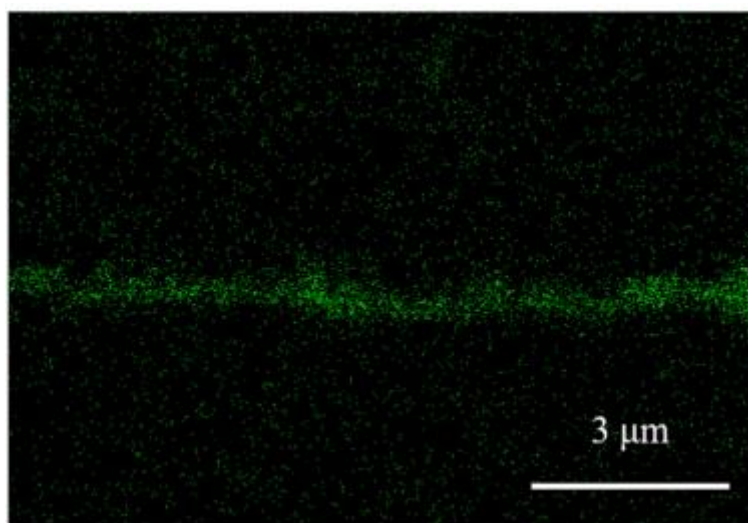
Fonte: MIN et al. (2018).

Figura 19 — Análise semiquantitativa por EDS. Em destaque partículas de alumínio. Banho zincado com 0,5% teor de alumínio.



Fonte: MIN et al. (2018).

Figura 20 — Análise semiquantitativa por EDS. Em destaque partículas de Alumínio. Banho zincado com teor de 0,8% teor de alumínio.



Fonte: MIN et al. (2018).

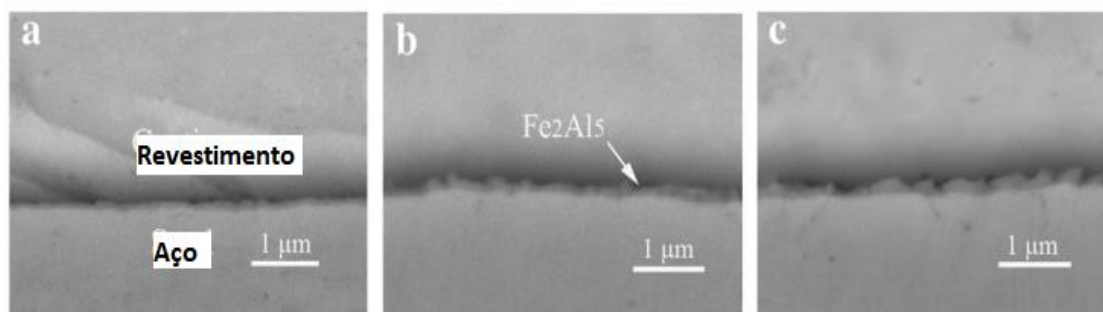
Yang et al. (2013), avaliaram os efeitos da temperatura de entrada da chapa a ser galvanizada no banho de zinco na formação da camada inibidora. Para isto, selecionaram amostras de chapas de aço 22MNB5 estampados a quente que passam pelo processo de recozimento antes do banho de zinco. Para a análise selecionaram três temperaturas de entrada das chapas e banhos de zinco com duas porcentagens diferentes de alumínio. Assim, dois banhos foram preparados com porcentagens de 0,12% e 0,20% de alumínio e para cada um dos banhos

foram utilizadas as temperaturas de entrada da chapa no banho de zinco de 440 °C, 460 °C e 480 °C. Os autores concluíram que a morfologia e microestruturas das camadas interfaciais foram fortemente influenciadas pela temperatura de entrada da chapa a ser zincada no banho de zinco.

Para a porcentagem de 0,12 de alumínio, as camadas intermetálicas foram em sua maioria formadas por fases ζ (zeta) e, à medida que a temperatura aumentou, esta fase ficou mais espessa. Pouca ou nenhuma camada inibidora contendo Fe_2Al_5 foi formada.

Para teores de 0,20% de alumínio no banho, a camada inibidora constituída Fe_2Al_5 , não só foi formada, como se mostrou mais espessa à medida que ocorreu um aumento de temperatura do banho zincado. A Figura 21 a, b e c apresentam o aspecto da seção transversal da camada inibidora formada para as respectivas temperaturas de entrada da chapa: 440 °C, 460 °C e 480 °C.

Figura 21 — Aspecto da seção transversal para chapa galvanizada em banho com teor de 0,2 % de zinco nas seguintes temperaturas de entrada: a) 440 °C b) 460 °C c) 480 °C.



Fonte: YANG et al. (2013).

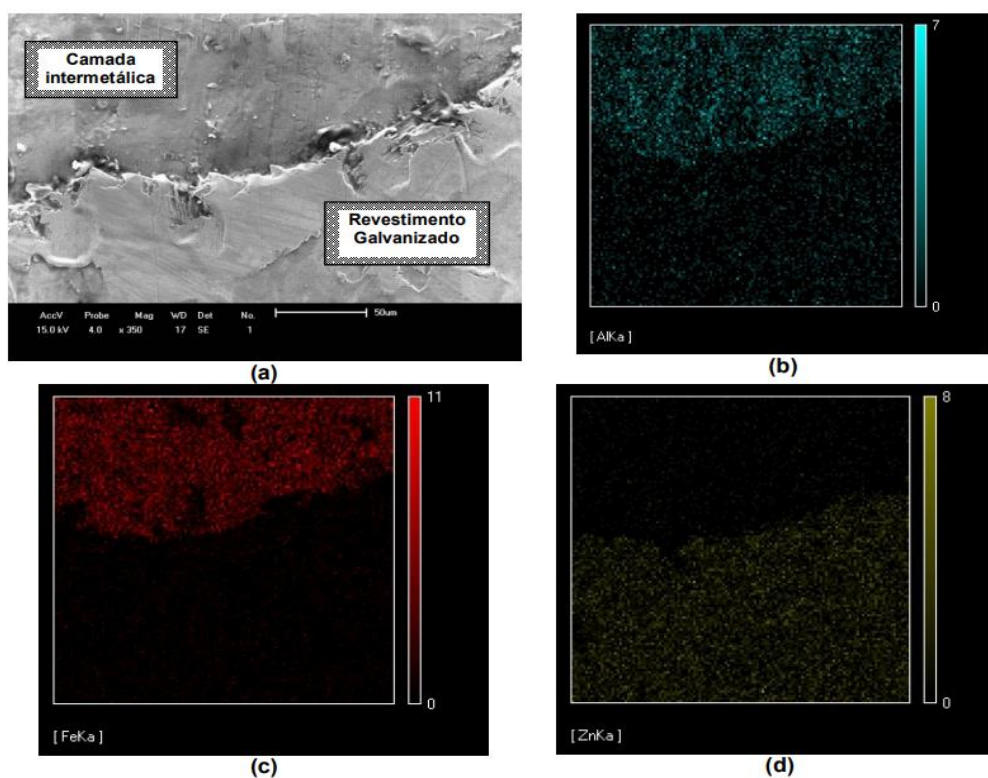
Em sua Dissertação de Mestrado Brepohl (2013), utilizou MEV (Figura 22) para caracterizar a camada inibidora formada em aços IF que passaram pelo processo de galvanização GI. Através da análise de mapeamento EDS (Figura 23) o autor pode verificar onde se concentravam as maiores porcentagens dos elementos alumínio, ferro e zinco.

Figura 22 — Corte transversal de uma chapa galvanizada comum GI com gramatura de 100 g/m² a qual se observa a camada intermetálica rica em Al na região da interface.



Fonte: BREPOHL (2013).

Figura 23 — Mapeamento via EDS dos elementos Al, Fe e Zn em uma chapa galvanizada após dissolução eletroquímica eletroquímico a) imagem de topo da camada; b) elemento Al; c) elemento Fe e; d) elemento Zn.



Fonte: BREPOHL (2013).

Segundo Vieira et al (2022), na indústria automobilística, principalmente por fatores comerciais, há uma alta exigência pela qualidade estética superficial das chapas aço revestidas. Assim, deve-se haver minucioso controle de qualidade dos processos e parâmetros para estes materiais. Partículas de *Dross* superficiais e aparentes inviabilizam o uso destes componentes e podem gerar enormes prejuízos econômicos quando esse defeito é encontrado em larga escala. Os mesmos autores afirmam que não é possível impedir a formação de *Dross* no pote de zinco, porém é possível controlá-lo.

Em todo o mundo estima-se que estão em funcionamento atualmente mais de 600 linhas de galvanização contínua, produzindo mais de 100 milhões de toneladas de chapas galvanizadas. Cerca de 75% dessa produção destina-se ao uso pela indústria automobilística (Ajersch & Ilinca, 2017).

Estes dados demonstram a importância e relevância de estudar e entender a formação do *Dross*, uma vez que uma linha de produção que apresenta chapas galvanizadas com *Dross* aparente podem ser consideradas defeituosas em termos estéticos e isso gera enormes prejuízos do ponto de vista material e econômico.

4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS (PDI)

O Processamento Digital de Imagens (PDI) engloba um conjunto de técnicas que com o auxílio de ferramentas computacionais que vem possibilitando agilidade e precisão para a análises quantitativas e morfológicas no campo das Ciências dos Materiais.

As técnicas de PDI se baseiam em operações matemáticas que permitem alterar os valores dos pixels de uma imagem digital com o objetivo de (Gomes, 2001):

- facilitar sua visualização;
- possibilitar a obtenção de dados quantitativos da imagem.

Marcomini (2011) destaca que as aplicações de técnicas de PDI se encontram presentes em diversos setores industriais como no controle de qualidade da produção de aços ao, por exemplo, possibilitar a determinação, de forma rápida e eficiente, do tamanho médio dos grãos e contabilizar a quantidade de inclusões que o material possa ter. Para sistemas cerâmicos um exemplo de utilização do PDI é a contabilização da quantidade de poros presentes no objeto de estudo e, com este dado em mãos, ajustar fatores como, por exemplo, a temperatura ideal de sinterização.

A literatura apresenta uma série de trabalhos que utilizaram o PDI para a caracterização de fases ou de objetos de interesse em materiais galvanizados, tais como:

- Gogola et al. (2020) estudaram a formação de fases intermetálicas $Fe - Zn$ para aços de alto teor de carbono que sofreram o processo de galvanização tipo GA. A fim de verificar a espessura e a fração volumétrica das fases presentes, foram utilizadas técnicas de PDI.

- Trpčevská et al. (2010) realizaram caracterização do *Botton Dross* no processo de galvanização a quente, utilizando técnicas de PDI.

Através das técnicas de PDI é possível trabalhar com imagens em primeiro lugar corrigindo defeitos de aquisição presentes e, em segundo lugar, extraindo dessas imagens dados quantitativos que permitam a sua análise. Para que esses procedimentos sejam realizados de forma eficiente, é de extrema importância que a imagem adquirida seja de boa qualidade e resolução. Na área de caracterização de materiais estas imagens são obtidas, em geral, por aparelhos como o Microscópio Óptico (MO), Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e o Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) (Dornellas, 2021; Gomes, 2001).

Os *softwares* de PDI possuem inúmeras ferramentas que permitem editar as imagens capturadas de modo a se obter a melhor condição possível em função do que se deseja analisar. Esta etapa é subjetiva, pois varia para cada caso e cabe ao operador determinar quais as melhores funções a serem utilizadas a fim de se obter os dados requeridos de maneira mais precisa e eficiente. Alguns exemplos de ajustes e decisões a serem tomadas são: utilizar a imagem colorida ou em preto e branco; utilizar filtros que permitam realçar bordas, corrigir a iluminação e eliminar ruídos da imagem.

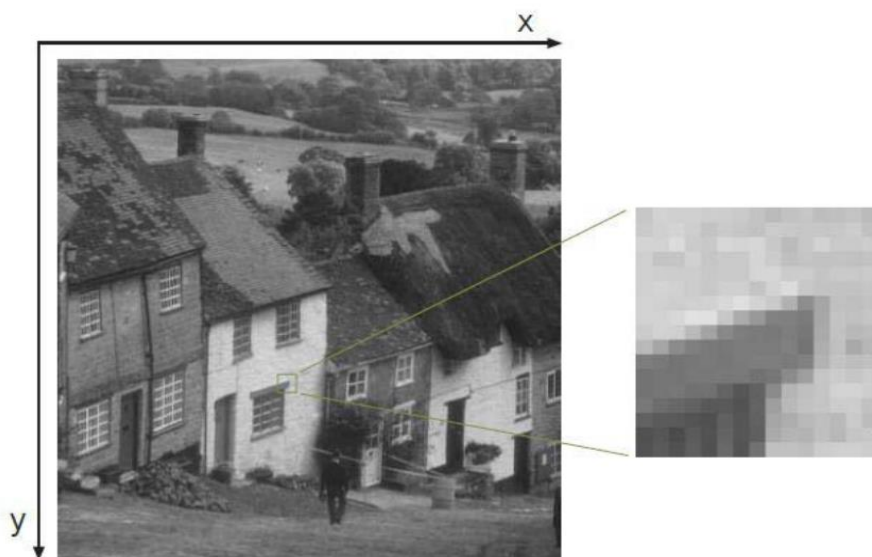
A seguir serão apresentados alguns aspectos referentes a imagem digital e suas características e procedimentos referentes as etapas de análise de PDI.

4.1. IMAGEM DIGITAL

A imagem digital é um arquivo formada por uma matriz de *pixels*. O pixel, abreviação de *picture element*, se organiza de forma quadrada ou retangular e representa o menor fração em que a imagem digital esta dividida. Um pixel é identificado no plano de coordenadas bidimensional (x,y). Em geral, em trabalhos acadêmicos, a imagem é apresentada com um cabeçalho onde são informadas as suas características principais (Gonzalvez, 2000; Silva 2015).

A Figura 24 mostra um exemplo onde os os pixels ou unidades de áreas formadoras de uma imagem estão sob uma ampliação de 17 vezes

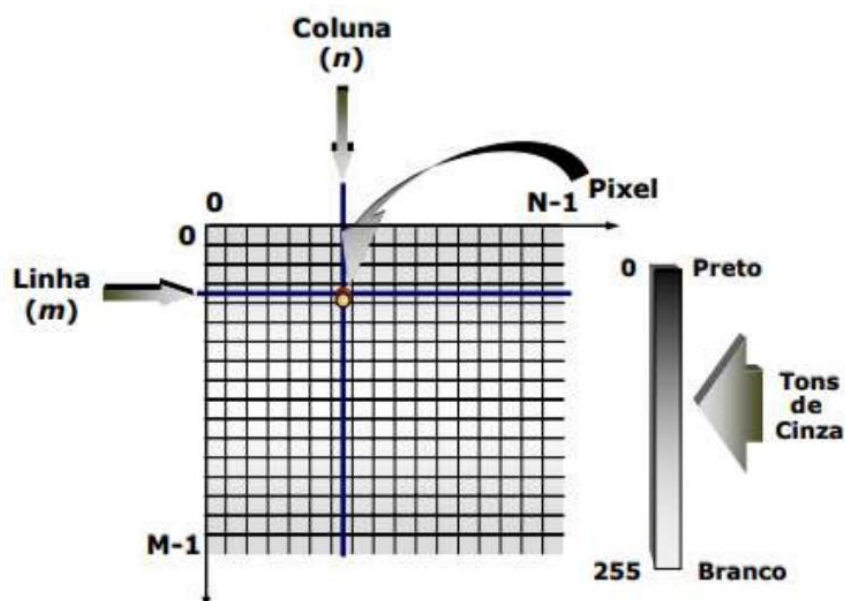
Figura 24 — Imagem digital formada por pixels quadrados. A região destacada foi ampliada em 17 vezes para mostrar as unidades formadoras da imagem. Cada pixel tem uma posição e uma intensidade de cor.



Fonte: SILVA (2015).

A Figura 25, apresenta a notação matricial utilizada para a localização de um pixel uma imagem. Neste caso o primeiro índice, m , caracteriza a posição da linha. Já o índice n , representa a posição da coluna. Destaca-se que o primeiro valor atribuído tanto para linha quanto para coluna é o zero. Assim o número de linhas e colunas irá variar, respectivamente, de zero até " $m - 1$ " e " $n - 1$ ". Em relação as tonalidades da imagem, para casos em que as cores variam entre os tons intermediários, denominados tons de cinza, situados no espectro entre preto e branco, a escala utiliza valores que estão situados entre 0, que representa o preto total, a 255 que representa o branco total (Dornellas, 2021; Silva, 2015).

Figura 25 — Representação matricial de uma imagem bidimensional e a escala de tonalidades variando entre o preto e o branco.

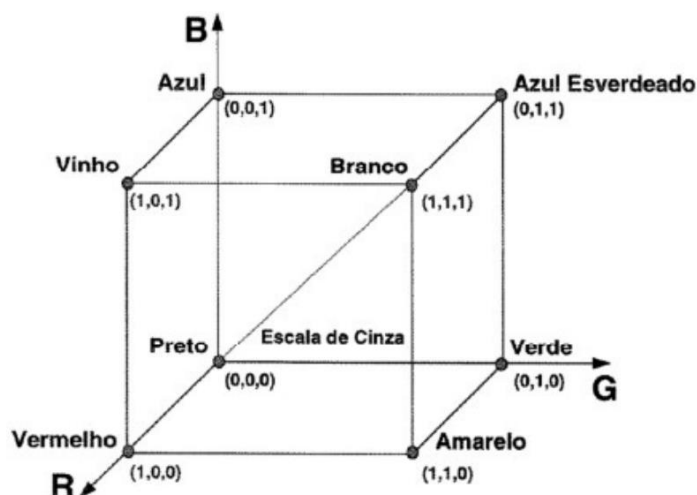


Fonte: DORNELLAS (2021).

Quando se opera com imagens binárias, ou seja, aquelas que utilizam apenas as cores preta e branca os valores atribuídos aos tons dos pixels utilizados variam em apenas dois: 0 (preto total) e 1 (branco). Imagens binárias são de grande importância para o PDI pois, o contraste entre as duas cores, permite que elas sejam facilmente manipuladas para se segmentar determinada característica de desejo do estudo e, além disso, ocupam pouco espaço na memória.

Para imagens coloridas utiliza-se o modelo de cubo de cores RGB (*Red – Green - Blue*). Neste modelo tridimensional cada aresta do cubo representa valores em tons de cinza sendo a origem (0,0,0) totalmente preta e o branco a aresta representada pela diagonal (1,1, 1). Neste caso a combinação intermediária dos tons vermelho, verde e azul geram a formação dos mais diferentes espectros de cores. A Figura 26 mostra o cubo de cores do sistema RGB convencional.

Figura 26 — Cubo de cores do sistema RGB (Red-Green-Blue).



Fonte: DORNELLAS (2021).

Alguns conceitos básicos devem ser entendidos por quem deseja realizar análises por PDI. Muitos desses conceitos são abstrações criadas pelo homem para associar as tonalidades dos espectros de cores em função das suas características. Assim, conceitos como brilho, contraste, profundidade, resolução além de ferramentas úteis para análises de dados como histogramas de tonalidades e luminância e técnicas de segmentação são de suma importância e devem ser bem compreendidos pelo operador.

Pode-se definir o brilho de uma imagem em função do seu espectro de tons de cinza, ou seja: uma imagem que possua tons próximos ao valor 0 (preto) é percebida como escura, enquanto, uma imagem com tons de cinza próximos a 255 é percebida pelo olho humano como clara.

Um outro conceito muito importante para PDI é o de contraste. Quanto maior a variação de tons de cinza dentro de uma imagem, maior o contraste, enquanto uma imagem com pequena variação dos tons de cinza é considerada como de baixo contraste. O parâmetro contraste é importante em termos de PDI, pois, quanto maior for esta característica maior a facilidade de distinguir objetos e, conseqüentemente, segmentar o que for de interesse para análise. Imagens com pouco contraste tornam difícil o processo de segmentação.

Associado ao contraste, tem-se o conceito de profundidade. De forma geral o olho humano consegue distinguir a profundidade de uma imagem em função da maior quantidade de tons de cinza, ou seja, do maior contraste da imagem. Assim, uma imagem com espectro de tons de cinza mais amplo consegue mostrar os diferentes planos no contexto que está inserida.

A resolução consiste na capacidade máxima de discriminação pelo olho humano de dois pontos na imagem digital. Quanto menor o tamanho dos pixels dentro de uma imagem, maior a quantidade de pixels essa imagem irá comportar. Logo, será possível fazer uma ampliação cada vez maior da imagem sem que se perca o foco da mesma. Em suma, quanto maior a quantidade de pixels for contida em uma imagem melhor a sua resolução (Oliveira, 2004).

A Figura 27, apresenta quatro imagens digitais, que exemplificam os conceitos de resolução e contraste. Observa-se que dentre as imagens, as que contém maior número de pixels, no caso 512 x 512 pixels, apresentam a melhor resolução. As imagens que comportam a maior quantidade de tons de cinza, no caso 256, possuem maior contraste e podem ser percebidas com uma maior profundidade. Ao analisar as quatro imagens contidas na figura, constata-se que a imagem do canto inferior direito, 512 x 512 pixels e 256 tons de cinza, apresenta melhor resolução e profundidade e, logo, é a que apresenta melhor qualidade.

Figura 27 — Imagens comparativas entre resolução e profundidade.



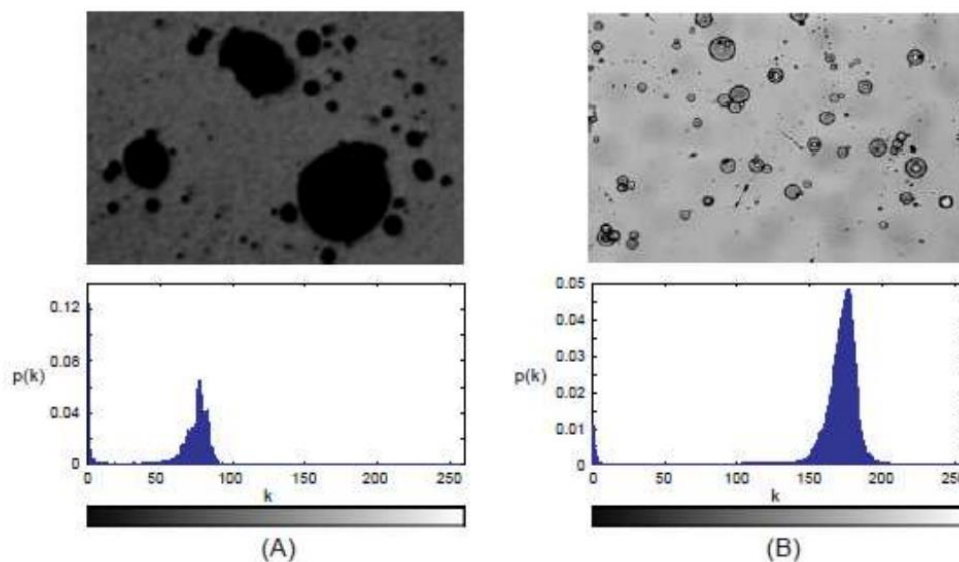
Fonte: OLIVEIRA (2004)

Uma ferramenta muito útil em PDI para a representação gráfica dos tons de cinza em uma imagem são os histogramas. Estes são gráficos que apresentam no eixo horizontal a escala de tons de cinza e no eixo vertical a probabilidade de ocorrência dos tons. Com esta ferramenta pode-se extrair informações estatísticas sobre contraste e a luminância de uma imagem (Silva, 2015).

A Figura 28 apresenta duas imagens e seus histogramas. Percebe-se, ao observar o eixo horizontal dos gráficos, que a imagem A possui baixo contraste pois os pixels estão em uma faixa de tonalidade com pouca variação. A imagem B possui uma maior variação do espectro de tonalidade de seus pixels, logo, o contraste é maior. No que tange ao conceito de luminância, observa-se, pelo eixo vertical, que a imagem A é mais escura pois a maior parte de ocorrência das tonalidades dos seus pixels encontra-se mais próxima do valor zero

(esquerda do gráfico), enquanto a imagem B possui luminância mais clara pois a maior parte de ocorrência das tonalidades dos seus pixels encontra-se a direita do gráfico (mais próximas ao valor de 255).

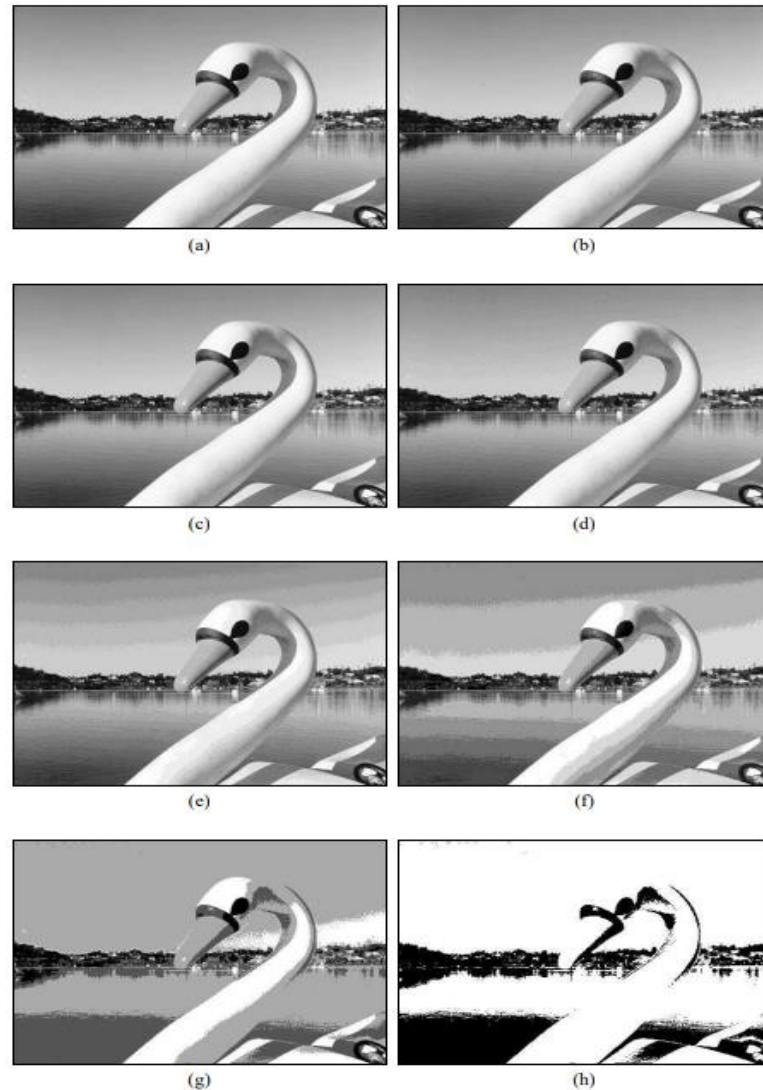
Figura 28 — Exemplos de histogramas de imagens.



Fonte: DORNELLAS (2021)

A Figura 29 demonstra os efeitos da redução do número de tons de cinza sobre a qualidade da imagem. Essa redução, do ponto de vista de um histograma, significa um estreitamento do gráfico e, logo, a diminuição do contraste e perda da profundidade. Na Figura 5a tem-se uma imagem de 442 x 299 pixels com 256 tons de cinza. As Figuras 5 b - h mostram diminuições na quantidade de tons de cinza, respectivamente 128, 64, 32, 16, 8, 4 e 2. Em termos de PDI, a diminuição do contraste da imagem representa um desafio para o operador do *software* pois, uma imagem com menor menor variação de tons de cinza dificulta o processo de segmentação (Filho, 1999).

Figura 29 — Efeito do número de níveis de cinza na qualidade de uma imagem 442 x 299 com 256, 128, 64, 32, 16, 8, 4 e 2 níveis de cinza, respectivamente.



Fonte: FILHO (1999).

4.2. PRINCIPAIS ETAPAS DO PDI

A Figura 30 apresenta as principais etapas para a técnica de análise e processamento digital de imagens com o intuito da extração de atributos e informações qualitativas e quantitativas e que serão abordadas na sequência.

Figura 30 — Etapas do PDI.



Fonte: AUTOR

A sequência padrão é uma generalização. É parte subjetiva do trabalho do operador do *software* de PDI e varia para cada caso. No entanto, em termos gerais segue-se uma lógica de pré processamento com o objetivo de corrigir possíveis imperfeições e ruídos, segmentação com o intuito de destacar os objetos que se queira analisar e a etapa de medições e coletas de dados. Os dados coletados são utilizados para análise dos parâmetros que se queira avaliar (Gomes, 2001).

4.2.1. AQUISIÇÃO E DIGITALIZAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL

O objetivo etapa de aquisição de imagens é converter uma situação real em três dimensões para imagem eletrônica em duas dimensões. A qualidade da imagem gerada é parte primordial para uma análise fiel dos dados adquiridos. Imagens

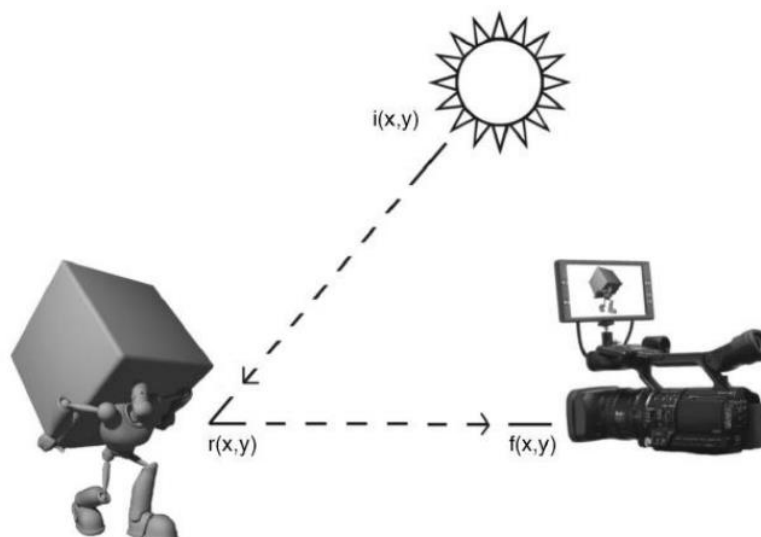
de má qualidade irão exigir mais etapas de pré-processamento e necessidade de edições o que pode gerar a sua descaracterização e comprometer a análise a ser realizada. (Gonzalez, 2000).

Silva (2015) destaca os três elementos básicos necessários para a aquisição digital de imagens:

- um instrumento formador de imagens;
- um dispositivo físico sensível à faixa de frequência de interesse do espectro eletromagnético;
- um digitalizador para converter o sinal elétrico analógico do sensor em um sinal digital.

A Figura 31 mostra esquematicamente a sequência de elementos necessária para a aquisição de imagem digital.

Figura 31 — Esquema de aquisição de imagem.



Fonte: SILVA (2015)

As imagens são representadas nos computadores na forma de arquivos gráficos. Dentre os formatos de dados gráficos podem ser citados: jpeg, jpg, tiff e mpeg. Em geral os softwares de PDI permitem que se trabalhe com variados tipos de armazenamentos de formatos de armazenando de dados.

4.2.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

A etapa de pré-processamento de imagens visa sobretudo corrigir defeitos e ruídos provenientes do processo de obtenção das mesmas. Além disso, pode-se realçar regiões de interesse para facilitar a posterior segmentação a fim de se facilitar a obtenção dos dados quantitativos que se deseja. Um bom trabalho realizado nesta etapa é de fundamental importância para prosseguir com a seleção correta e assegurar a precisão nos resultados encontrados (Rodrigues 2017; Silva, 2015).

Os programas de PDI possuem inúmeras ferramentas para o etapa de pré-processamento. Trata-se de um trabalho subjetivo e cada operador deve avaliar a sua imagem e realizar os procedimentos de modo a realçar características em busca de facilitar a obtenção dos dados requeridos. Alguns procedimentos rotineiramente utilizados são: manipulação do brilho, aumento do contraste, ajustes na iluminação, controle de possíveis ruídos e realce de bordas. Após a etapa de pré-processamento, a próximo passo é a etapa conhecida como segmentação (Rodrigues, 2017).

4.2.3. SEGMENTAÇÃO

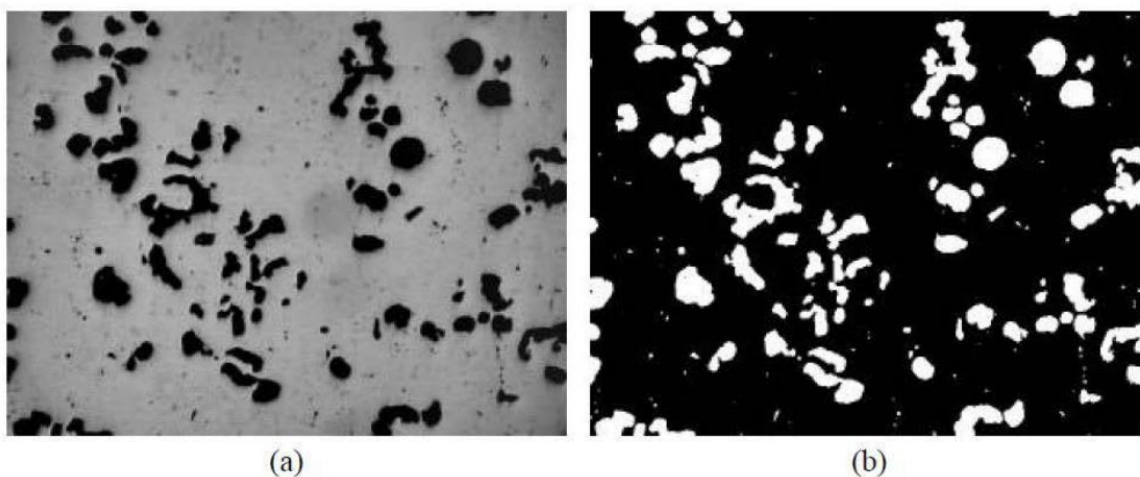
Esta pode ser considerada a etapa mais importante de todo o processo. Tem por objetivo destacar da imagem o que se busca analisar. Para isso distingue-se os objetos de interesse de uma imagem em função de alguma característica específica. Por exemplo, em uma imagem em que estejam identificados poros circulares, pode-se segmentar esses poros através da identificação de determinado grau de circularidade. Assim o software irá destacar todos os objetos com a circularidade definida e o restante da imagem ficará sendo

considerado como o “fundo” e não será contabilizados no momento de se extrair dados específicos (Gonzalez, 2000).

Uma segmentação mal efetuada pode levar a dados distorcidos como, por exemplo, a contabilização objetos que não eram de interesse para o que se queria analisar o que, por consequência, resultaria em conclusões erradas. Vale aqui destacar que, assim como na etapa de pré-processamento, o processo de segmentação também é subjetivo e cabe ao operador do software avaliar quais dados deseja extrair. Não há como ditar um passo a passo, pois, cada imagem requer uma segmentação diferente.

A Figura 32 mostra um exemplo bem simples de segmentação. Uma imagem que inicialmente está na escala de cinzas (Figura 32a) é segmentada para uma escala binária (Figura 32b). Desse modo separa-se os objetos de interesse em branco e o fundo em tom escuro (Silva, 2015).

Figura 32 — Exemplo de segmentação: (a) imagem em 256 tons de cinza; (b) imagem binária, já segmentada, isto é, com objetos de interesse brancos e fundo preto.



Fonte: SILVA (2015).

Os obstáculos que mais dificultam a segmentação consistem no fato de que nem sempre as regiões a serem segmentadas são regulares. Muitas vezes devem ser feitos ajustes que considerem as exatas fronteiras do que se quer medir, além da eliminação de manchas e borrões na imagem. (Melo, 2005).

4.2.4. PÓS-PROCESSAMENTO

Na etapa pós-processamento busca-se corrigir defeitos remanescentes do processo de segmentação. Um exemplo que pode ser mencionado é a de separação de imagens e objetos que se tocam. Dessa forma, por exemplo, no caso da medição de poros em uma figura, se dois poros se tocam, cabe ao operador utilizar ferramentas de modo a definir claramente as fronteiras indicando e distinguindo os limites de cada deles. Essa definição dos limites faz com que, por exemplo, o *software* não contabilize dois poros como sendo apenas um. Uma contabilização de objetos indesejados pode gerar conclusões erradas (Mello, 2005; Dornellas, 2021).

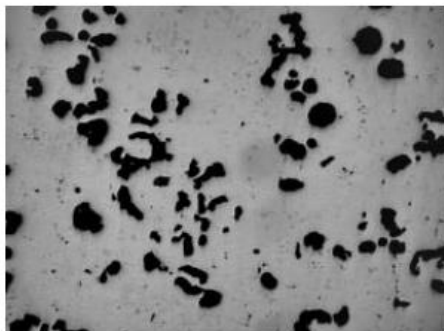
4.2.5. EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

Finalmente, nesta etapa, se contabiliza e quantifica os objetos de interesse que foram segmentados na imagem anteriormente. Podem ser medidos atributos como quantidade, forma, espessura, circularidade e área.

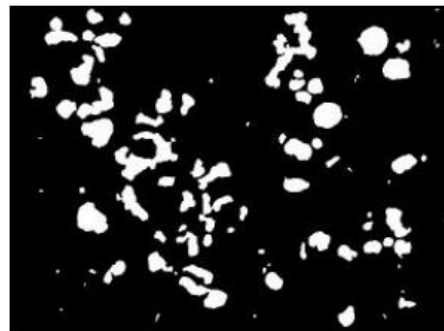
É importante destacar o primeiro passo para a medição de áreas e espessuras é definir uma escala de medida apropriada para o *software*. Existem diversas formas de se definir essa escala. Para imagens obtidas por MEV, por exemplo, em que no geral apresentam indicadas as escalas de medidas, o operador poderá traçar um segmento de reta paralelo a barra escala da figura. Por comparação o *software* irá verificar quantos pixels correspondem ao valor informado na barra de escalas e assim estará calibrado a escala de medidas do a ser utilizada *software*.

A Figura 33 apresenta um exemplo de aplicação de PDI para a contagem de objetos e determinação da área dos objetos. Na imagem (Figura 33a) em tons de cinza é segmentada em preto e branco (Figura 33b). Assim, as regiões claras são contabilizadas em termos da sua quantidade e área por cada partícula (Figura 33c) e a distribuição das suas áreas é separada estatisticamente por faixas de áreas graficamente (Figura 33d).

Figura 33 — Um exemplo de problema de PDI: (a) imagem original; (b) imagem das partículas de grafita (regiões); (c) área de cada partícula; e (d) distribuição das áreas.



(a)

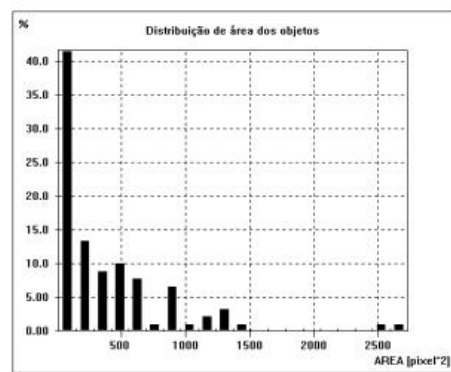


(b)

No. de partículas: 89	
Partícula	Área (pixel ²)
1	13
2	337
3	214
4	218
5	13
6	938
7	572
8	18

87	15
88	35
89	465

(c)



(d)

Fonte: GOMES (2001).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da análise foram utilizadas amostras obtidas de uma chapa de aço do tipo IF que sofreu o processo de galvanização a quente. A chapa foi doada pela empresa na qual o processo de galvanização foi realizado. Este processo foi do tipo GI e ocorreu com tempo médio de imersão da chapa de aço no banho zinco de 2,40 s e velocidade média de 1,7 m/s. A composição química do banho de zinco inclui um percentual entre 0,2% e 0,3% de alumínio. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço que foi galvanizado e que foi o alvo da análise realizada por essa pesquisa trabalho e conforme informações fornecidas pela empresa parceira desta pesquisa.

Tabela 2 — Composição química do aço tipo IF utilizado para as análises.

% C	% Mn	%P	% S	% Si	% Cu	% Ni	% Cr
0,0019	0,3400	0,0380	0,0060	0,0000	0,0100	0,0100	0,0100
% Mo	% V	%Sn	%Al	%Ti	%B	%N	% Nb
0,0010	0,0010	0,0010	0,0340	0,0020	0,0009	0,0037	0,0130

Fonte: EMPRESA PARCEIRA DOADORA DA CHAPA.

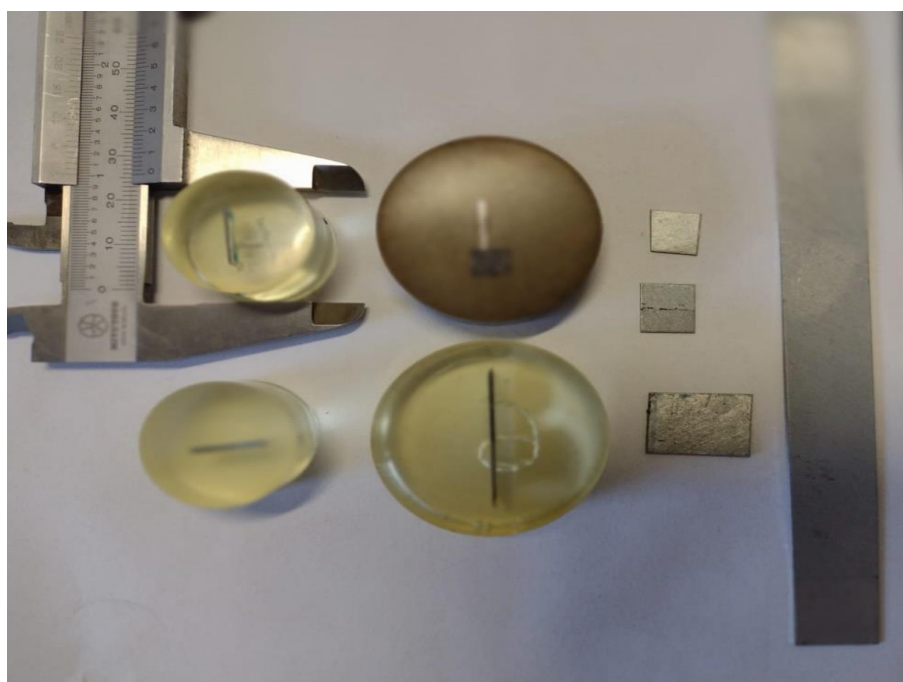
Diversas amostras do aço IF foram cortadas, embutidas em baquelite (do tipo condutora e não condutora) e preparadas metalograficamente. As etapas de preparação metalográfica antecede o ensaio metalográfico. O ensaio tem por objetivo compreender em que aspectos a estrutura do material está relacionada com suas propriedades mecânicas. Com o intuito de facilitar o manuseio das amostras e evitar que rasguem a lixa ou o pano de polimento, elas devem ser embutidas em baquelite. A baquelite deve circundar o material a ser analisado de modo a formarem um corpo único (Rohde, 2010; Colpaert, 2008).

A preparação metalográfica consistiu em lixamento manual com uma sequência de lixas de numeração 220, 400, 600, 800 e 1200 *Mesh*. Com a etapa de lixamento concluída, seguiu-se para o polimento com pasta de diamante com as

granulometrias 6, 3 e 1 μm . De acordo com Colpaert (2008) e Rhode (2010) o lixamento, que pode ser automático ou manual, tem por objetivo a eliminação de riscos e marcas mais profundas de modo a gerar um acabamento superficial mais “grosseiro”. Este acabamento realizado por lixas é refinado, posteriormente com a etapa do polimento. Com isso obtém-se um acabamento superficial polido e livre de marcas.

A Figura 34 apresenta amostras do aço em estudo: chapas cortadas e amostras embutidas e já preparadas metalograficamente. Todo esse processo de preparação das amostras foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Figura 34 — Amostras de aço IF. Amostras cortadas e amostras embutidas já preparadas metalograficamente.

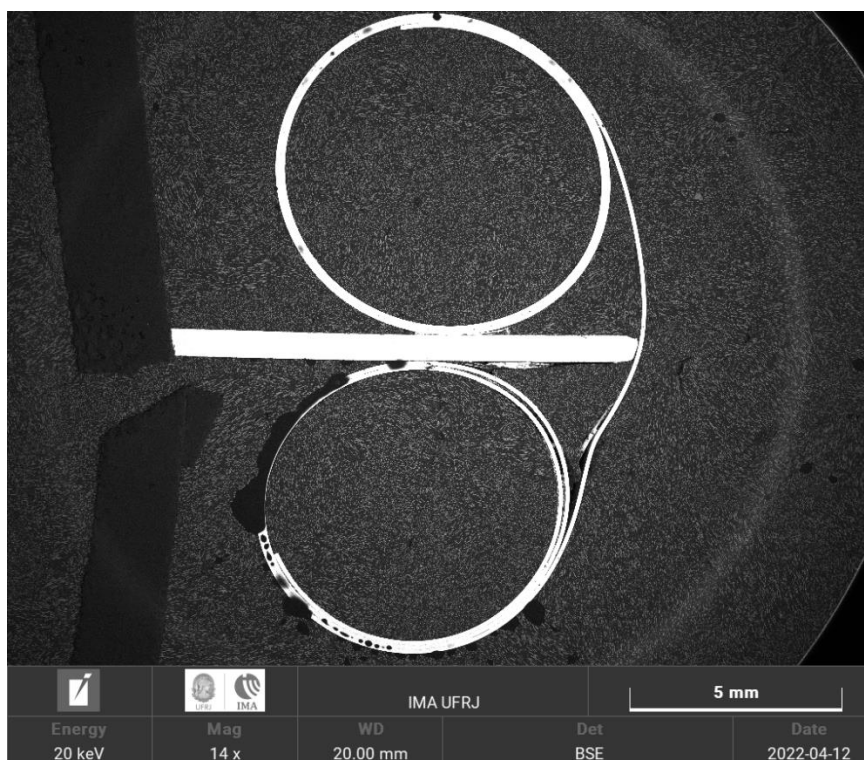


Fonte: AUTOR.

Após a etapa de preparação metalográfica, as amostras foram encaminhadas para a obtenção de imagens e microanálise química. Essas etapas ocorreram no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O equipamento utilizado foi o modelo Mira 4^a geração LMU (LowVac Mode UniVac de 1 – 700Pa) da Tescan equipado com canhão

FEG Schottky (*Field Emission Scanning Eletron Microscope*). Ele possui como acessório um detector de Espectroscopia por Energia Dispersiva (*Energy Dispersive Spectroscopy - EDS*) com janela de Si_3N_4 de 30 mm^2 e resolução menor que 129 eV para a linha de emissão do $\text{MnK}\alpha$. Detector de elétrons secundários (SE) Everhart-Thornley e detector de elétrons retorespalhados retrátil (R-BSE). Os três detectores detectam os sinais através de um cristal YAG (granada de alumínio ítrio). A Figura 35 apresenta uma imagem em escala macro obtida através de MEV para a seção transversal de uma das amostras embutida e preparada metalograficamente.

Figura 35 — Imagem macro obtida por MEV de uma amostra embutida e preparada metalograficamente.



Fonte: AUTOR.

Com as imagens obtidas pelo MEV e um mapeamento de cores falsas mostrando os elementos químicos na camada zincada (microanálise química realizada por EDS) foram realizadas análises quantitativas do material obtido utilizando técnicas de processamento digital de imagens (PDI). Esta etapa foi realizada

com o programa Fiji (*It's Just Image J*) versão 1.53C, disponível gratuitamente no endereço eletrônico (Site imagej.net, data da consulta 15 de junho de 2022).

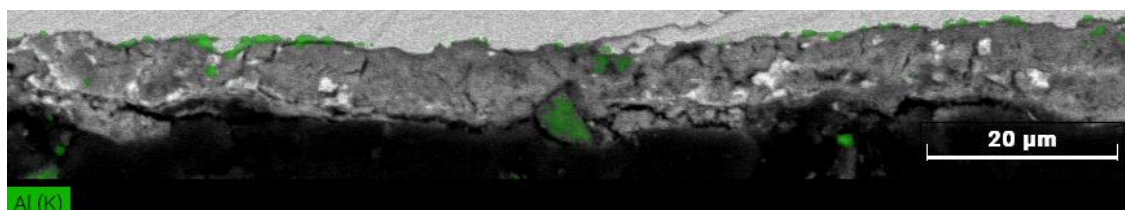
Para a etapa de PDI foram utilizadas as imagens em que constam os resultados de mapeamento com cores falsas atribuídas aos elementos químicos presentes e detectados por EDS. Nesta etapa foram identificadas as presenças de regiões contendo *Zn* e outros. Foram quantificadas nas imagens as frações volumétricas (*Vv*) ou as áreas percentuais ocupadas (*Aa*) com presença de *Al*, isto é, com a presença de fase Fe_2Al_5 . Além das frações presentes contendo *Al* foi também obtida a espessura média da camada inibidora e da camada de zinco do material estudado.

A seguir será apresentado um exemplo de como foi realizada a rotina de utilização do *software* FIJI para apenas uma das imagens com mapeamento de EDS. Vale aqui ressaltar que cada imagem possui sua particularidade e, portanto, este exemplo apresenta de um modo geral como a rotina de PDI foi utilizada neste trabalho.

Rotina utilizando uma imagem como exemplo:

Inicialmente seleciona-se uma imagem em que conste o mapeamento utilizando cores falsas obtido por EDS em que esteja sendo mostrado a localização das fases objeto de estudo, que, neste exemplo são as regiões que apresentam fases contendo alumínio. Na Figura 36 observa-se que as regiões foram mapeadas em verde.

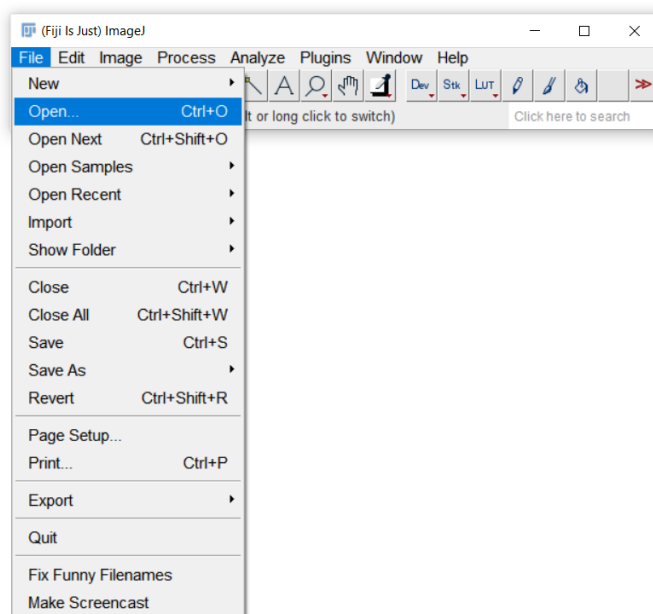
Figura 36 — Imagem exemplo analisada por EDS. A fase contendo alumínio em destaque na cor verde.



Fonte: AUTOR.

A imagem é aberta no programa FIJI. Para isto utiliza-se os comandos “File” e em seguida “Open”, como está representado na Figura 37.

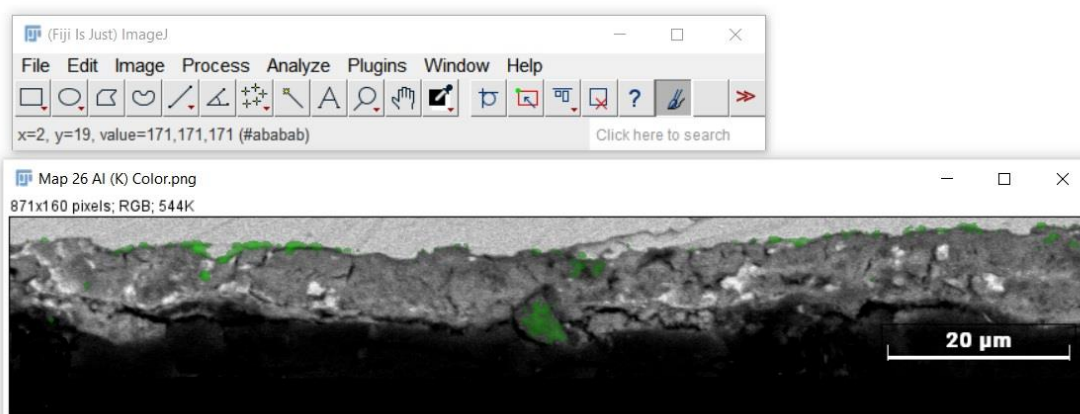
Figura 37 — Abertura da imagem no programa FIJI.



Fonte: AUTOR.

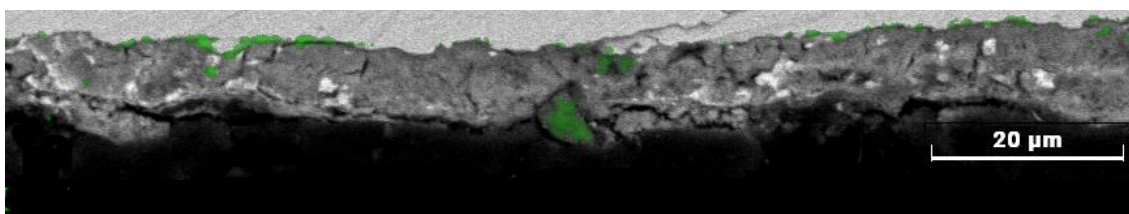
A fim de que o programa não confunda durante a análise a legenda que está na cor verde (escrito no canto inferior esquerdo da Figura 36) e partículas contendo alumínio que estão visivelmente na região da baquelite e não são de interesse para o estudo deste trabalho, a imagem foi editada utilizando a função “*Overlay Brush Tool*”, do programa FIJI. Esta ferramenta permitiu que as regiões que não são de interesse no estudo e estão em verde fossem pintadas de na cor preta. Pintar as regiões que não são de interesse possibilitou computar as fases contendo alumínio e manter o tamanho original da imagem. A Figura 38 mostra o processo de edição sendo realizado no programa FIJI e a Figura 39 mostra a imagem final, já editada.

Figura 38 — Imagem sendo editada pelo FIJI utilizando a função "Overlay Brush Tools".



Fonte: AUTOR.

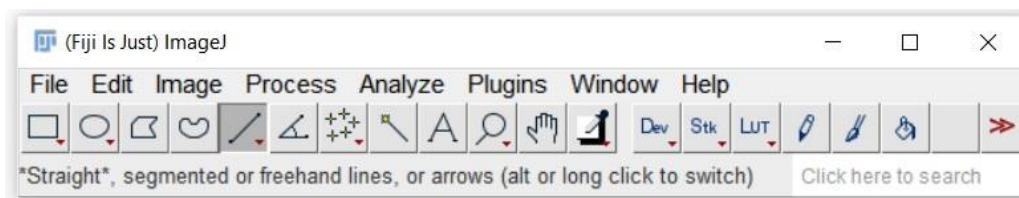
Figura 39 — Resultado da edição da imagem pelo software FIJI.



Fonte: AUTOR.

Para se obter a medida da camada inibidora faz-se necessário realizar uma calibração do programa FIJI. Como referência para esta calibração utiliza-se a escala presente na imagem (barra no canto inferior direito da imagem, correspondente a 20 μm) e a função segmento de reta que é obtida como está em destaque na Figura 40.

Figura 40 — Representação da função segmento de reta.

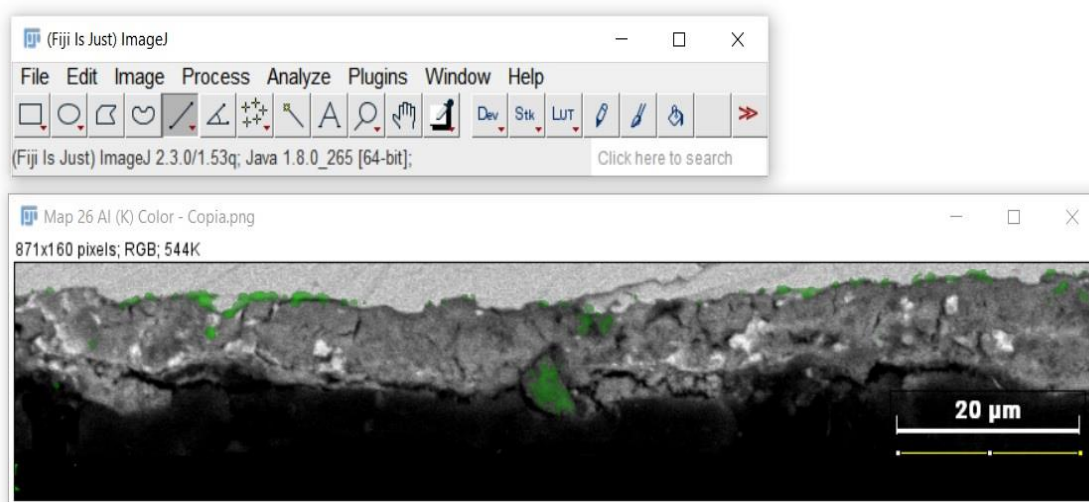


Fonte: AUTOR.

Com a função selecionada, cria-se um segmento de reta paralelo a escala da imagem como pode ser visto na Figura 41. O objetivo desta etapa é criar uma associação entre a escala determinada pelo MEV e o número de pixels

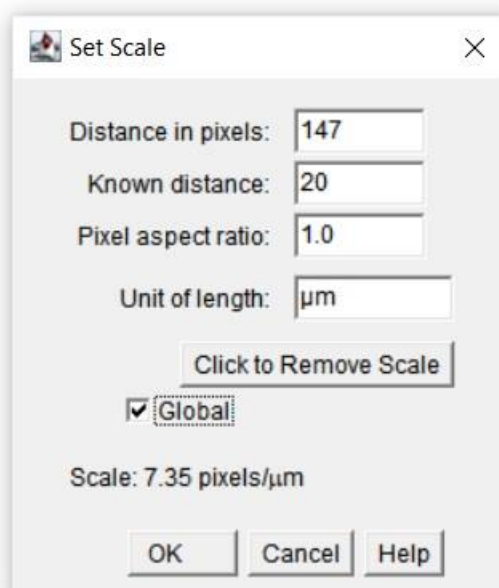
correspondente ao tamanho do segmento de reta. Para isso, com a reta traçada utiliza-se a função “*Set Scale*” que está dentro da função “*Analyze*” do programa. Nesta etapa o programa irá informar, em pixels, o tamanho do segmento de reta. Cabe ao operador do programa, então, informar qual o tamanho referência (no caso 20 μm). A Figura 42 mostra a função “*Set Scale*”. Neste caso, aqui exemplificado, o programa associou a distância de 147 pixels a 20 μm .

Figura 41 — Segmento de reta traçado em paralelo a barra de escala.



Fonte: AUTOR.

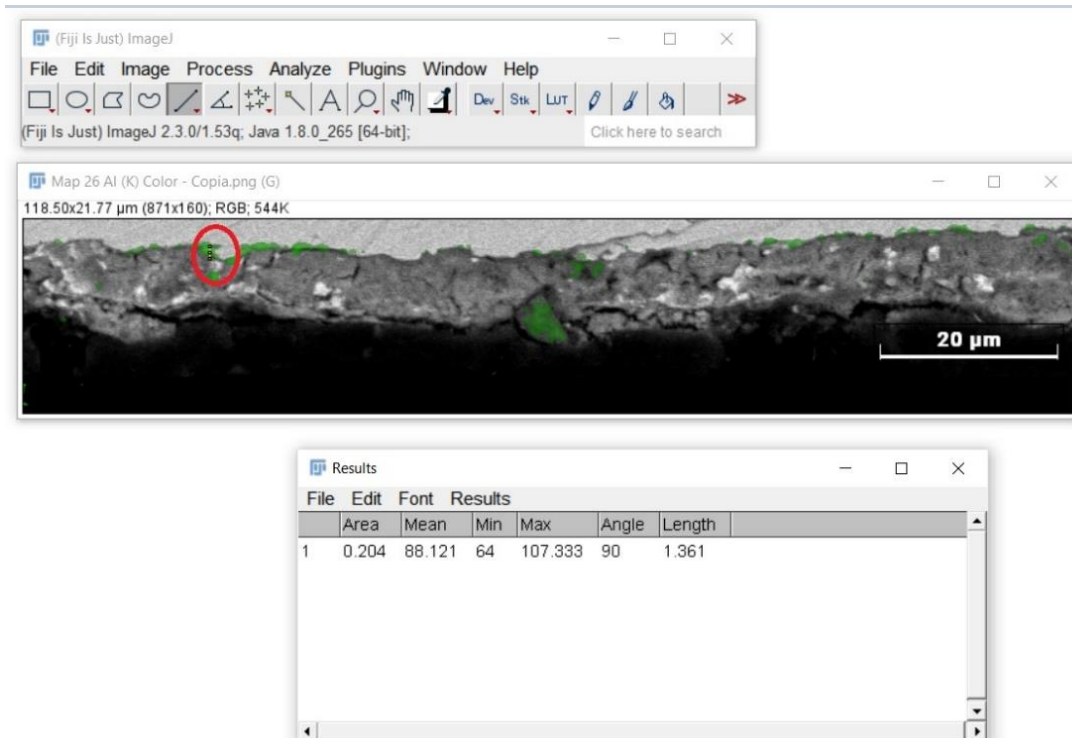
Figura 42 — Função *Set Scale* a fim de calibrar o FIJI.



Fonte: AUTOR.

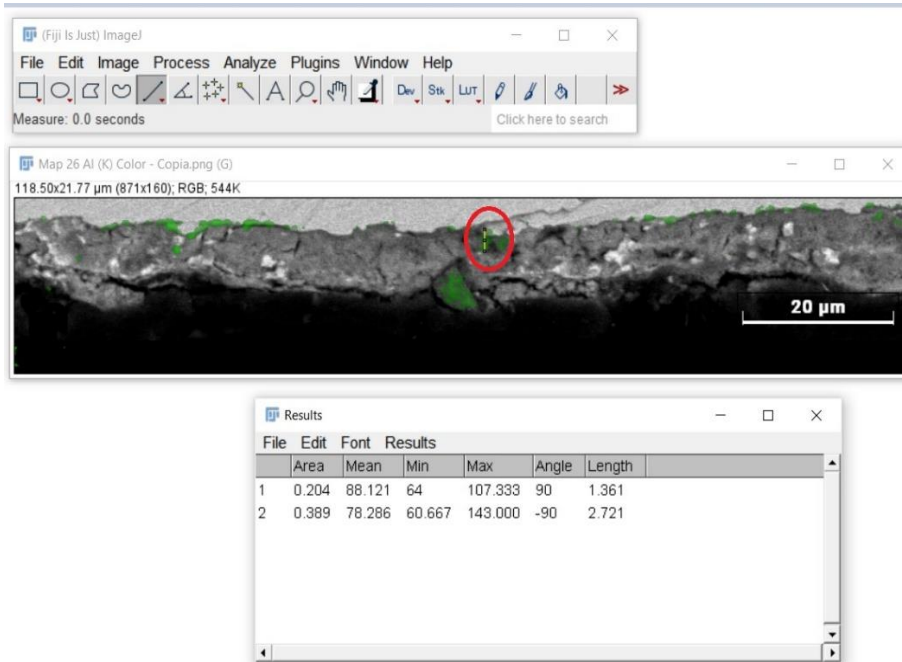
Feita a calibração do programa, pode-se medir as espessuras a serem analisadas. As Figuras 43, 44 e 45 exemplificam três medidas em diferentes locais da camada inibidora. Nestas imagens, a fim de facilitar a visualização das medidas (considerando que são muito pequenas), foi feito um círculo em vermelho no local de cada medida.

Figura 43 — Exemplo de medida da espessura da camada inibidora.



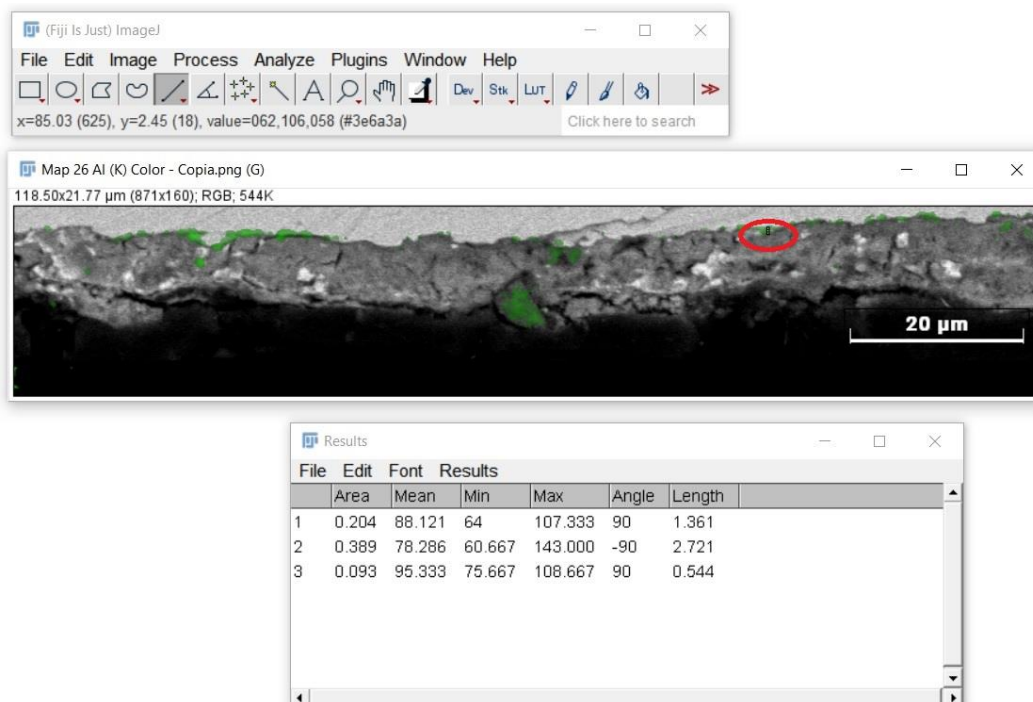
Fonte: AUTOR.

Figura 44 — Exemplo de medida da espessura da camada inibidora.



Fonte: AUTOR.

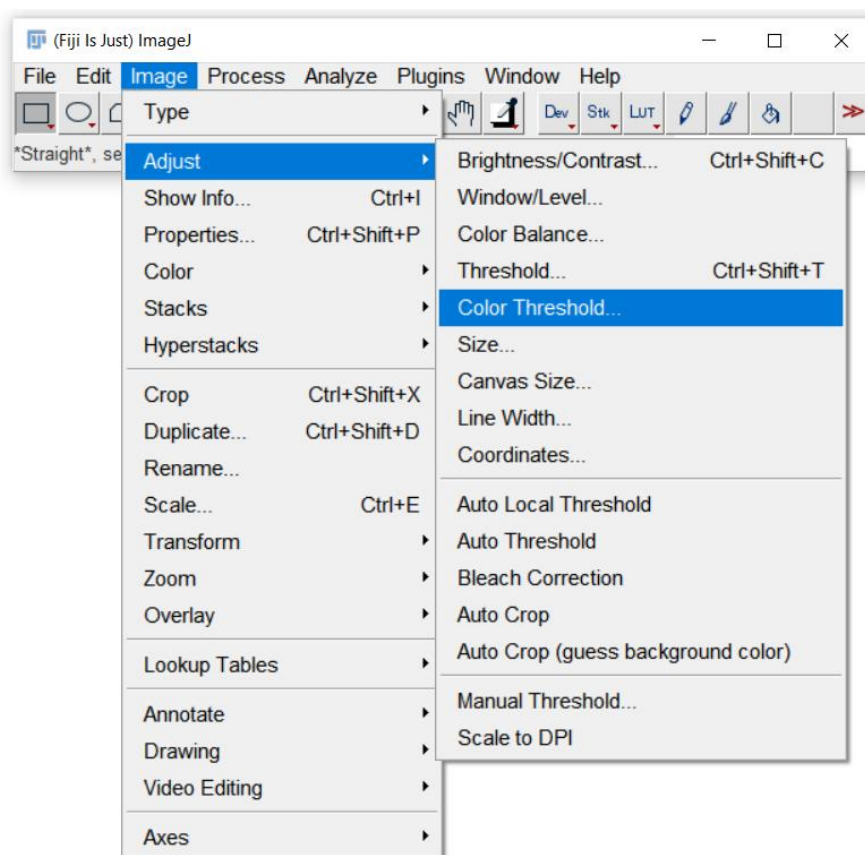
Figura 45 — Exemplo de medida da espessura da camada inibidora.



Fonte: AUTOR.

Após a etapa de medições da espessura da camada inibidora foram realizadas as etapas necessárias para a segmentação da região de interesse, isto é, a camada inibidora, utilizando a função “*Color Threshold*”. Para isso foram utilizadas as funções na sequência “*Image*”, “*Adjust*” e “*Color Threshold*”. Esta função tem por objetivo segmentar (separar) as partes coloridas apenas na região zincada na imagem (neste caso na cor verde) para que se possa obter os dados de interesse nessa imagem segmentada. A abertura da função está representada na Figura 46:

Figura 46 — Abertura da função “*Color Threshold*”.

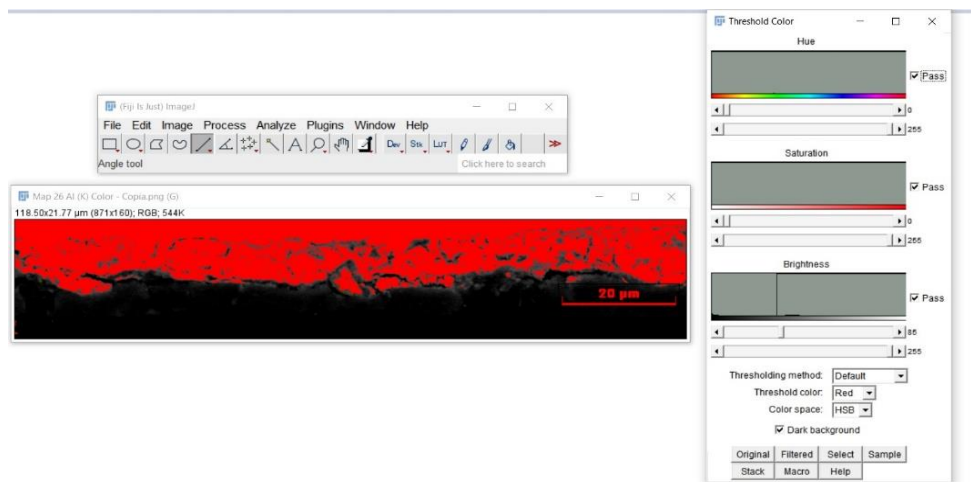


Fonte: AUTOR.

Ao abrir a função, o programa nos mostra alguns atributos que podem ser alterados e uma segmentação prévia da imagem (Figura 47). Cabe ao operador do FIJI alterar os parâmetros necessários de modo que apenas a região de interesse seja segmentada. Vale destacar que esses parâmetros podem variar para cada imagem uma análise deve ser realizada. A Figura 48 mostra a imagem

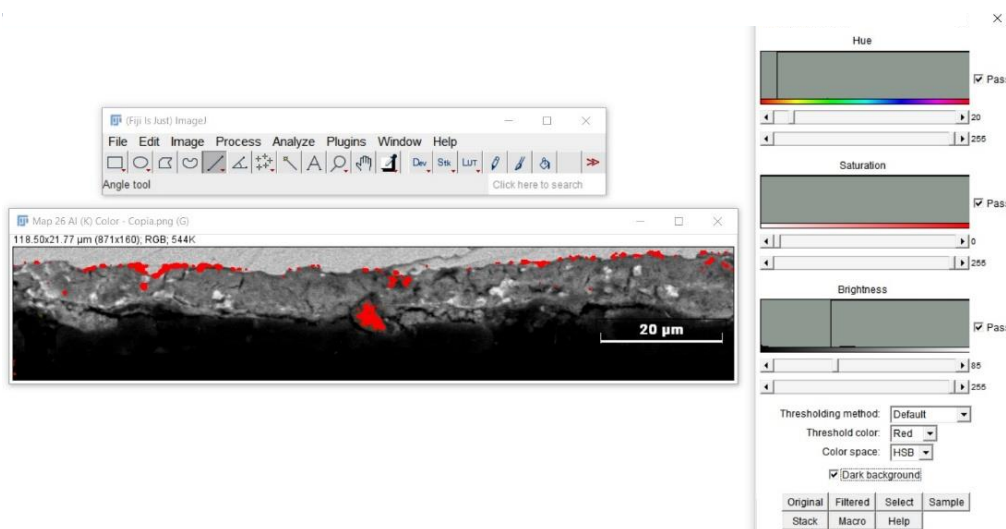
exemplo com os parâmetros requeridos alterados de modo a segmentar apenas as regiões de interesse.

Figura 47 — Parâmetros da função "Color Treshold".



Fonte: AUTOR.

Figura 48 — Segmentação realizada de modo a selecionar apenas as regiões de interesse.

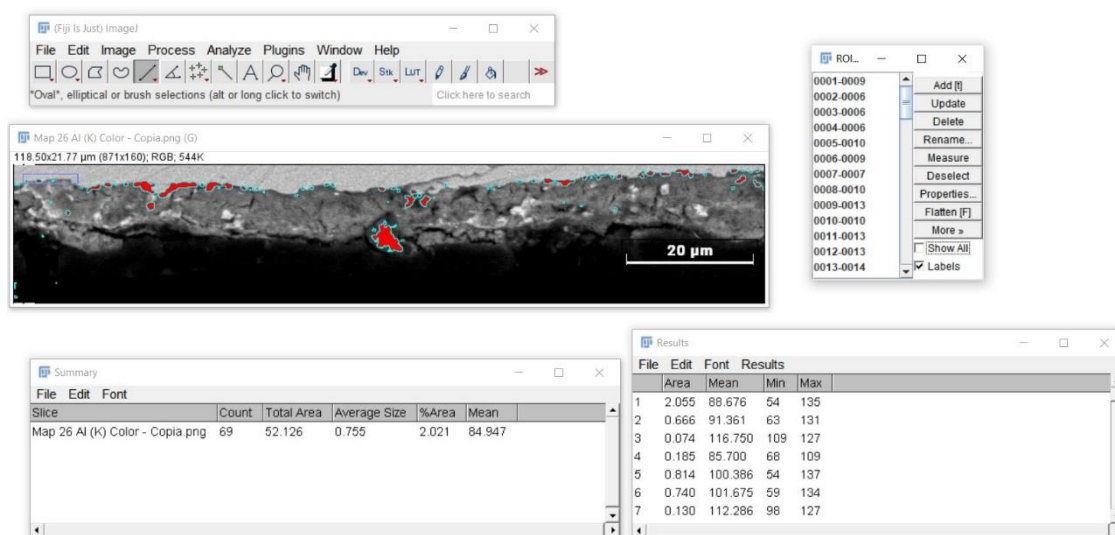


Fonte: AUTOR.

Por fim, com a segmentação realizada utiliza-se a função "Analyze Particles". Esta função permite determinar diversos parâmetros do que foi segmentado na imagem, tais como: o total de partículas (ou fases), o tamanho médio e a porcentagem da área de interesse. Neste trabalho foram coletadas as

informações referentes quantificação da fração volumétrica de fases contendo alumínio presentes nas imagens. O *software* faz uma análise de todas as “partículas” ou regiões de interesse individualmente (quadros “*Results*” e “*RoI*”) e também apresenta um quadro resumo (“*Summary*”) em que apresenta uma média do que foi calculado. A Figura 49 apresenta os resultados do que foi segmentado neste roteiro exemplo. Nesta imagem estão inclusos a imagem que sofreu a segmentação colorida, o display de funcionalidades do programa e os quadros apresentando “*RoI*”, “*Results*”, “*Summary*”, mostrando os resultados da análise.

Figura 49 — Análise dos parâmetros da região de interesse.

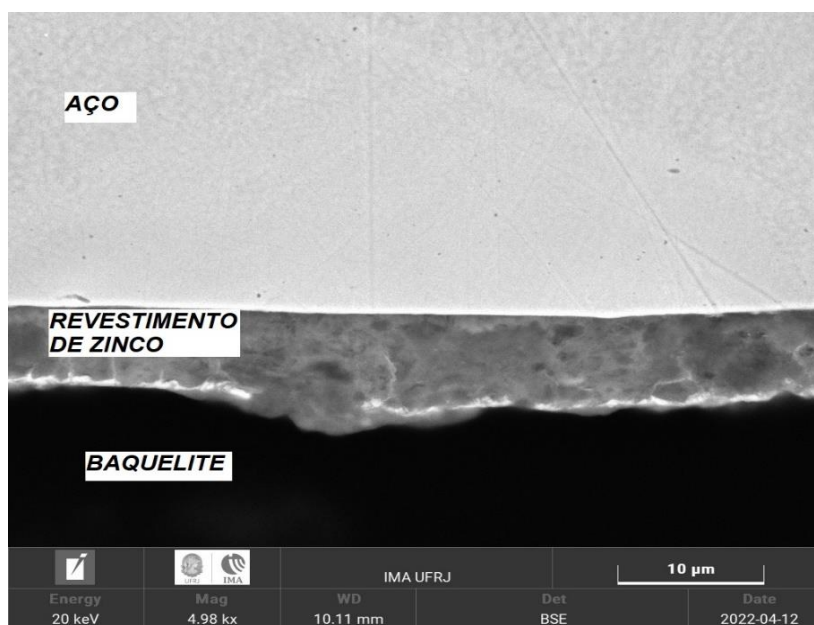


Fonte: AUTOR.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 50 apresenta uma imagem de seção transversal obtida por MEV da amostra de aço galvanizado utilizado neste estudo. É possível distinguir com clareza o aço, a região do revestimento de zinco e a região da baquelite.

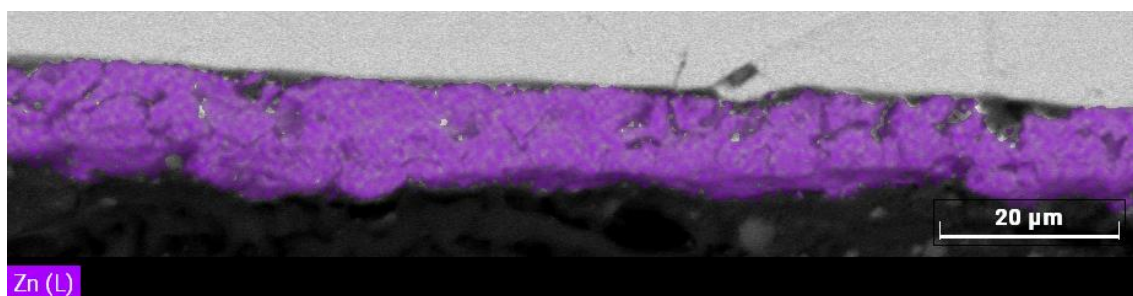
Figura 50 — Imagem obtida por MEV da seção transversal do aço galvanizado.



Fonte: AUTOR

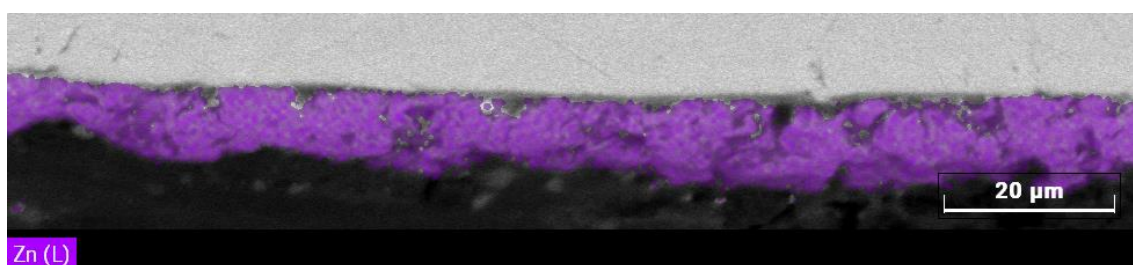
Como resultados das análises por EDS do material objeto do estudo foram obtidas imagens com um mapeamento por cores falsas e que realçavam as regiões de interesse, isto é, a camada zincada sobre o substrato de aço e as regiões que nela apresentavam regiões ricas em alumínio (fase composta por Fe_2Al_5). As Figuras 51, 52 e 53 mostram exemplos deste mapeamento em que o elemento químico zinco foi identificado na cor roxa (camada zincada) em diferentes locais da superfície do substrato.

Figura 51 — Mapeamento por cores falsas feito pelo EDS. Região com elemento zinco identificado na cor roxa.



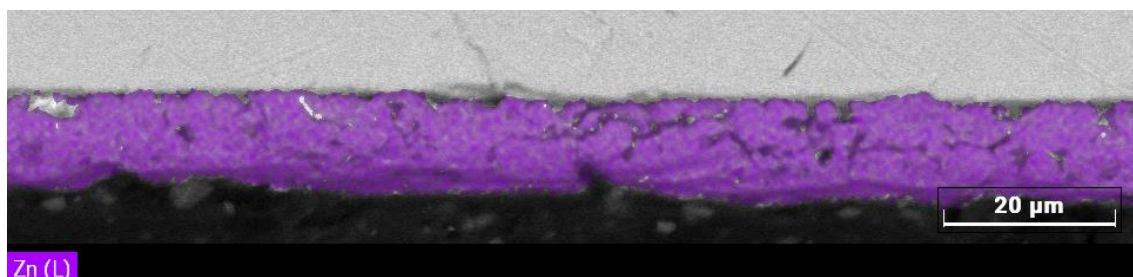
Fonte: AUTOR.

Figura 52 — Mapeamento por cores falsas feito pelo EDS. Região com elemento zinco identificado na cor roxa.



Fonte: AUTOR.

Figura 53 — Mapeamento por cores falsas feito pelo EDS. Região com elemento zinco identificado na cor roxa.



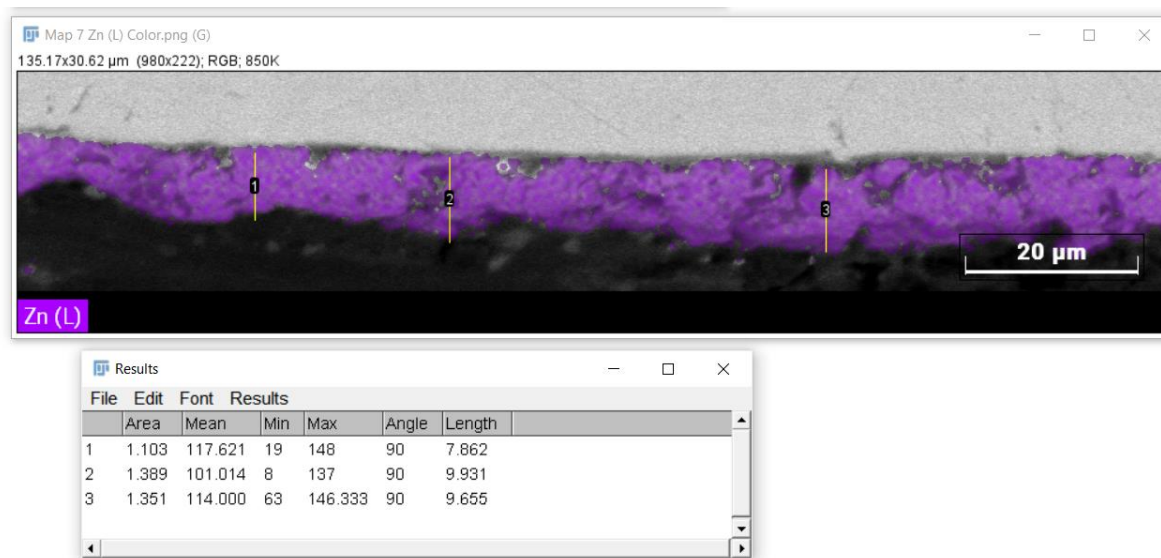
Fonte: AUTOR.

As imagens indicam uma camada contínua e íntegra contendo essencialmente elementos de zinco sobre a chapa de aço. Este resultado era o esperado e requerido: uma camada protetora do substrato e gera indícios de que o tempo e a velocidade de galvanização utilizadas no processo foram adequadas.

Dezessete imagens contendo mapeamento por cores falsas da camada de zinco foram consideradas para a realização, em cada uma delas, de três medições de espessura em pontos diferentes da camada zincada. A Figura 54 exemplifica

uma imagem com três medições realizadas através do software FIJI. Na imagem observamos que as medidas 1, 2 e 3 tiveram respectivamente as seguintes espessuras: 7,862 μm ; 9,931 μm e 9,655 μm .

Figura 54 — Três medições de espessura realizada em uma das imagens que identifica a camada de zinco através do mapeamento por cor falsa.



Fonte: AUTOR.

O Anexo 1 deste trabalho apresenta todas as imagens mostrando os locais da camada zincada em que as medições foram realizadas. A Tabela 3 apresenta todas as medições de espessura realizadas.

Tabela 3 — Medidas de espessura de camada zincada.

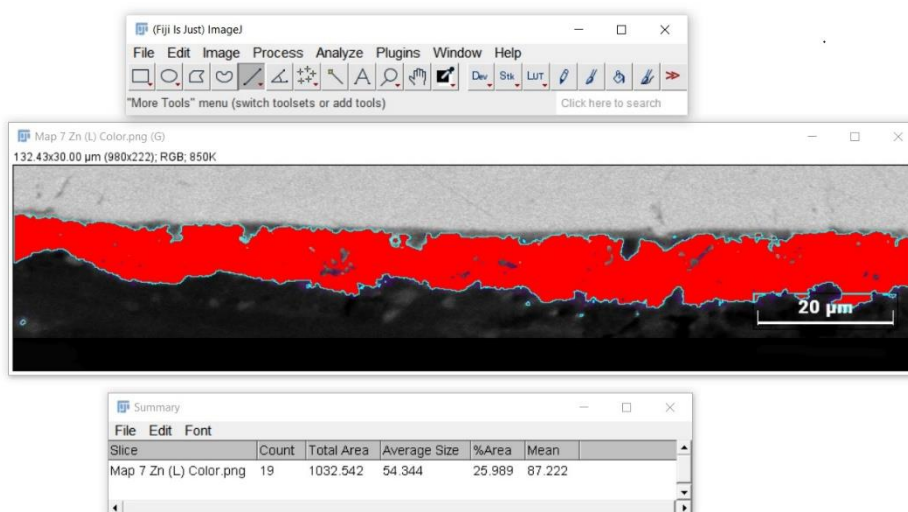
Mapeamento	Espessura 1 (μm)	Espessura 2 (μm)	Espessura 3 (μm)
Mapeamento 1	7,862	9,931	9,655
Mapeamento 2	12,138	10,759	9,103
Mapeamento 3	10,345	11,034	12,276
Mapeamento 4	7,724	8,414	12,276
Mapeamento 5	8,828	8,690	9,517
Mapeamento 6	6,759	9,379	7,172
Mapeamento 7	12,690	10,345	11,310
Mapeamento 8	14,267	12,983	13,733
Mapeamento 9	8,889	4,772	4,772
Mapeamento 10	10,309	9,485	8,660
Mapeamento 11	11,096	11,096	10,411
Mapeamento 12	9,589	8,082	8,630
Mapeamento 13	8,356	10,548	8,219
Mapeamento 14	10,959	8,082	7,671
Mapeamento 15	10,882	7,260	6,849
Mapeamento 16	8,767	6,849	7,123
Mapeamento 17	9,178	5,753	6,438

Fonte: AUTOR.

A média de espessura para a camada zincada foi de $9,331 \pm 2,15 \mu\text{m}$. Segundo Manhabosco (2017) para chapas de aço que recebem o tratamento de galvanização tipo GI a camada zincada varia entre $5 \mu\text{m}$ e $20 \mu\text{m}$.

Uma segunda metodologia foi utilizada para estimar a espessura da camada zincada. Para este método foi realizada, primeiramente, a segmentação colorida de todo o revestimento de zinco e calculada a sua área. A Figura 55 mostra um exemplo em que uma imagem teve a região zincada segmentada e a sua área calculada. Observa-se que a área total da camada zincada calculada nessa figura é de $1032.542 \mu\text{m}^2$.

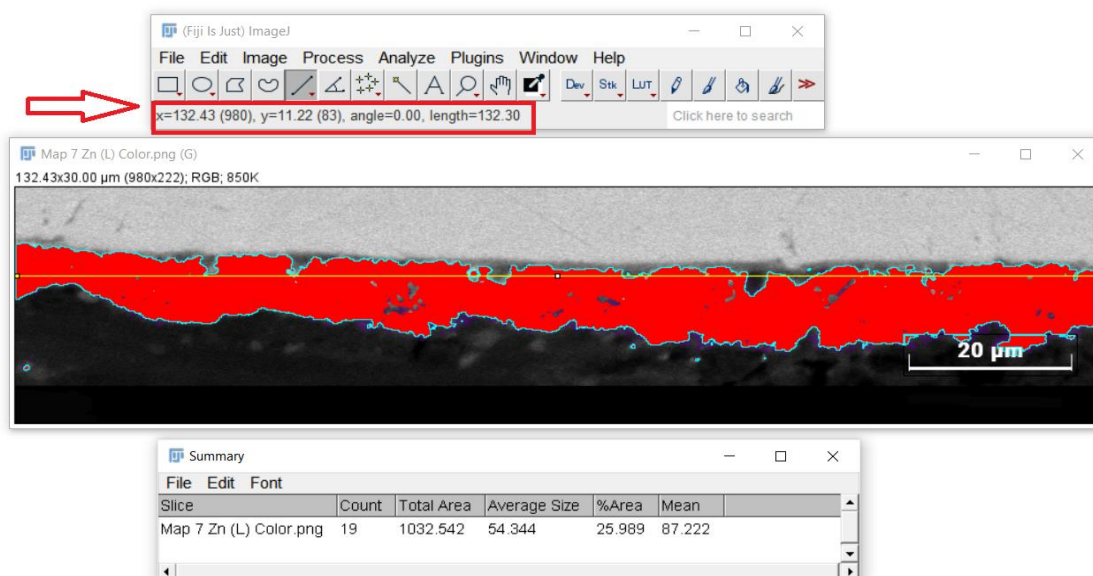
Figura 55 - Medição da área da camada de zinco.



Fonte: AUTOR

Posteriormente foi medido o comprimento da camada zincada. Este foi realizada traçando um segmento de reta paralelo em relação ao comprimento total do revestimento. A Figura 56 (mesma imagem do caso representado pela Figura 55) indica o segmento traçado. Cabe observar que está destacado em vermelho e com uma seta o local onde o *software* indica o valor comprimento medido.

Figura 56 - Medida do comprimento total da camada zincada.



Fonte: AUTOR

Para este exemplo descrito nas Figuras 55 e 56 observa-se que a área da camada de zinco e seu comprimento correspondem, respectivamente, a $1032.542 \mu\text{m}^2$ e $132.30 \mu\text{m}$. Fazendo a divisão da área pelo comprimento temos $7,80 \mu\text{m}$. Este valor é uma estimativa da espessura da camada de zinco. O exemplo aqui descrito para esta segunda metodologia, corresponde ao que foi realizado utilizando a primeira metodologia para o caso do Mapeamento 1 da Tabela 3 (Figura 1 do Anexo 1). Com a primeira metodologia para medições, foram encontrados três valores para a espessura da camada zincada ($7,862 \mu\text{m}$, $9,931 \mu\text{m}$, $9,655 \mu\text{m}$), o que tem como média $9,14 \mu\text{m}$. Constata-se uma diferença nos valores encontrados.

Para as mesmas 17 imagens contidas na Tabela 3 foram realizadas a estimativa da espessura de camada zincada utilizando a segunda metodologia. Os resultados estão apresentados na Tabela 4 e as imagens utilizadas podem ser consultadas no Anexo 2 deste trabalho.

Tabela 4 - Estimativa da espessura da camada zincada (segunda metodologia).

Mapeamento	Área da camada de zinco (μm^2)	Comprimento da camada de zinco (μm)	Espessura estimada (μm)
Mapeamento 1	1032,542	132,30	7,804
Mapeamento 2	1279,894	124,86	10,25
Mapeamento 3	1348,010	130,68	10,315
Mapeamento 4	1078,159	127,70	8,483
Mapeamento 5	1121,914	132,03	8,497
Mapeamento 6	804,803	125,95	6,389
Mapeamento 7	1262,381	132,70	9,513
Mapeamento 8	1116,272	91,28	12,22
Mapeamento 9	240,631	88,33	2,72
Mapeamento 10	531,702	105,54	5,038
Mapeamento 11	952,100	116,08	8,202
Mapeamento 12	835,573	113,92	7,335
Mapeamento 13	961,961	117,57	8,182
Mapeamento 14	832,761	112,84	7,380
Mapeamento 15	953,999	118,78	8,032
Mapeamento 16	739,847	111,89	6,614
Mapeamento 17	483,482	114,86	4,201

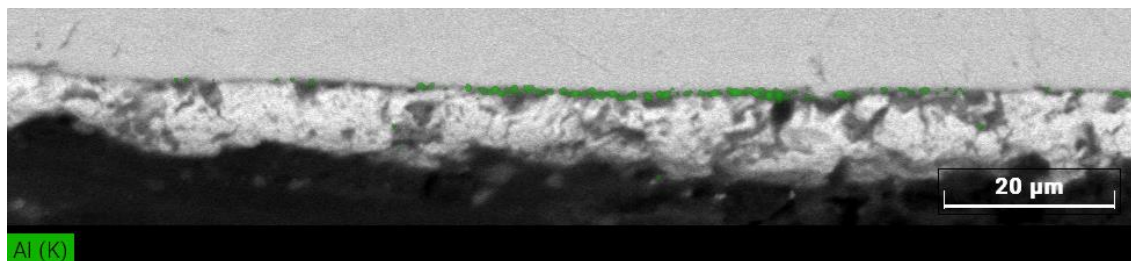
Fonte: AUTOR.

A média de espessura estimada com os valores da Tabela 4 é $7,716 \pm 3,320 \mu\text{m}$. Esta segunda metodologia utilizada para a medição é considerada mais robusta e fidedigna a realidade. O primeiro método, contudo, fornece uma boa aproximação, além de ser mais prático e ágil. Por fim, vale destacar que ambos os métodos utilizados encontraram valores dentro do que a literatura indica como o esperado para a camada inibidora em processos de galvanização do tipo GI.

A primeira metodologia utilizada para o cálculo da espessura da camada zincada foi aplicada para se obter a espessura da camada inibidora composta pela fase Fe_2Al_5 . Para isto, foram utilizadas imagens obtidas em que o mapeamento por cores falsas feito por EDS identificou em verde regiões com presença

significativa do elemento químico alumínio. A Figura 57 mostra um exemplo de um mapeamento.

Figura 57 — Mapeamento por cores falsas identificando em verde região rica em alumínio (fase Fe_2Al_5).



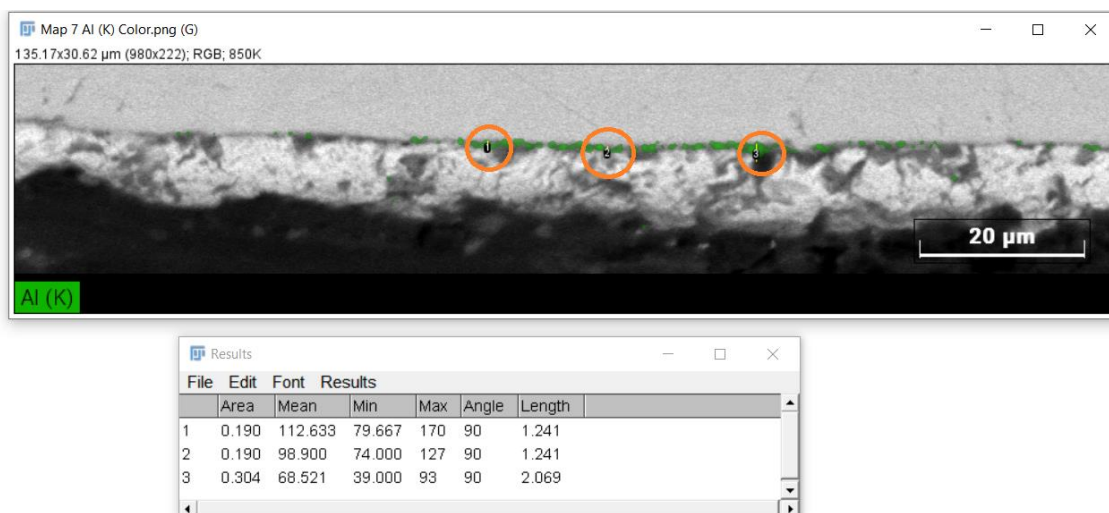
Fonte: AUTOR.

A composição química do banho de zinco a que o aço deste trabalho foi submetido incluiu um percentual entre 0,2% e 0,3% de alumínio. Este percentual de alumínio no banho é, segundo a literatura o suficiente para a formação da camada inibidora, de acordo com autores como Pokorny et al. (2016) e Ting Min et al. (2018).

Destaca-se aqui que nenhuma das regiões analisadas por EDS apresentou camada inibidora de maneira contínua sobre toda a interface aço/zinco. Elas continham “falhas”, isto é, locais em que não se apresentavam na interface Zn/substrato de aço. Segundo Álvarez et al. (2015) a camada inibidora não se apresenta de maneira contínua quando o teor de alumínio no banho é baixo, no entanto, os autores não especificaram qual valor de concentração seria considerado baixo. Além disso há ainda outras hipóteses que podem explicar estas “falhas” na camada inibidora como tempo insuficiente de banho de zinco para nucleação e crescimento de fase Fe_2Al_5 , ou ainda, preparação metalográfica incorreta, em especial, no processo de lixamento, de modo a promover uma “arrancamento” de partes da camada inibidora. Esta última hipótese é corroborada pelo fato de que o mapeamento de EDS identificou alumínio na região da baquelite. Como esse resultado não era esperado, há indícios de que este “arrancamento” da camada inibidora espalhou alumínio para esta região.

A Figura 58 exemplifica medições feitas da espessura da camada inibidora. Círculos em vermelho identificam os locais em que as medições foram feitas. Neste exemplo, foram encontrados os valores: 1,241 μm , 1,241 μm e 2,069 μm . O Anexo 3 deste trabalho apresenta todas as medições obtidas para a espessura da camada inibidora. No total foram realizadas medições em 13 imagens, totalizando 39 medidas, uma vez que nem todas as imagens obtidas apresentaram uma camada inibidora em condições para ser medida.

Figura 58 — Medições da espessura da camada inibidora.



Fonte: AUTOR.

A Tabela 5 apresenta todos os valores de espessura da camada inibidora medidos.

Tabela 5 — Espessuras da camada inibidora para o material analisado.

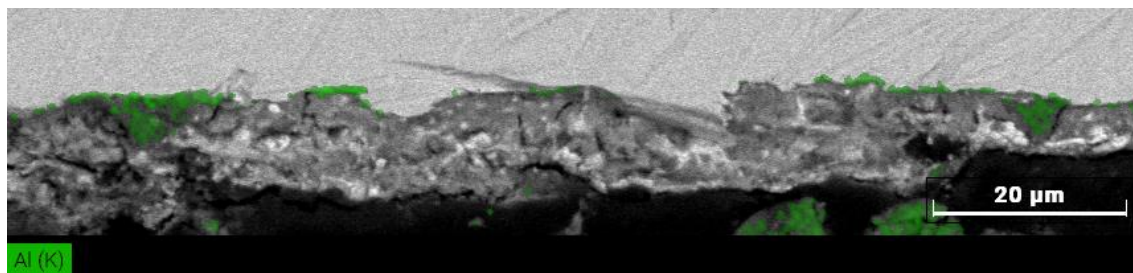
Mapeamento	Espessura 1 (μm)	Espessura 2 (μm)	Espessura 3 (μm)
Mapeamento 1	1,241	1,241	2,069
Mapeamento 2	2,069	1,517	1,655
Mapeamento 3	2,313	1,224	1,088
Mapeamento 4	1,633	1,633	1,224
Mapeamento 5	1,769	1,769	2,721
Mapeamento 6	2,721	1,769	1,905
Mapeamento 7	5,890	2,192	4,932
Mapeamento 8	2,192	1,644	1,918
Mapeamento 9	1,507	1,781	2,603
Mapeamento 10	1,781	2,192	1,918
Mapeamento 11	2,466	2,199	2,055
Mapeamento 12	1,103	1,793	1,931
Mapeamento 13	1,781	1,370	1,507

Fonte: AUTOR.

A camada inibidora apresentou espessura média de $1,347 \pm 0,188 \mu\text{m}$. Este valor está próximo dos $1,04 \mu\text{m}$ para espessura da camada inibidora encontrado por Brepohl (2013) para aços IF que sofreram processo de galvanização GI (Figura 21).

Ao observar as medidas de camada inibidora (Tabela 5), pode-se perceber que as medidas obtidas na imagem identificada como Mapeamento 7 apresentaram valores superiores ao valor médio. Esta situação particular indica maior heterogeneidade e uma espécie de “descolamento” da camada inibidora da interface substrato/aço. A Figura 59 apresenta a imagem em que este mapeamento foi obtido.

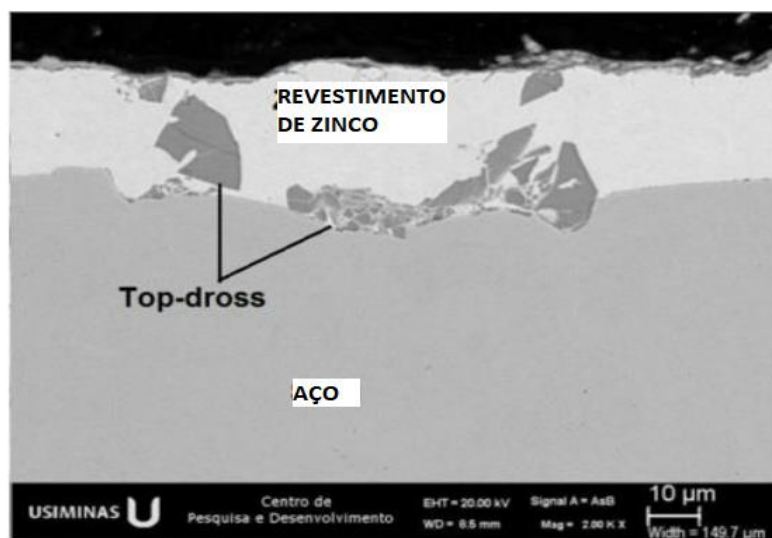
Figura 59 — Camada inibidora (verde) apresentando heterogeneidade de espessura e descolamento.



Fonte: AUTOR.

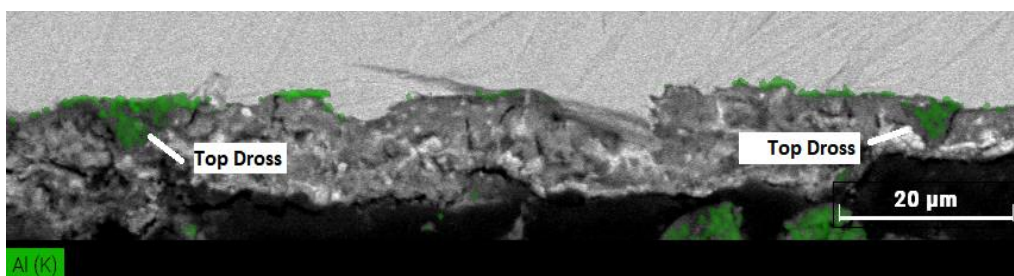
Ao compararmos a situação da Figura 59 com a Figura 60, esta última extraída de Vieira et al. (2022), percebemos que os autores consideram como *Dross*, a fase Fe_2Al_5 que não se apresenta de forma rente, uniforme na camada de zinco e contínua e (destacado como *Top Dross*), pode-se considerar que este tipo de heterogeneidade e descolamento da camada inibidora da interface substrato/revestimento é o defeito chamado *Dross*. Esta situação foi identificada apenas em uma das imagens analisadas, não foi um problema frequente. A Figura 61 enfatiza e deixa claro o local que está sendo considerado como *Dross*.

Figura 60 — Aspecto transversal da camada zincada contendo partículas de *Top Dross* com magnificação de 500X.



Fonte: VIEIRA et al. (2022).

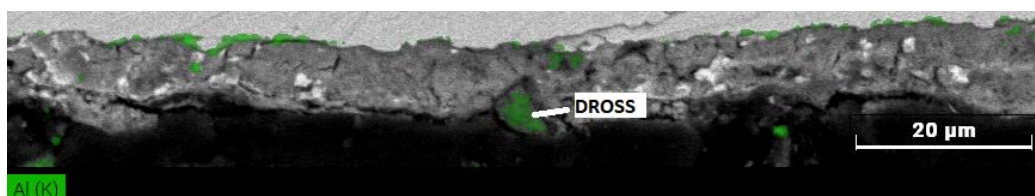
Figura 61 — Identificação do Dross em uma única região submetida à análise por EDS.



Fonte: AUTOR.

A Figura 62 apresenta outro mapeamento por EDS em que foi identificado a presença do *Dross*. Neste caso, ele foi localizado na parte superior da camada zincada (longe do substrato) e está aparente. Esta partícula de *Dross* possui 6 micrometros, o que dificilmente comprometerá a aparência do revestimento, pois não ficará visível a olho nu. Como a camada inibidora nesta imagem está completamente descontínua, ela não foi utilizada para medição da espessura e, por isso, não consta na Tabela 2 e no Anexo 3 deste trabalho.

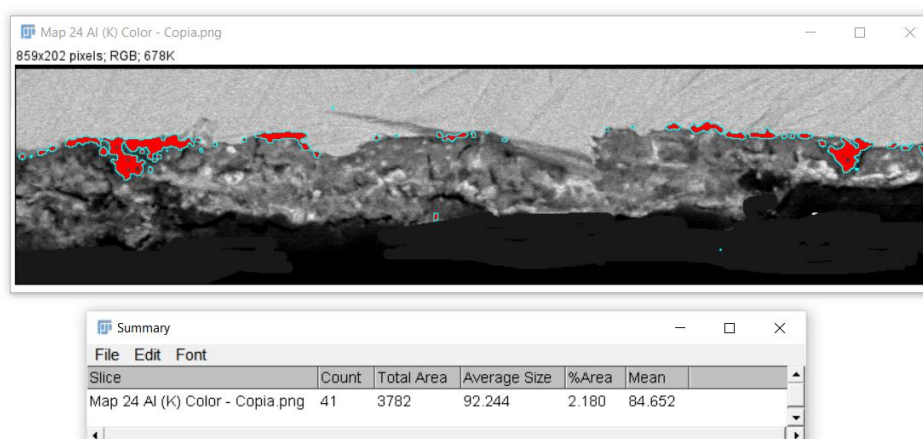
Figura 62 — Identificação de Dross possivelmente aparente.



Fonte: AUTOR.

O processo de segmentação colorida das 13 imagens contendo o mapeamento por cores falsas em que foi identificado a fase contendo alumínio permitiu a obtenção da fração volumétrica ocupada pela fase em relação a camada zincada. Com isso foi obtido a proporção em área de alumínio por imagem. O Anexo 4 deste trabalho mostra todos os resultados obtidos. A Figura 63 mostra um exemplo da segmentação realizada onde se obteve um percentual de 2,180 % de fase contendo alumínio na imagem.

Figura 63 — Medição de porcentagem de fase alumínio por técnica de PDI.



Fonte: AUTOR.

A Tabela 6 apresenta todos os percentuais de fases contendo alumínio nas imagens analisadas. O valor médio de $1,39\% \pm 0,61\%$.

Tabela 6 — Porcentagem de Al identificada nos mapeamentos.

Mapeamento	Porcentagem de Al
Mapeamento 1	0,893
Mapeamento 2	0,651
Mapeamento 3	0,690
Mapeamento 4	1,100
Mapeamento 5	1,702
Mapeamento 6	0,894
Mapeamento 7	0,792
Mapeamento 8	1,404
Mapeamento 9	2,180
Mapeamento 10	1,898
Mapeamento 11	1,348
Mapeamento 12	2,346
Mapeamento 13	2,172

Fonte: AUTOR.

7. CONCLUSÕES

A camada zincada apresentou-se de maneira íntegra e contínua sobre a chapa de aço estudada. Este fato indica que o tempo de galvanização e a velocidade de inserção da chapa no banho foram adequadas para a obtenção do revestimento de zinco. A espessura média da camada zincada utilizando a metodologia considerada mais robusta foi de $7,716 \pm 3,320 \mu\text{m}$ o que está dentro do que a literatura aponta para a galvanização do tipo GI.

A camadas inibidoras não apresentaram-se de modo contínuo em nenhuma das regiões analisadas. Sobre esse tema a literatura pesquisada indicou algumas hipóteses como: baixos teores de *Al* no banho de zinco (Álvarez, 2015), tempo insuficiente para a camada inibidora ser formada sem falhas, os locais onde houve falhas foram locais que não permitiram a nucleação da fase Fe_2Al_5 (questões termodinâmicas) (Porter et al., 2009). Uma outra possibilidade pode ter sido o arrancamento das fases contendo alumínio no momento de preparação metalográfica da amostra, em especial durante o processo de lixamento. Essa explição é corroborada pelo fato de que a maioria análises realizadas por EDS indicaram a presença de frações de alumínio na região da baquelite, local onde esse fato não seria esperado, e que devido ao possível arrancamento indica que fases contendo esse elemento químico podem ter sido arrastadas para lá.

Em apenas duas das dezessete imagens analisadas foram identificadas a presença de *Dross*. Em um dos casos este apresentou-se na parte superior da camada zincada e no segundo caso apresentou-se na forma descontínua, ou seja, uma porção de camada inibidora aparentemente “descolada” em que foi constatado possuir uma espessura ($5,890 \mu\text{m}$) muito superior à média encontrada para a camada inibidora que foi de $1,347 \mu\text{m}$.

Durante esta pesquisa não foi encontrada na literatura uma definição clara sobre *Dross*. Este trabalho propõe que seja considerado como *Dross* qualquer partícula de fase que se encontre descolada da camada inibidora, ou dentro do camada zincada, podendo ela estar aparente na superfície ou não, e que possua dimensões significativas maiores que a espessura média da camada inibidora.

Por fim, através da técnica de PDI por segmentação colorida foi constatado uma presença média de 1,39% (fração volumétrica) de fase contendo alumínio na camada de revestimento estudado. Este pode ser um parâmetro para comparação de diferentes chapas galvanizadas, diferentes processos de galvanização, como controle de processo de fabricação.

7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Melhorar a etapa de preparação metalográfica da amostra e refazer as análises químicas por EDS. Desse modo poderá ser verificado se as falhas contidas na camada inibidora ocorreram devido ao arrancamento da fase Fe_2Al_5 , durante a etapa de preparação da amostra.
- Avaliar os parâmetros termodinâmicos e de controle de processos que levam a camada inibidora a não se estabelecer de maneira contínua.

REFERÊNCIAS

ÁLVAREZ, D. Zapico; BERTRAND, Florence; J.-M. Maigne, M.-L. Giorgi. **Mechanisms and kinetics of the inhibition layer breakdown in the case of Ti IF steel grades galvanized in GA baths**. Galvatech 2015, May 2013, Toronto, Canada. fhal-01810021.

ALVARENGA, Evandro & LINS, V.. (2016). **Atmospheric corrosion evaluation of electrogalvanized, hot-dip galvanized and galvanized interstitial free steels using accelerated field and cyclic tests**. Surface and Coatings Technology. 306. 10.1016/j.surfcoat.2016.04.021.

American Galvanizers Association. Hot-Dip galvanizing for corrosion protection: a specifier's guide. 2012.

AJERSCH, Frank & ILINCA, Florin. **Review Of Modeling And Simulation Of Galvanizing Operations**. Steel Research International. 89. 1700074.10.1002/srin.201700074. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321227430_Review_of_Modeling_and_Simulation_of_Galvanizing_Operations. Acesso em 17 fev. 2022.

ARMCO STACO - Galvanização (2014). Disponível: em https://www.armcostaco.com.br/armco/upload/download/folder_Galvanizacao_online.pdf. Acesso em: 26 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 6323 - **Galvanização Por Imersão A Quente De Produtos De Aço E Ferro Fundido** - Especificação. 2016.

AZADEH, Mahzad & TOROGHINEJAD, Mohammad Reza. **Effect of Heat Treatment on Formability of Hot-dip Galvanized Low Carbon Steel Sheet**. Isij International - ISIJ INT. 49. 1945-1951. 10.2355/isijinternational.49.1945.

2009. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/250161406_Effect_of_Heat_Treatment_on_Formability_of_Hot-dip_Galvanized_Low_Carbon_Steel_Sheet. Acesso em: 25 jun. de 2022.

BATISTA, Kenia Barros. **Caracterização de superfícies de aços galvanizados utilizando a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica**. Orientadora: Maria das Mercês Reis de Castro. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química. Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-986HZV>. Acesso em 30 jan. 2022.

BREPOHL, Danielle Cristina Campos da Silva. **Caracterização Das Camadas Formadas No Processo De Galvanização À Quente Sobre Uma Chapa De Aço Livre De Intersticiais**. Orientador: Paulo Cesar Borges. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UTFPR-12_5309aa2b96c8e838d94a53f342f634a9. Acesso em: 30 jan. 2022.

CAPANHER, Cirano Gewar. **Otimização Experimental Em Processo De Galvanização De Arames De Camada Pesada**. Orientadora: Jane Zoppas Ferreira. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2009. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/18602>. Acesso em: 02 fev.2022.

CONI, Nicodemos Henrique da Silva. **Estudo Das Propriedades Mecânicas Do Aço Zincado Por Imersão À Quente E Galvalume® Produzidos Na Csn-Pr**. Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes. 2004. 84f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/33133>. Acesso em: 30 jan. 2022.

COSTA, A. N. C.; SILVA, G. C.; FERREIRA, E. A.; NAKAZATO, R. Z. **Comparative Analysis Of Corrosion Resistance Of Zinc And Zn-Al-Mg Coatings On Carbon Steel**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 10, n. 1, p. e49810111973, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i1.11973. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/11973>. Acesso em: 9 fev. 2022.

CUNHA, Kellen Tebaldi da. **Avaliação da qualidade do revestimento em tubos de aço galvanizados**. Orientador: Hugo Marcelo Veit. (2021). 74 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais PPG3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

COLPAERT, Hubertus. **Metallography of Steels: Interpretation of Structure and the Effects of Processing**. Editora: ASM International. ISBN:1627081488. 2008.

DORNELLAS, Marcos Paulo. **Medida de porosidade em compósitos B4C-Nb por meio de análise e processamento digital de imagem**. Orientadora: Marília Garcia Diniz. 2021. 111 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.btdtd.uerj.br:8443/handle/1/17379>. Acesso em: 18 mai 2022.

ELEUTÉRIO, Henrique Lacerda. **Avaliação Do Mecanismo De Transformação Do Revestimento Galvanizado Ga No Aço 22mnb5 durante O Processo De Estampagem A Quente**. Orientador: Vicente Tadeu Lopes Buono. 2019. 163 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/30181>. Acesso em: 30 jan. 2022.

FELIX, Glaudivstoni da Silva. **Implementação de um sistema de controle automático em processo de galvanização por imersão a quente**.

Orientadora: Cintia Marangoni. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Engenharia de Processos, Universidade da Região de Joinville. 2013. Disponível em: https://www.univille.edu.br/account/mep/VirtualDisk.html/downloadDirect/2831153/Dissertacao_Glaudistoni_da_Silva_Felix.pdf. Acesso em: 05 fev. 2022.

FELIX, G., SELLIN, N., & MARANGONI, C. **Reduction Of Dross In Galvanized Sheets Through Automatic Control Of Snout Positioning In Continuous Operation**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 89, 2345–2353. 2017 Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9275-z>. Acesso em: 06 mar. 2022.

FILHO, O. M. & NETO, H. V. **Processamento Digital de Imagens**. Brasport. 1999.

FONSECA, Fabiano Augusto Vallim. **Efeito do Substrato dos Aços IF nas Propriedades do Revestimento Galvannealed**. Orientador: Vicente Buono. 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte 2006.

FONSECA, Marcelo Alves. ALVES, Willer Bastos. LACERDA, José Carlos. **Estampabilidade Dos Aços IF E Aa Para Aplicação Automotiva**. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2009/busca/artigos/032002415.pdf>. Acesso em: 06. mar. 2022.

GOMES, Otávio da Fonseca Martins. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais**. Orientador: Sidnei Paciornik. 2001. 151f. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica. Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2001.

Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11498/11498_1.PDF
Acesso em: 18 mai. 2022.

GONZALEZ C. R.; WOODS R. E. **PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS**.
1ª Edição. ISBN: 9788521202646. 2000.

GOGOLA, Peter & GABALCOVÁ, Zuzana & SUCHANEK, Henrich & KUSÝ, Martin. (2020). **Intermetallics formation during hot dip galvanizing of high carbon steel**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 723. 012007. 10.1088/1757-899X/723/1/012007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339468703_Intermetallics_formation_during_hot_dip_galvanizing_of_high_carbon_steel. Acesso em: 03 mar. 2022.

KANIA, H., MENDALA, J., KOZUBA, J., & SATERNUS, M. (2020). **Development Of Bath Chemical Composition For Batch Hot-Dip Galvanizing — A Review**. *Materials* 13, 4168. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7560534/>. Acesso em: 22 fev. 2022.

MARQUES, Rodrigo José Alves. **Avaliação da resistência à corrosão de aços IF revestidos com zinco e ligas de ferro-zinco destinados à indústria automobilística**. Orientadora: Geralda Cristina D. de Godoy. 2008. 115f. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MAPO-7RCNQM>. Acesso em: 30 jan. 2022.

MANHABOSCO, Sara Matte. **Avaliação do Comportamento Corrosivo De Aços Galvanizados Utilizando Microssondas Eletroquímicas**. Orientador: Luis Frederico Pinheiro Dick. 2017. 89 f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/165634>. Acesso em: 30 jan. 2022.

MARCOMINI, R. F.; SOUZA, D. M. P. F. **“Caracterização microestrutural de materiais cerâmicos utilizando o programa de processamento digital de imagens Image J”**, *Cerâmica*, v. 57, no 341, p. 100–105, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/3Mhm6kNNTQNhkdnLyV8P4Xk/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 06 mar. 2022.

MELO, R. H. C. **Using Fractal Characteristics such as Fractal Dimension, Lacunarity and Succolarity to Characterize Texture Patterns on Images**. PhD thesis, Universidade Federal Fluminense, Niteroi. 2005. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/17146>. Acesso em 25 jun. 2022.

OLIVEIRA, Augusto & RIOS, Paulo. (2013). **A novel iron enrichment isothermal kinetic model proposal for galvanneal coatings**. *Journal of Materials Research and Technology*. 2. 117-124. 10.1016/j.jmrt.2013.01.001.

OLIVEIRA, C. Q. **METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DIGITAL APLICADA À EXPLORAÇÃO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS**; 2004; 127 f; Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) - Instituto Militar de Engenharia, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior; Orientador: Julio José da Silva Estrada.

PARANHOS, Rosangela Maria Vitor. **Caracterização De Fases Intermetálicas Presentes Em Aço Galvanizado Por Imersão A Quente Com Tratamento Metálico Do Revestimento Metálico**. Orientadora: Vanessa de Freitas Cunha Lins. 2010. 96f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia da UFMG. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8N7EJZ>. Acesso em 30. jan. 2022.

PORTER, David A., K. E. EASTERLING, and MOHAMED Y. Sherif. **Phase Transformations in Metals and Alloys**. 2009.

POKORNY, P. & KOLÍSKO, Jiří & BALIK, L. & Novak, P.. (2016). **Reaction kinetics of the formation of intermetallic Fe – Zn during hot - Dip galvanizing of steel.** Metalurgija. 55. 111-114. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282987203_Reaction_kinetics_of_the_formation_of_intermetallic_Fe_-_Zn_during_hot_-_Dip_galvanizing_of_steel. Acesso em: 15 jul. 2022.

RACHMAT, Rudi & OGAWA, M. (2018). **Influence Of Steel Strip Temperature In Formation Zinc Dross During Process Production Using Continuous Galvanizing Line (CGL) Machine.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 395. 012006. 10.1088/1757-899X/395/1/012006. Disponível em: Acesso em: 17 fev. 2022.

RODRIGUES, Tatiana Patricia Nascimento da Silva. **Processamento Digital de Imagens para Análise do Comportamento e Bem-Estar de Frangos de Corte.** Orientador: Héilton Pandorfi. 2017. 82 f. Tese (Doutorado) Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 2017. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede/handle/tede2/7622>. Consultado em 26 ago. 2022.

ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras: uma abordagem prática versão-3.0,** 2010. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod_resource/content/1/APOSTILA_METALOGRAFIA.pdf Acesso em: 11 set. 2022.

SARAVANAN P. & SRIKANTH S. **Surface Defects And Their Control In Hot Dip Galvanized And Galvannealed Sheets.** International Journal of Advanced Research In Chemical Science (Ijarcs), Vol. 5, No. 11, Pp. 11-23, 2018. <Http://Dx.Doi.Org/10.20431/2349-0403.0511002>. Disponível em : <https://www.semanticscholar.org/paper/Surface-Defects-and-their-Control-in-Hot-Dip-and-Saravanan-Srikanth/435c417b102ce44dfd900b536f3aa08f5d84f704>. Acesso em 06. mar 2022.

SCHUMID P, URAN K, MACHERY F, EBERT M, ULLRICH J, SOMMER D, FRIEDEL F. **X-ray diffraction and scanning electron microscopy of galvanized coatings on steel.** *Anal Bioanal Chem.* 2009 Apr;393(8):1863-70. doi: 10.1007/s00216-008-2581-z. Epub 2009 Jan 21. PMID: 19153722. Disponível em: https://www.academia.edu/20727230/X_ray_diffraction_and_scanning_electron_microscopy_of_galvanized_coatings_on_steel?auto=download. Acesso em 15 jul. 2022.

SILVA, V. C. ; DINIZ, M. G.; Campos, J. B. ; COSTA NETO, C. A. . **Medida de porosidade em SiC através de processamento digital de imagens.** In: I Encontro de Engenharia, Ciência de Materiais e Inovação do Estado do Rio de Janeiro. I EECIMAT, 2015, Nova Friburgo - RJ. Anais do I Encontro de Engenharia, Ciência de Materiais e Inovação do Estado do Rio de Janeiro I EECIMAT, 2015. Disponível em: <http://www.metaeventos.net/userfiles/file/iencontredeengenharia,CienciadeMateriaiseinovacaodoestadodoRiodeJaneiro/pdfs/320.pdf>. Acesso em 06 mar 2022.

SILVA, Vinicio Coelho da. **Medida de porosidade em SiC através de processamento digital de imagens. Orientadora.** Marília Garcia Diniz. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/11719>. Acesso em: 18 mai. 2022.

SILVEIRA, Claudemir Carvalho. **Efeito de revestimentos galvanizados na estampagem de um aço bifásico destinado à indústria automotiva.** Orientador: Carlos Augusto Silva de Oliveira. 2015. 108 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/169318>. Acesso 31 jan. 2022.

Ting Min, Yimin Gao, Xiaoyu Huang, Zhanpeng Gong, Kemin Li, Shengqiang Ma. **Effects of aluminum concentration on the formation of inhibition layer during hot-dip galvanizing**, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 127, Part C, 2018, Pages 394-402, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.016>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931018317794>).
Acesso em 06 mar. 2022.

TRPČEVSKÁ, Jarmila & HLUCHÁŇOVÁ, B. & VINDT, T. & Żórawski, WOJCIECH & JAKUBÉCZYOVÁ, D.. (2010). **Characterization of the bottom dross formed during batch hot-dip galvanizing and its refining**. Acta Metallurgica Slovaca. 16. 151-156. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289240579_Characterization_of_the_bottom_dross_formed_during_batch_hot-dip_galvanizing_and_its_refining.
Acesso em: 06 mar. 2022.

VIEIRA, Ronaldo Rodrigues; ELEUTÉRIO, Henrique Lacerda; DE OLIVEIRA, Thalisson Gustavo; BAGATINI, Maurício Covcevic; TAVARES, Roberto Parreiras . **Numerical Simulation of Zinc Flow in Different Layouts of Galvanization Pot**. MATERIALS RESEARCH 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/w497N87DqbNRYzm9n8jJG3b/?lang=en>.
Acesso em: 06 mar. 2022.

VIEIRA, Ronaldo Rodrigues; DUARTE, Izabela Diniz ; ELEUTÉRIO, Henrique Lacerda; DE OLIVEIRA, Thalisson Gustavo; ; BAGATINI, Maurício Covcevic; TAVARES, Roberto Parreiras . **Trajectory of Top-Dross Particles During the Melting of Zinc Ingot in Galvanizing Pot**. MATERIALS RESEARCH 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/QtywGQkk3hGhjrC9yYV8gvQ>.
Acesso em: 06 mar. 2022.

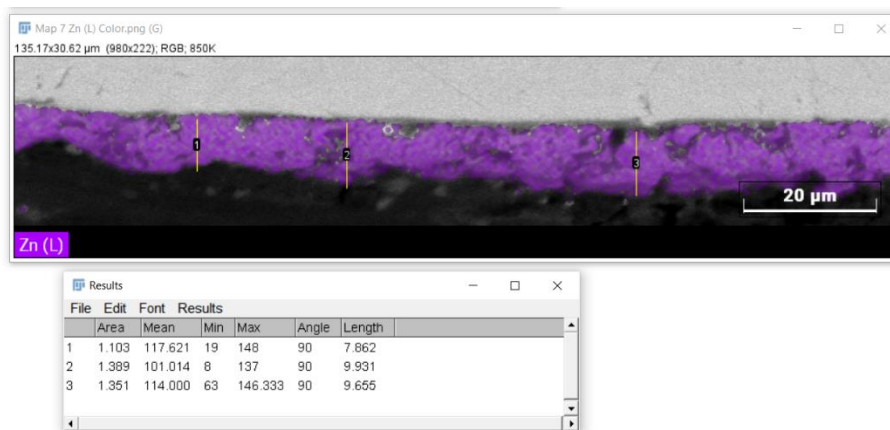
VIEIRA, Ronaldo Rodrigues. **Estudo sobre o desprendimento do revestimento de zinco em materiais galvanizados com liga de Fe-Zn.** Orientador: Antônio Claret Soares Sabioni. 2007. 108f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação da REDEMAT (Rede Temática de Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, 2007. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2832>. Acesso em: 30 jan. 2022.

YANG, Honglin & ZHANG, Shengen & LI, Jun & LIU, Xin & WANG, Hua. (2013). **Effect of strip entry temperature on the formation of interfacial layer during hot-dip galvanizing of press-hardened steel.** Surface and Coatings Technology. 240. 10.1016/j.surfcoat.2013.12.040. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259511810_Effect_of_strip_entry_temperature_on_the_formation_of_interfacial_layer_during_hot-dip_galvanizing_of_press-hardened_steel. Acesso em: 18 fev. 2022.

ANEXO 1

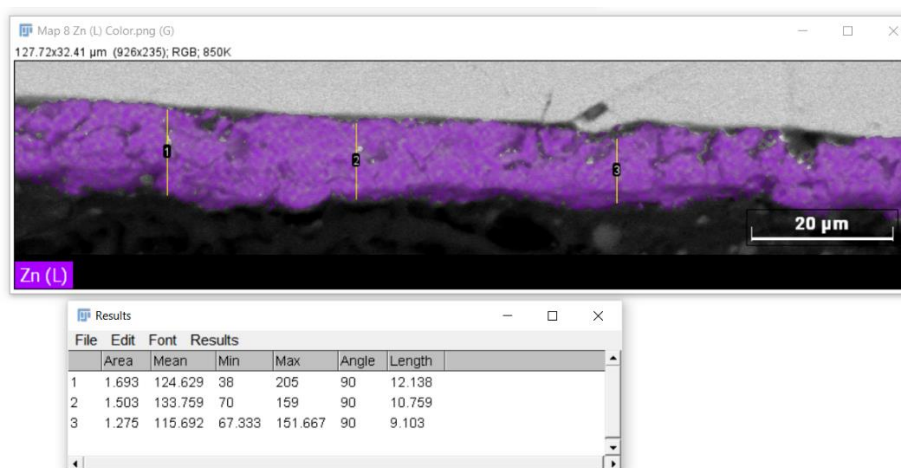
Imagens contendo as medições de espessuras das camadas de zinco. As imagens deste anexo referem-se às medidas que estão descritas na Tabela 3.

Figura 1 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 1 (Tabela 3).



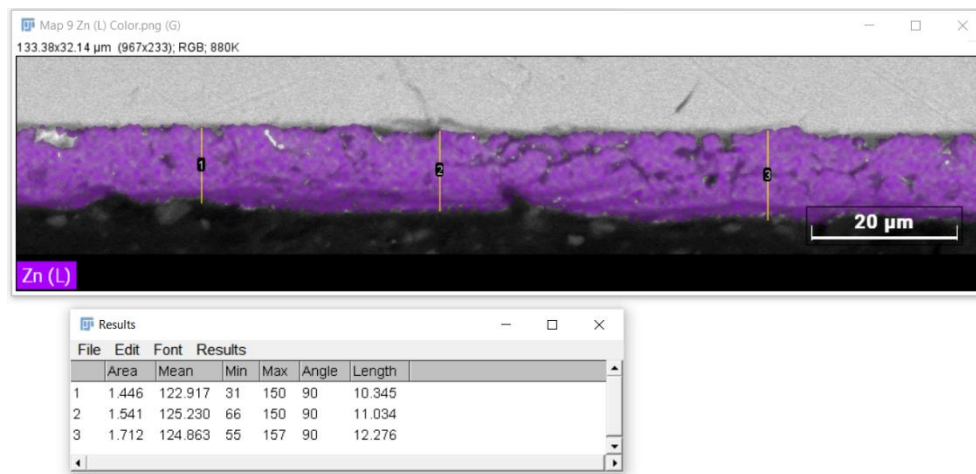
Fonte: AUTOR.

Figura 2 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 2 (Tabela 3).



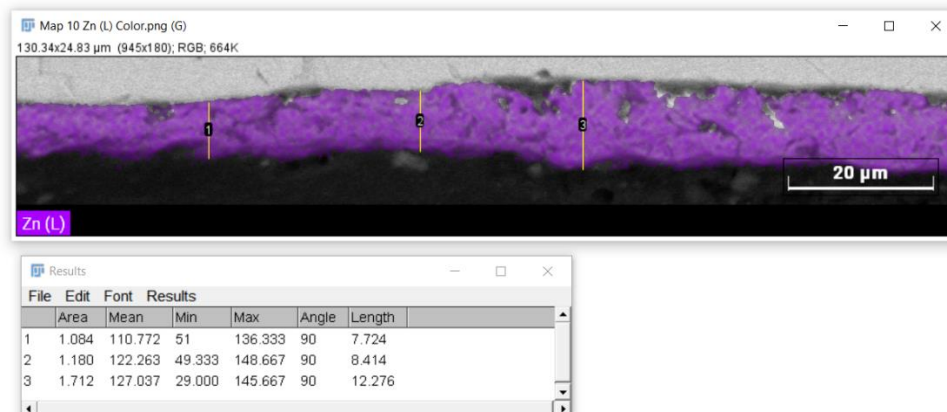
Fonte: AUTOR.

Figura 3 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 3 (Tabela 3).



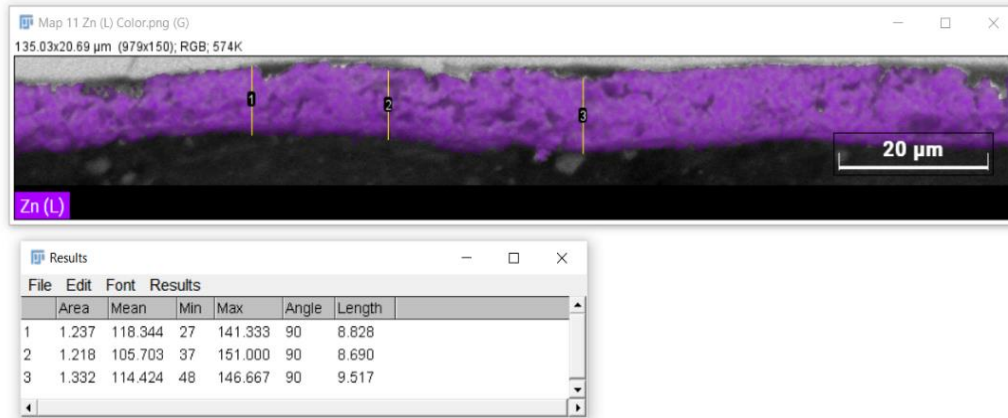
Fonte: AUTOR.

Figura 4 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 4 (Tabela 3).



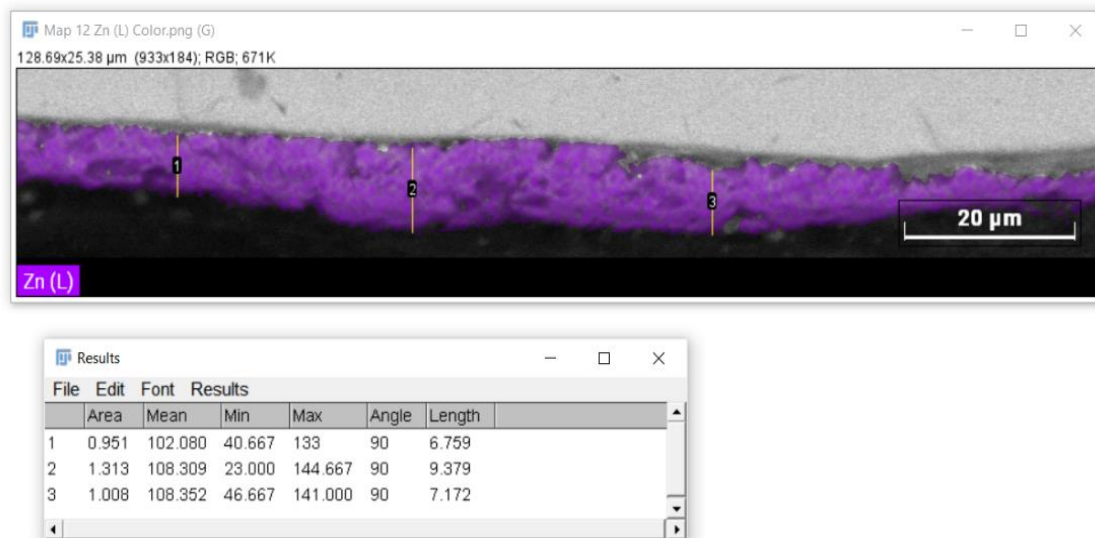
Fonte: AUTOR.

Figura 5 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 5 (Tabela 3).



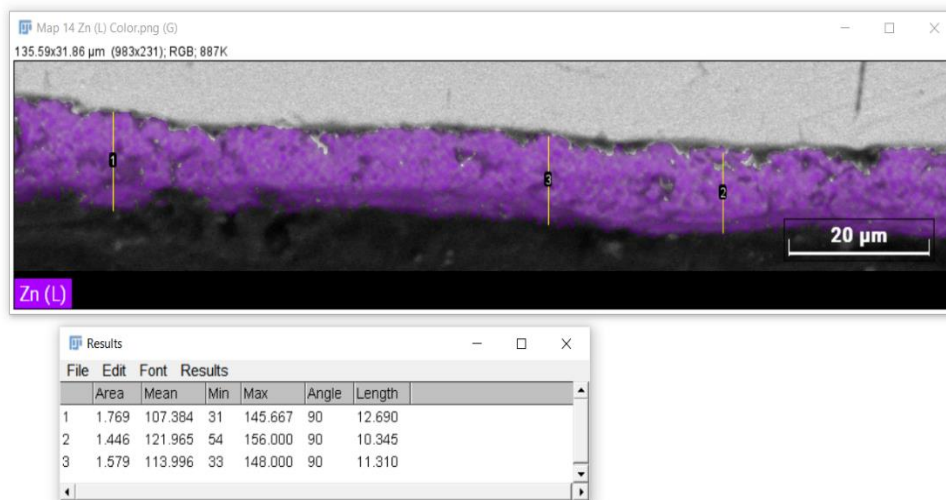
Fonte: AUTOR.

Figura 6 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 6 (Tabela 3).



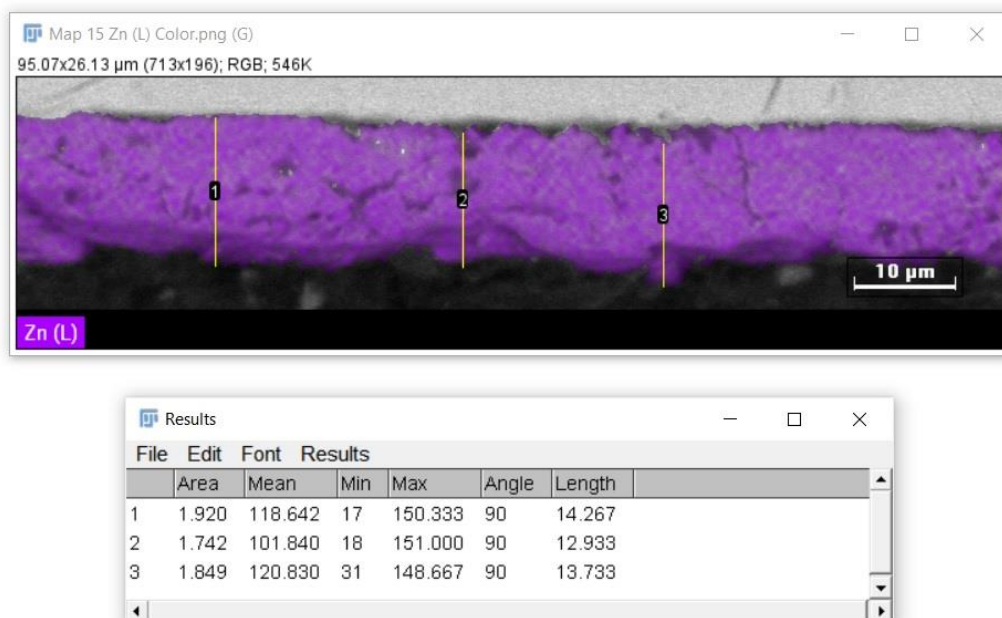
Fonte: AUTOR.

Figura 7 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 7 (Tabela 3).



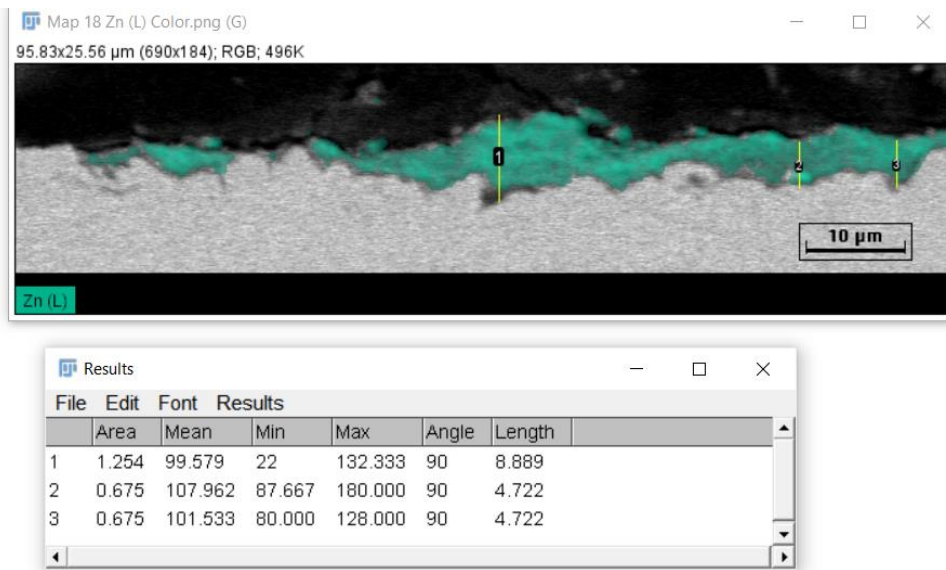
Fonte: AUTOR.

Figura 8 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 8 (Tabela 3).



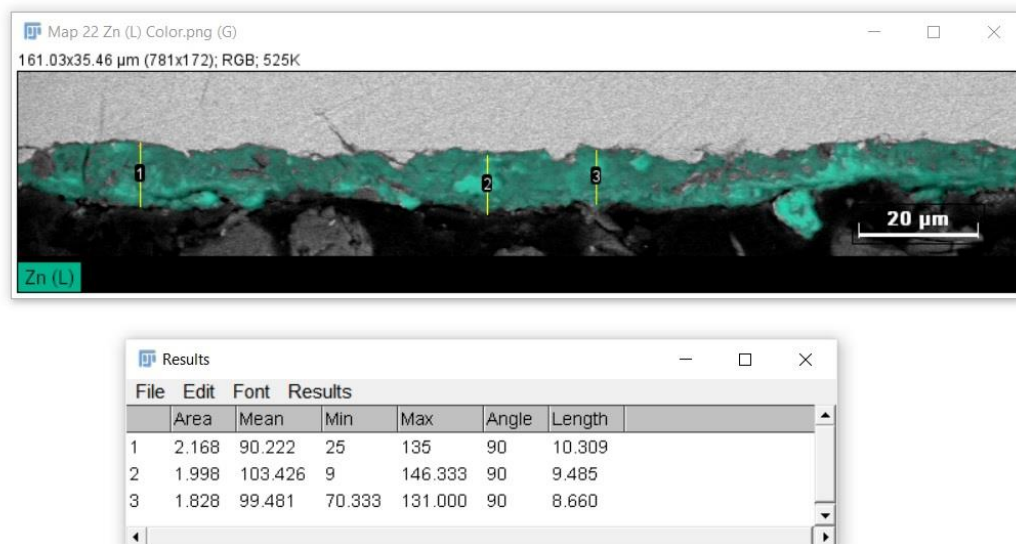
Fonte: AUTO

Figura 9 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 9 (Tabela 3).



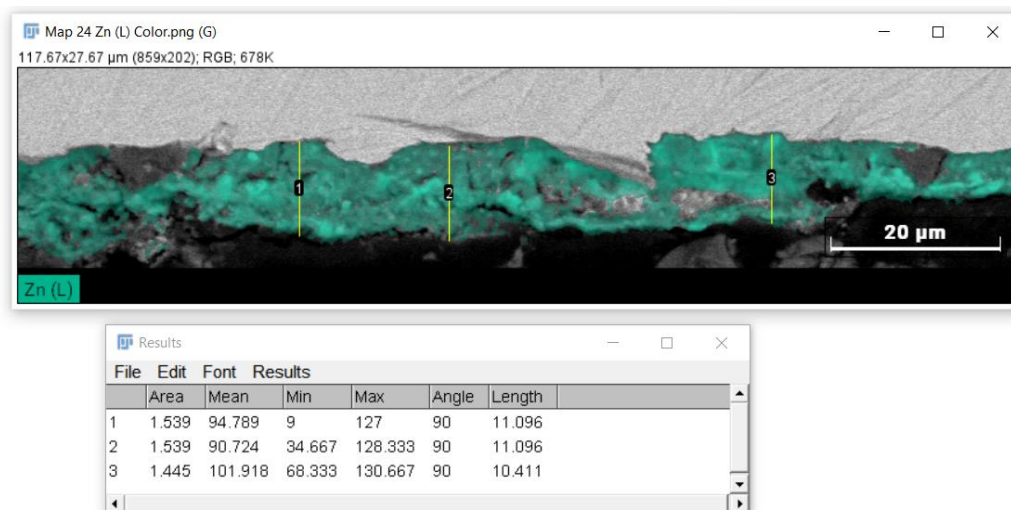
Fonte: AUTOR.

Figura 10 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 10 (Tabela 3).



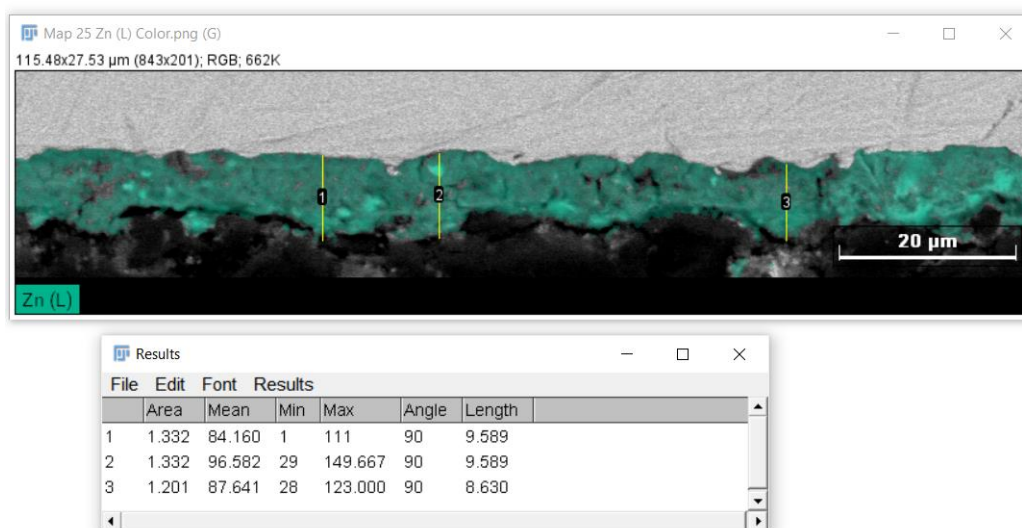
Fonte: AUTOR.

Figura 11 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 11 (Tabela 3).



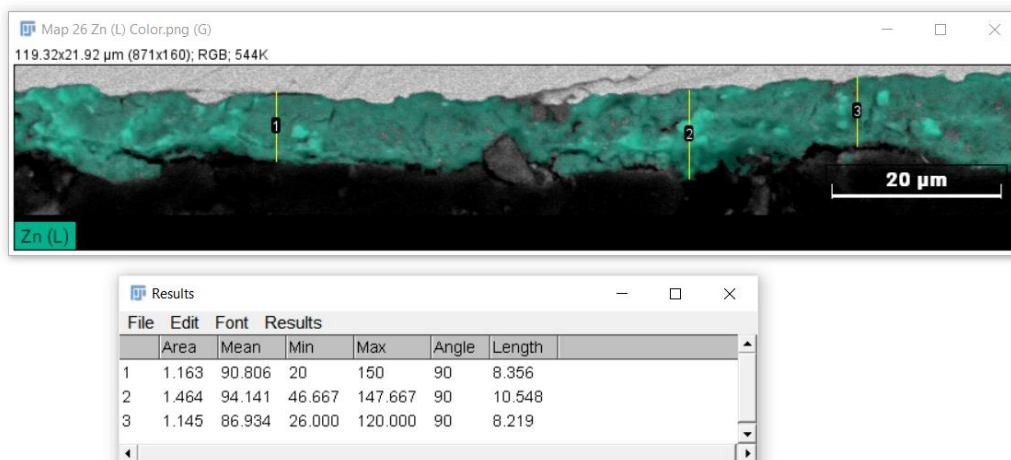
Fonte: AUTOR.

Figura 12 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 12 (Tabela 3).



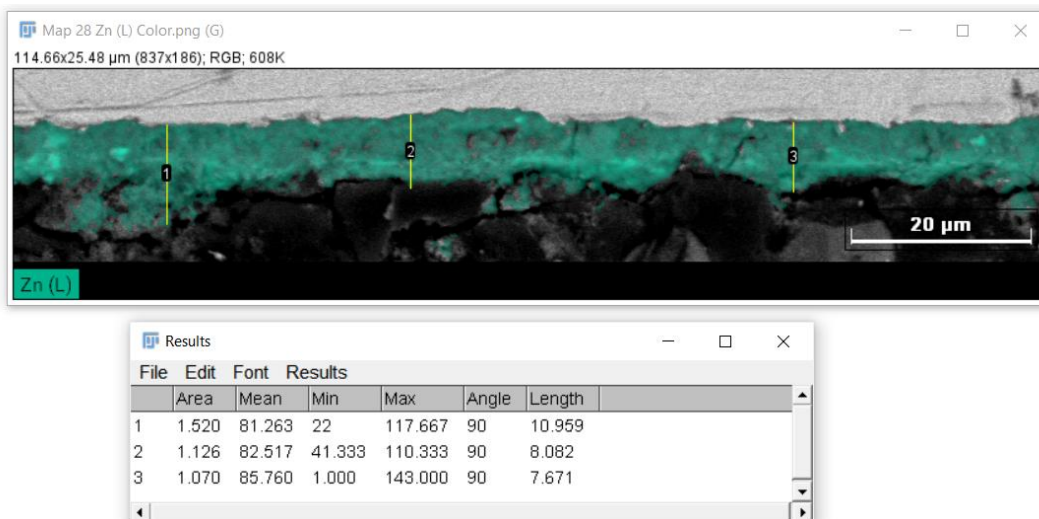
Fonte: AUTOR.

Figura 13 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 13 (Tabela 3).



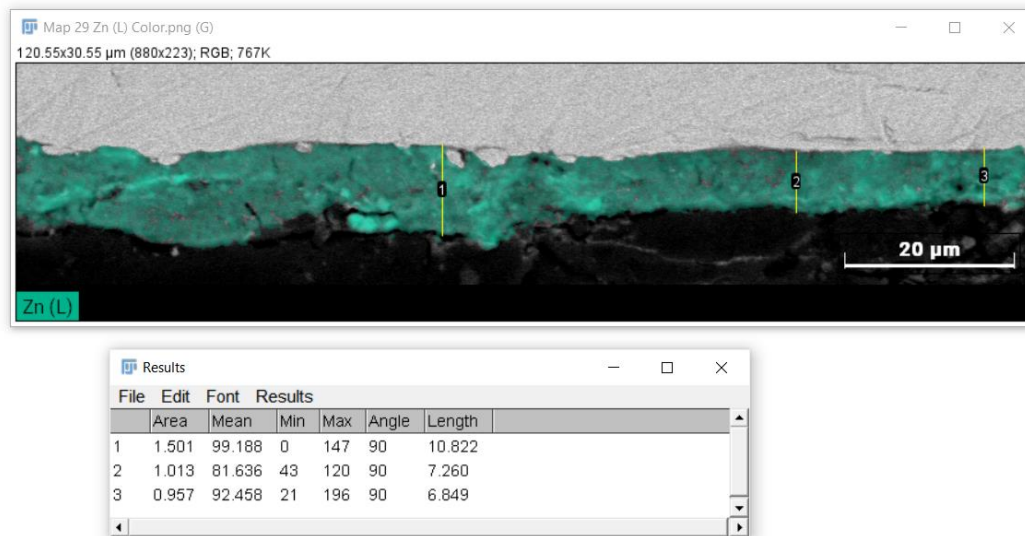
Fonte: AUTOR.

Figura 14 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 14 (Tabela 3).



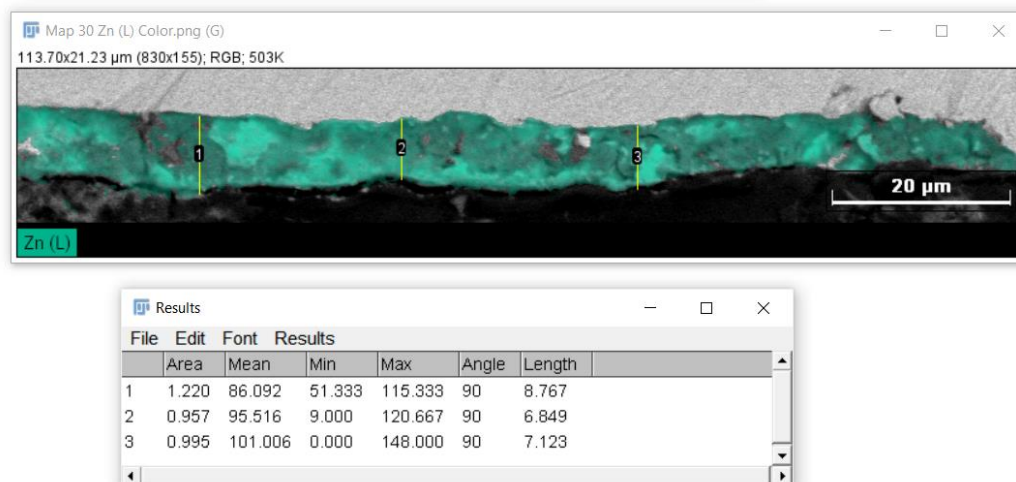
Fonte: AUTOR.

Figura 15 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 15 (Tabela 3).



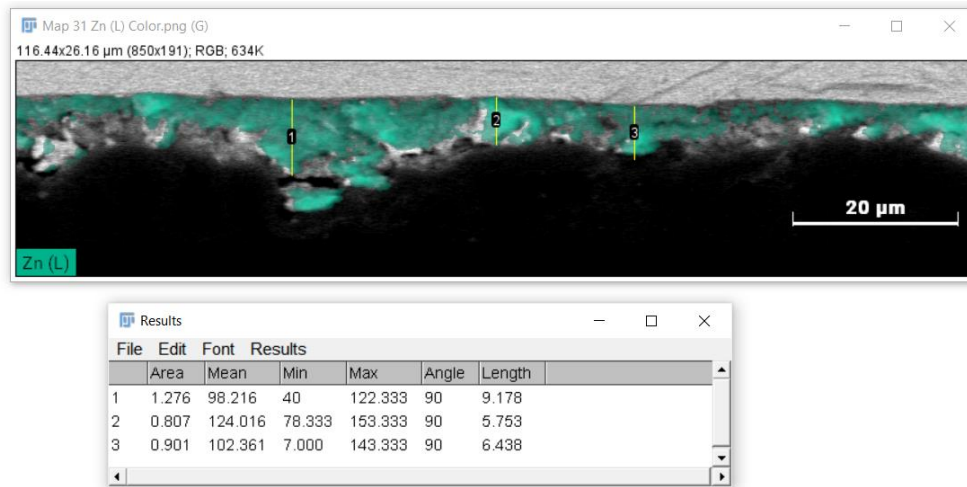
Fonte: AUTOR.

Figura 16 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 16 (Tabela 3).



Fonte: AUTOR.

Figura 17 – Medições espessura camada de zinco. Referente Mapeamento 17 (Tabela 3).

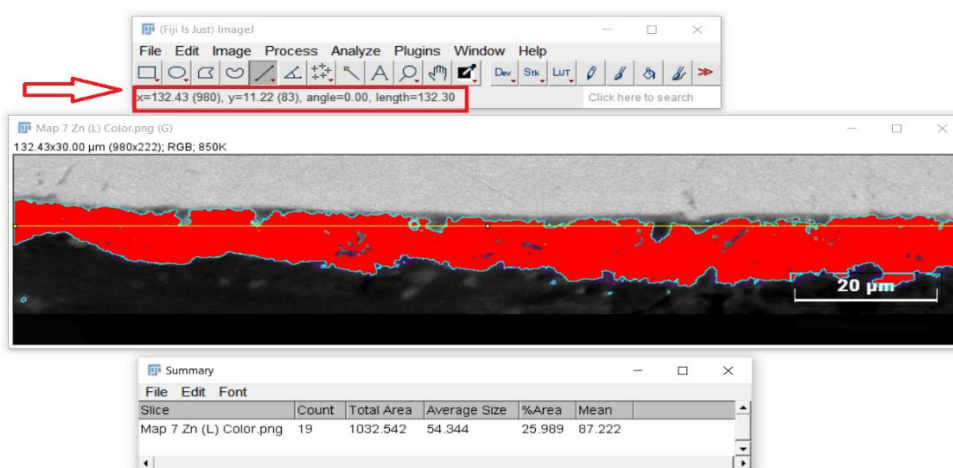


Fonte: AUTOR.

ANEXO 2

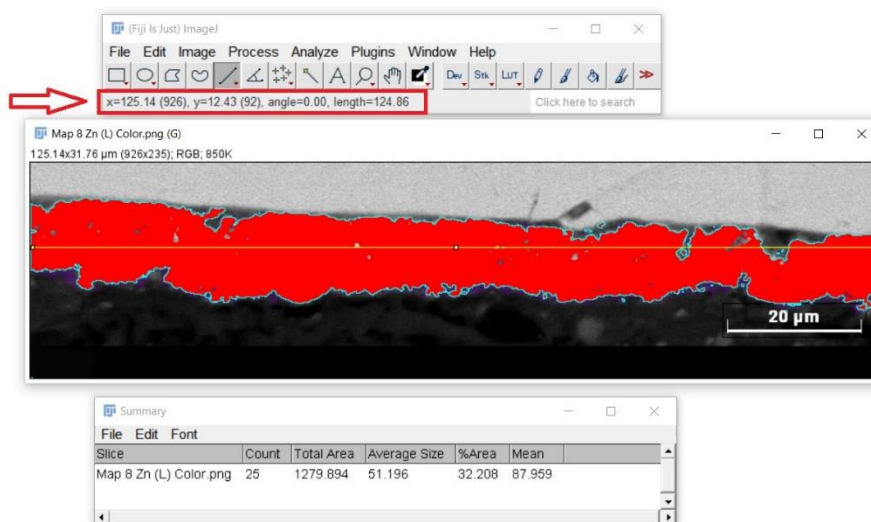
Imagens contendo as medições de espessuras das camadas de zinco utilizando a segunda metodologia. As imagens deste anexo referem-se às medidas que estão descritas na Tabela 4.

Figura 1 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 1 (Tabela 4).



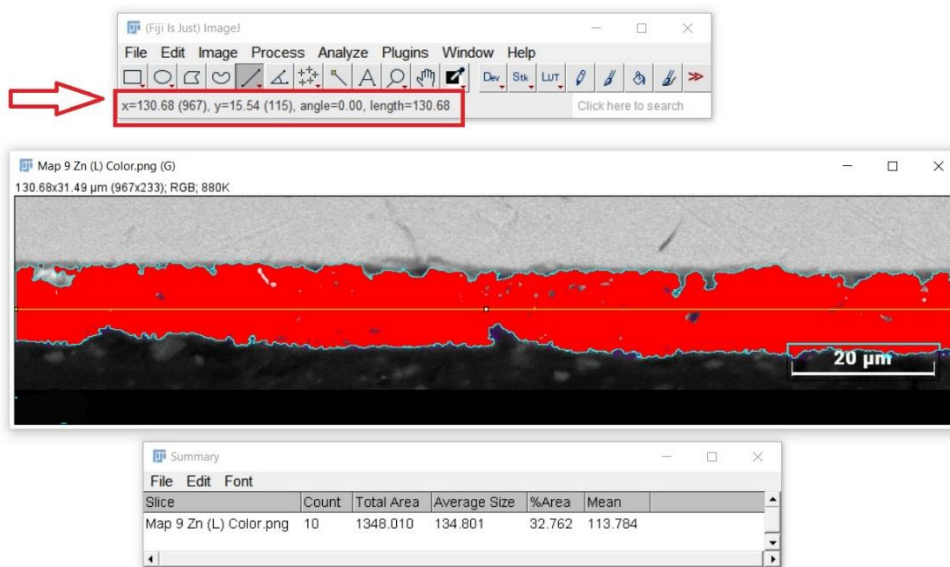
Fonte: AUTOR

Figura 2 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 2 (Tabela 4).



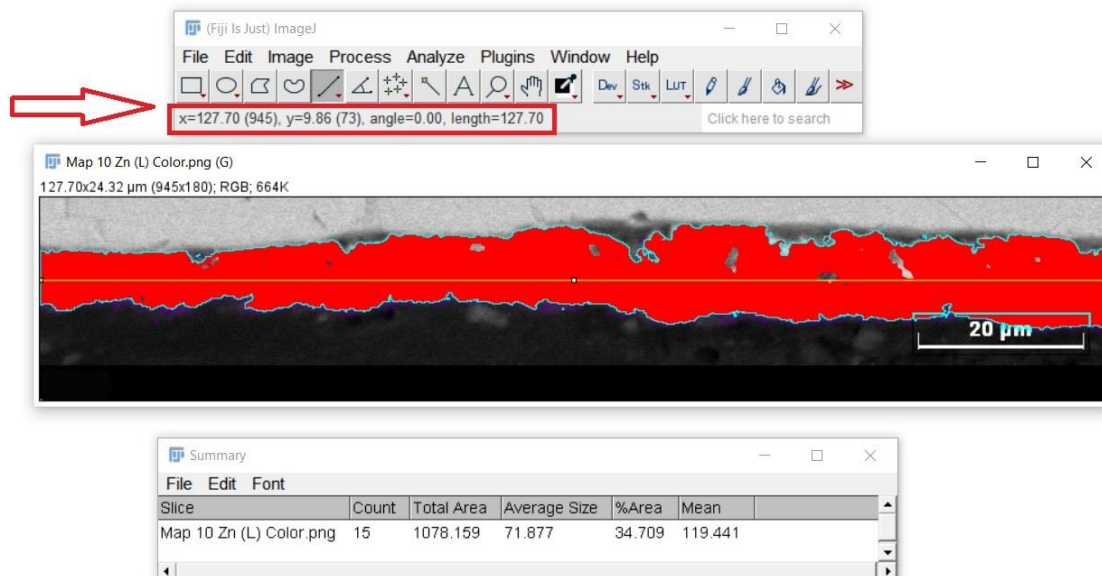
Fonte: AUTOR

Figura 3 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 3 (Tabela 4).



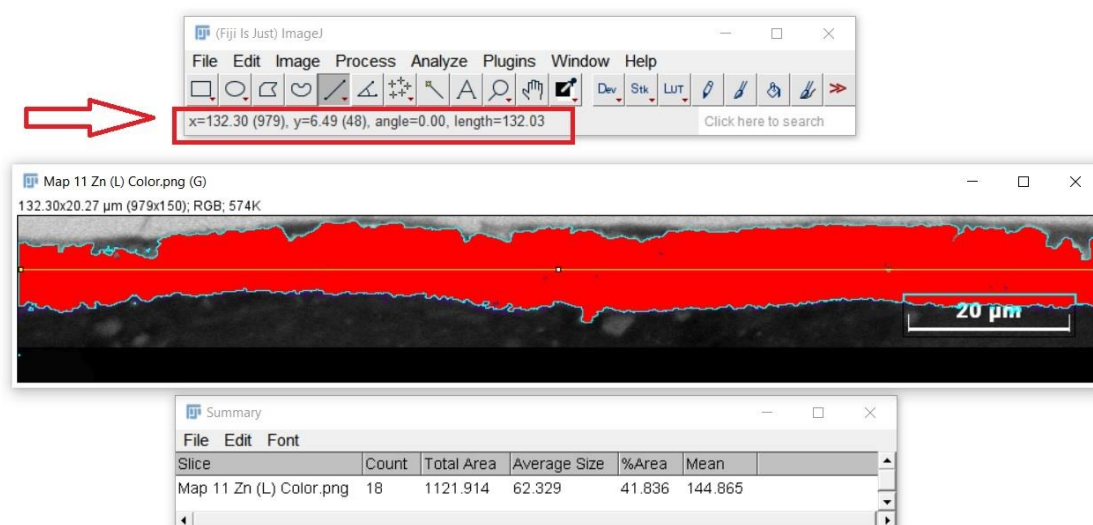
Fonte: AUTOR

Figura 4 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 4 (Tabela 4).



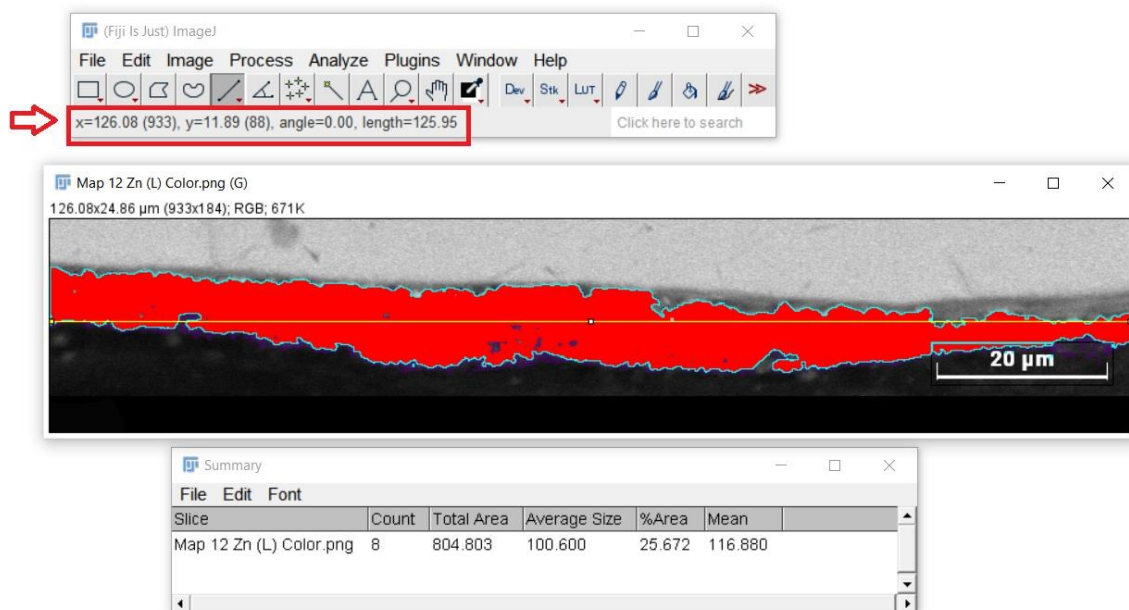
Fonte: AUTOR

Figura 5 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 5 (Tabela 4).



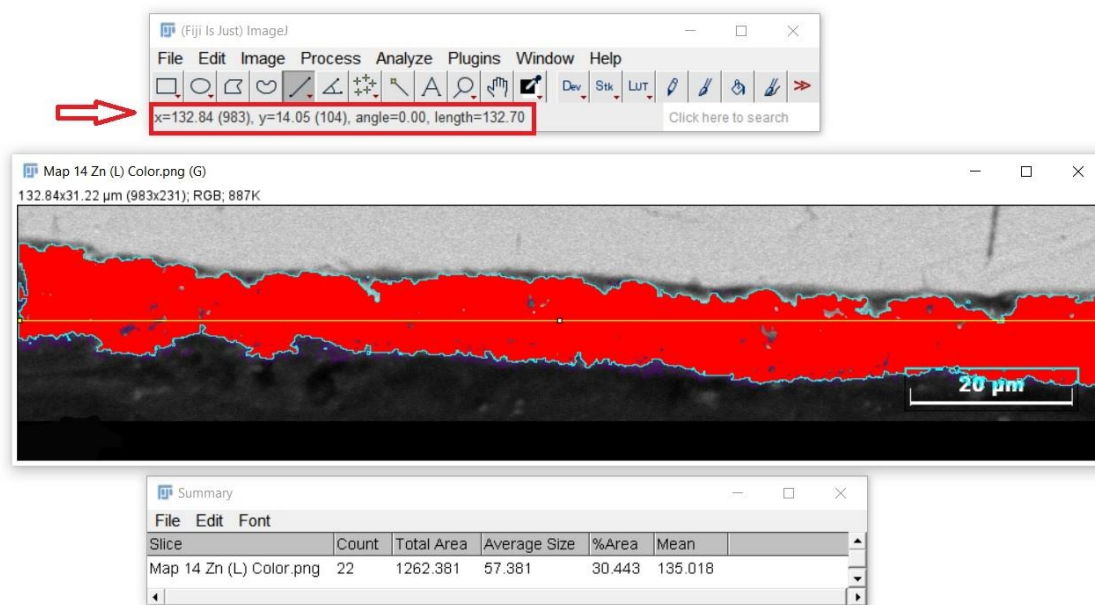
Fonte: AUTOR

Figura 6 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 6 (Tabela 4).



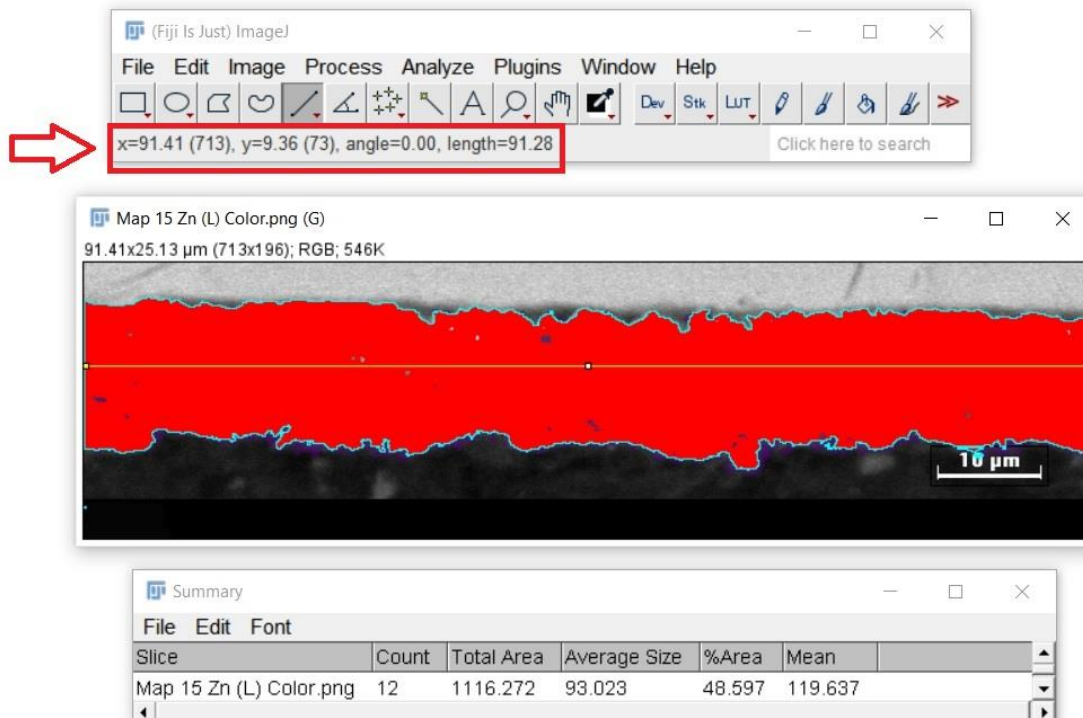
Fonte: AUTOR

Figura 7 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 7 (Tabela 4).



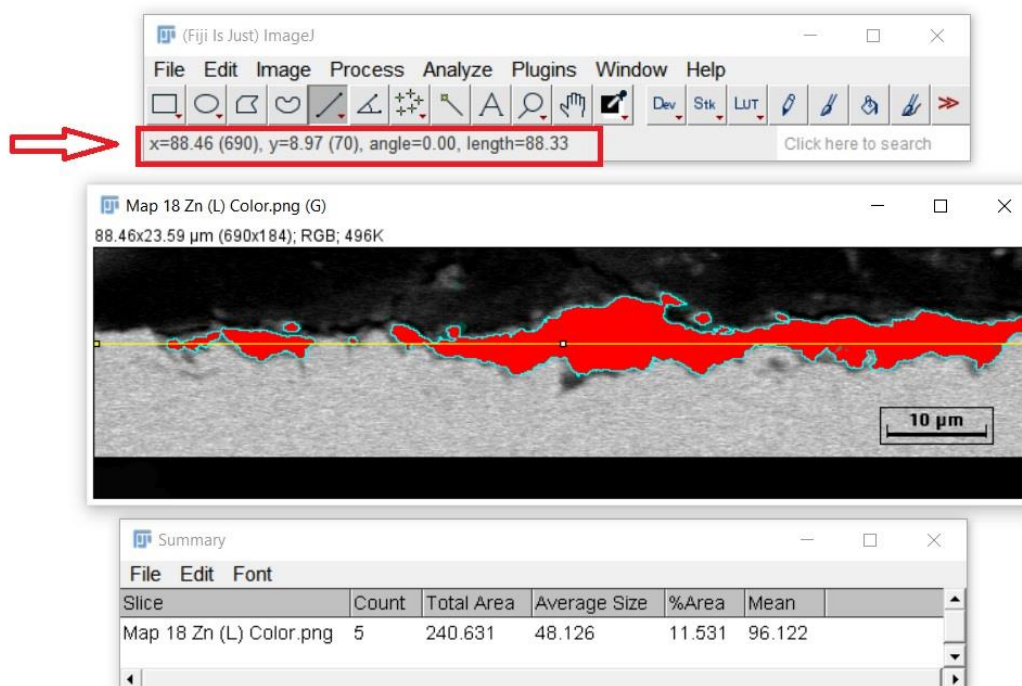
Fonte: AUTOR

Figura 8 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 8 (Tabela 4).



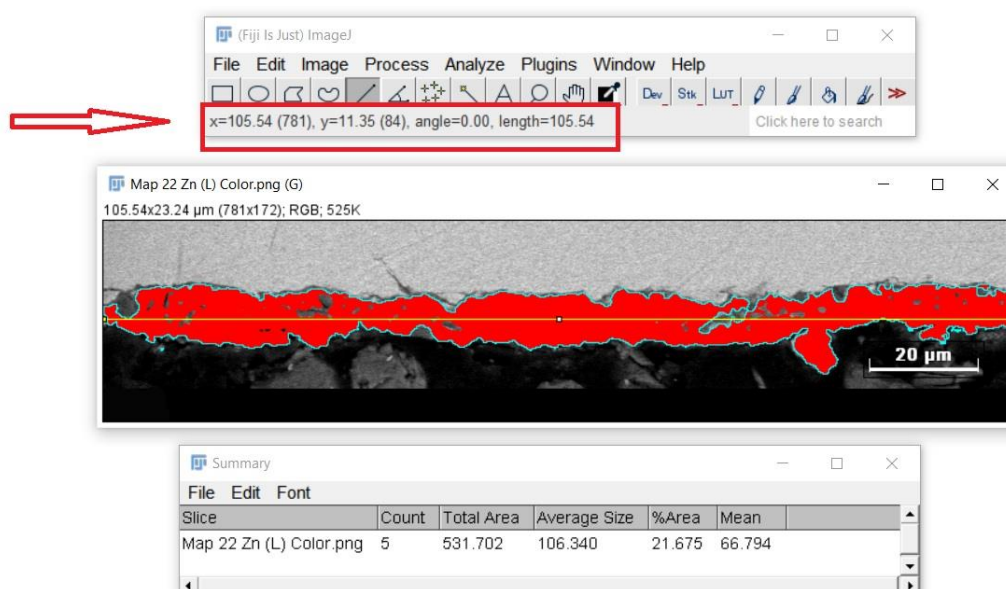
Fonte: AUTOR

Figura 9 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 9 (Tabela 4).



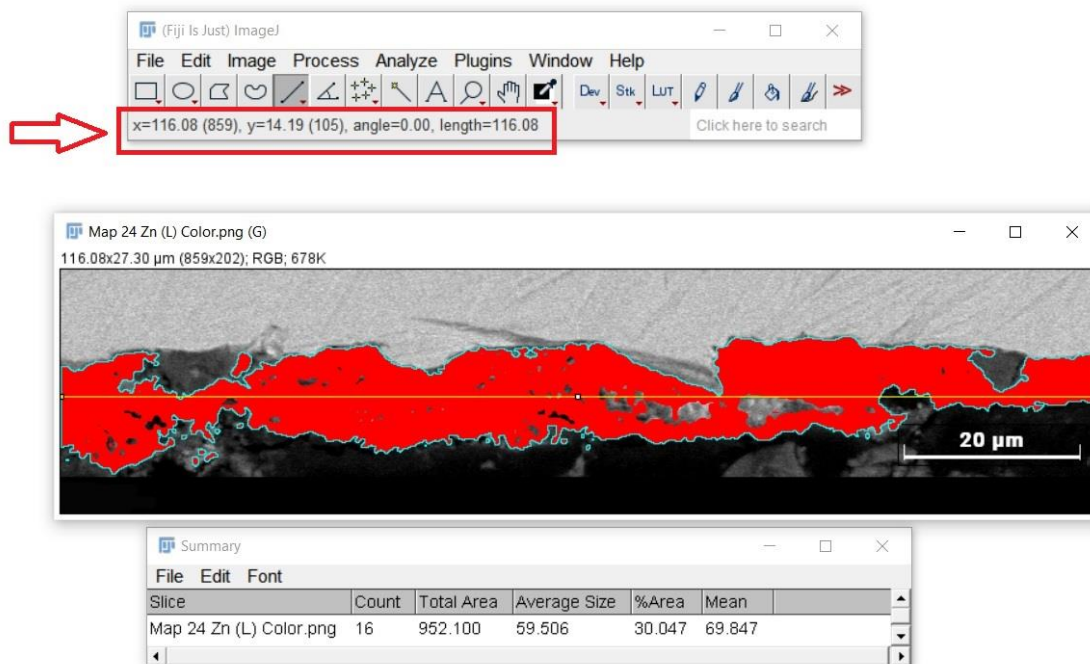
Fonte: AUTOR

Figura 10 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 10 (Tabela 4).



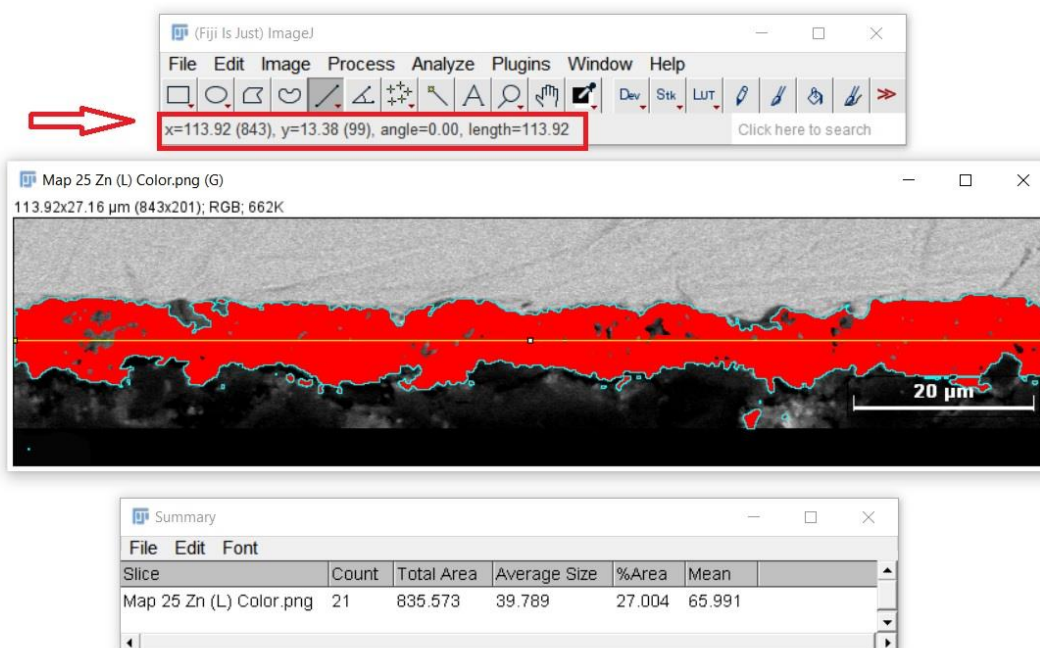
Fonte: AUTOR

Figura 11 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 11 (Tabela 4).



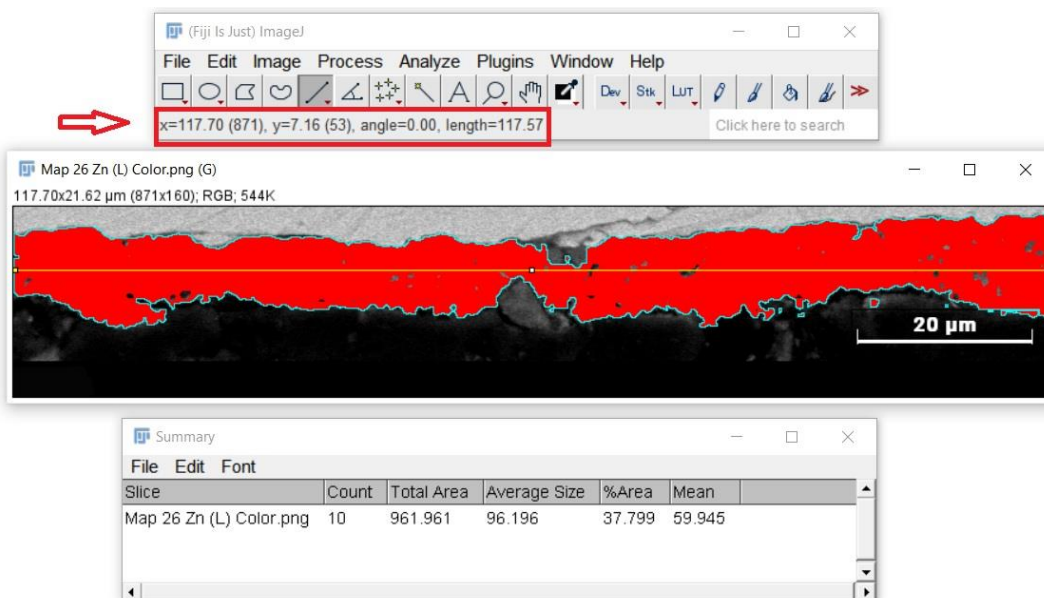
Fonte: AUTOR

Figura 12 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 12 (Tabela 4).



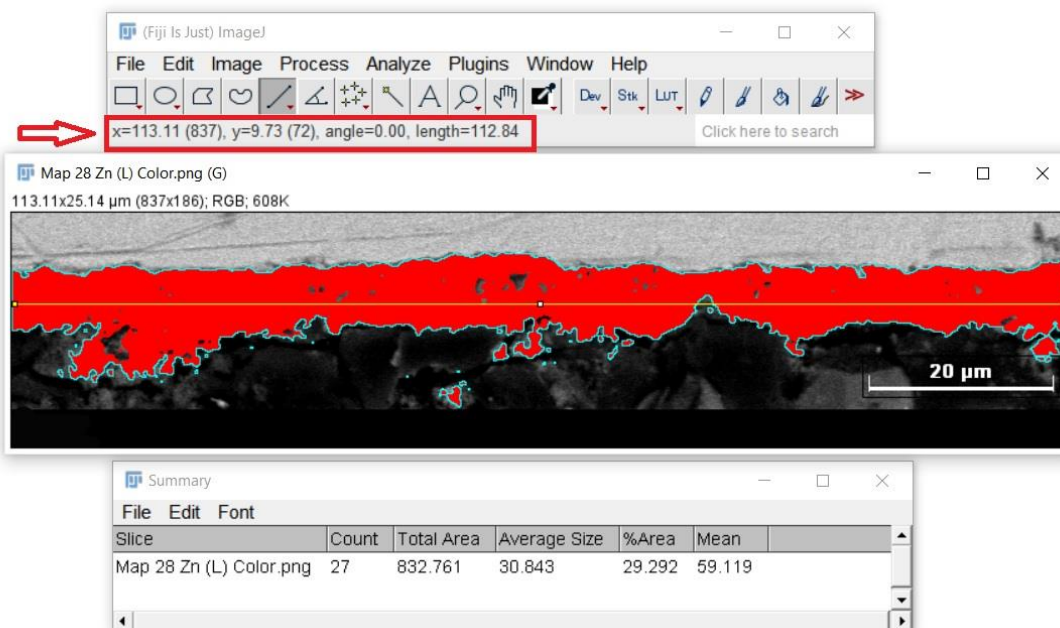
Fonte: AUTOR

Figura 13 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 13 (Tabela 4).



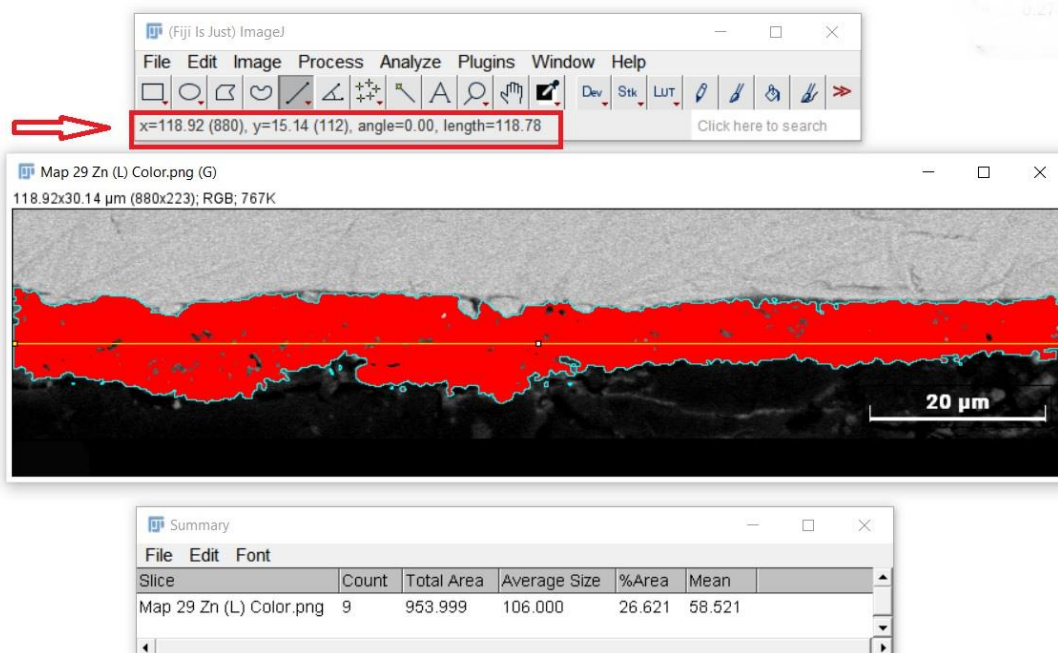
Fonte: AUTOR

Figura 14 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 14 (Tabela 4).



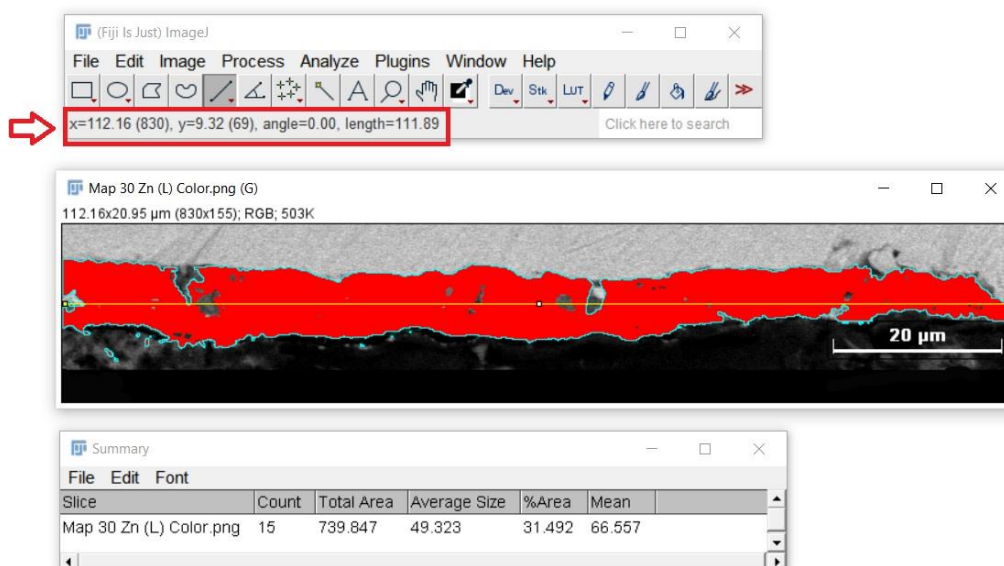
Fonte: AUTOR

Figura 15 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 15 (Tabela 4).



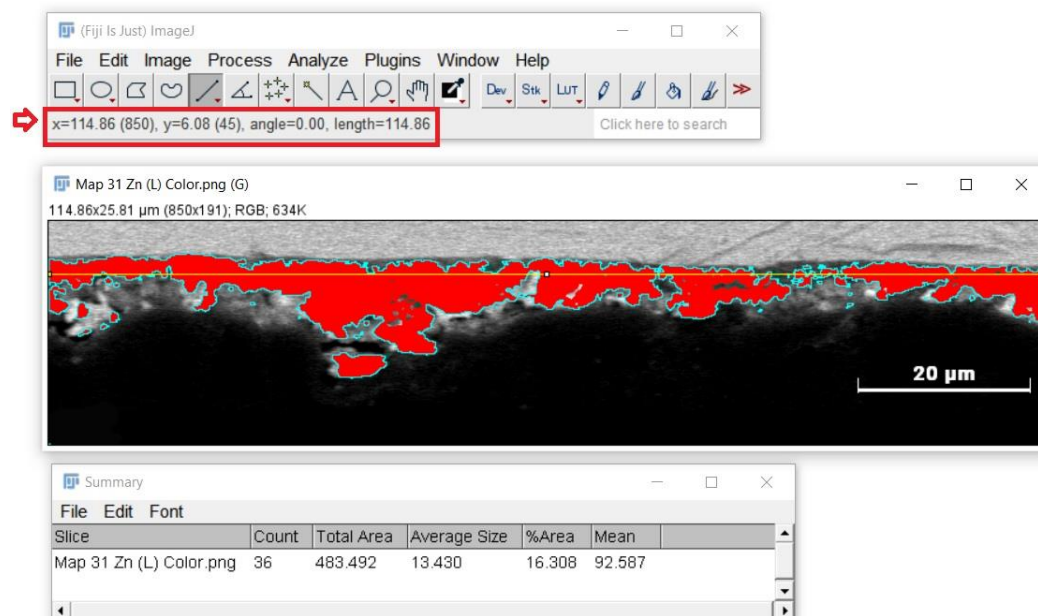
Fonte: AUTOR

Figura 16 — Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 16 (Tabela 4).



Fonte: AUTOR

Figura 17 - Medição da área e comprimento camada zincada. Referente Mapeamento 17 (Tabela 4).

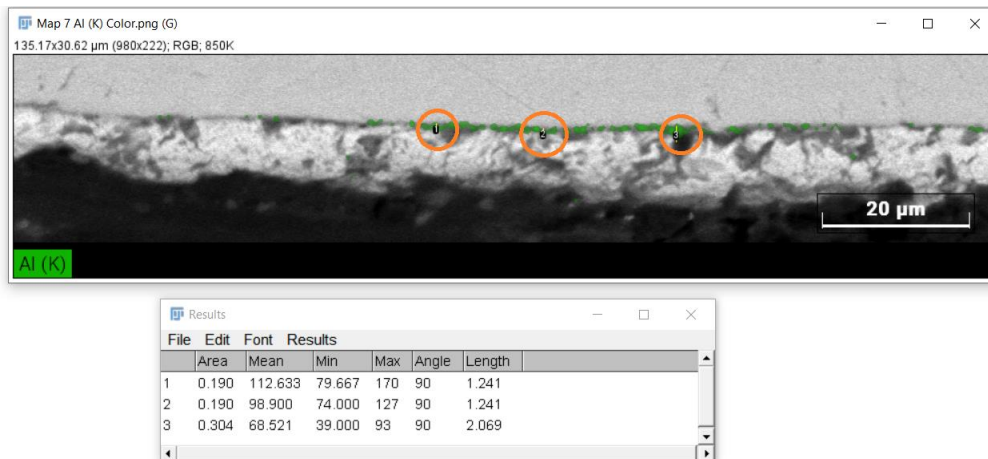


Fonte: AUTOR

ANEXO 3

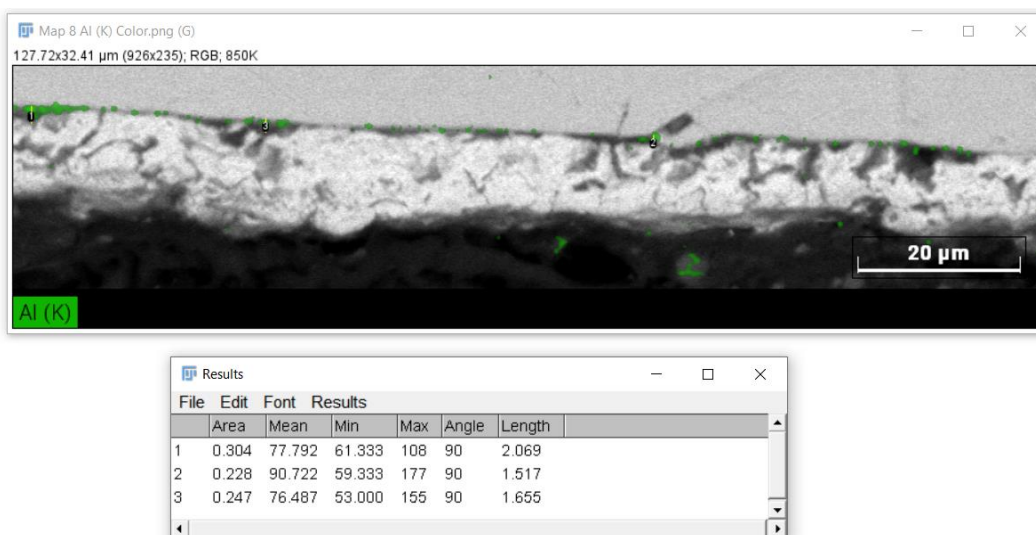
Medições da espessura da camada inibidora. Os dados obtidos nas imagens deste anexo são referentes à Tabela 5.

Figura 1 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 1 (Tabela 5).



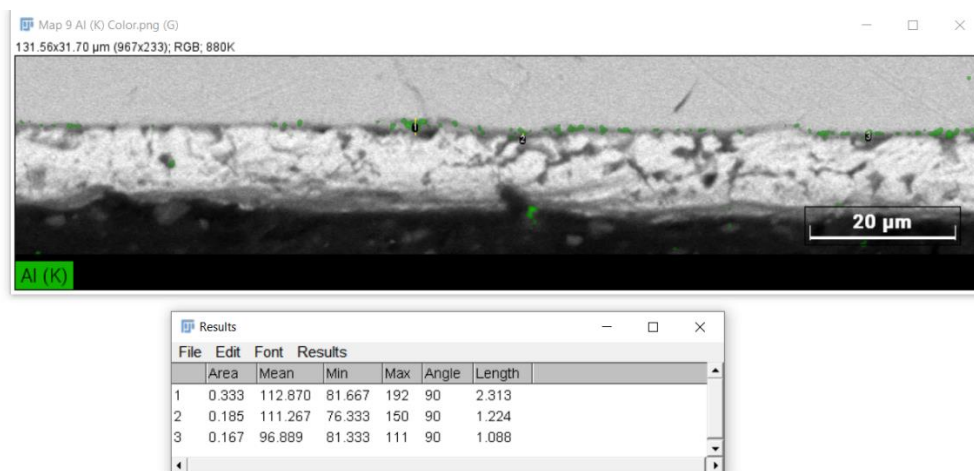
Fonte: AUTOR.

Figura 2 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 2 (Tabela 5).



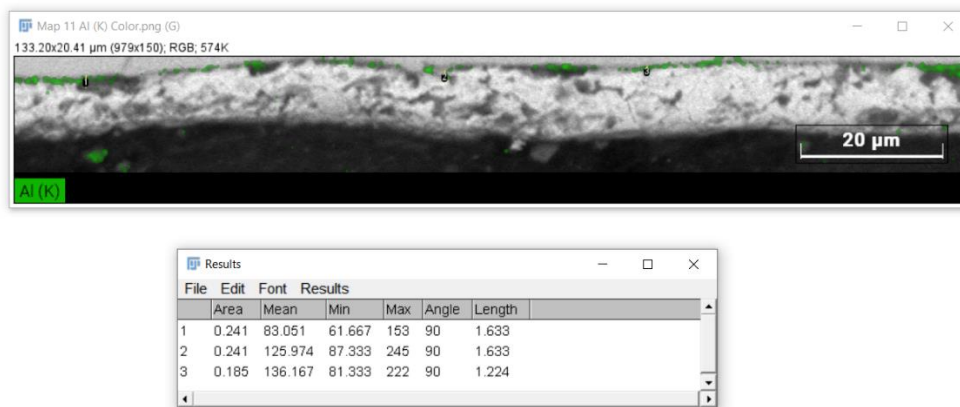
Fonte: AUTOR.

Figura 3 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 3 (Tabela 5).



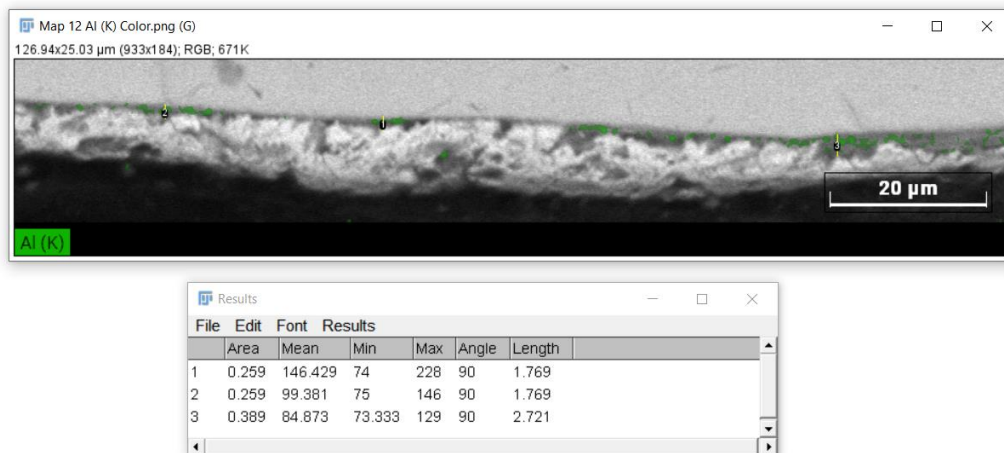
Fonte: AUTOR.

Figura 4 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 4 (Tabela 5).



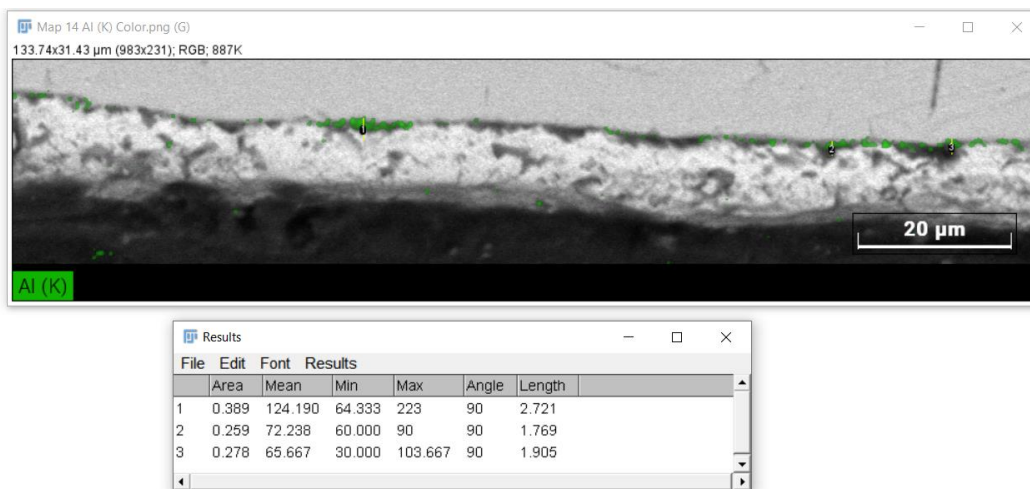
Fonte: AUTOR.

Figura 5 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 5 (Tabela 5).



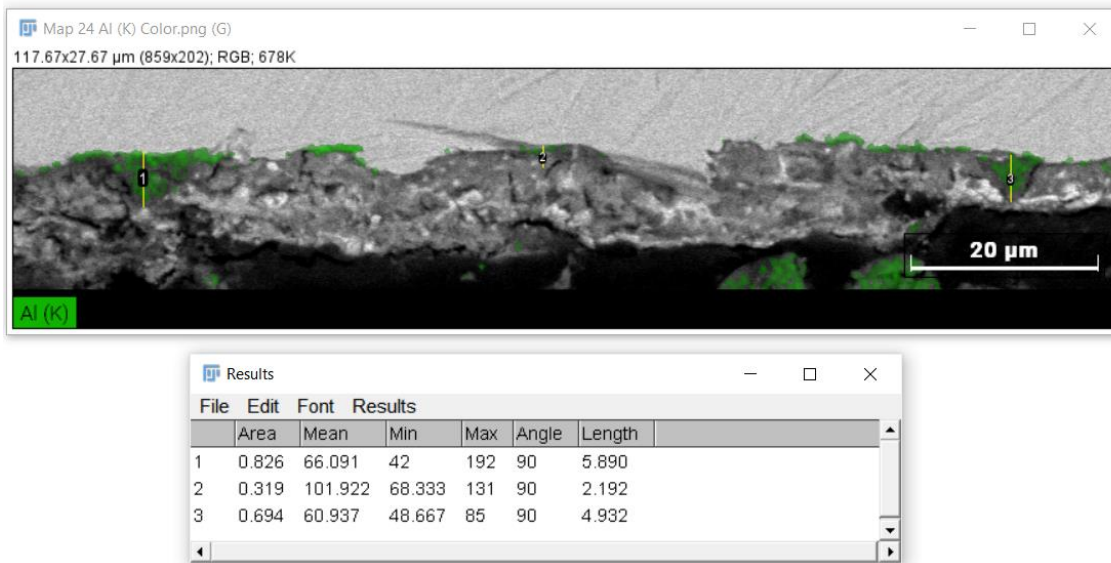
Fonte: AUTOR.

Figura 6 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 6 (Tabela 5).



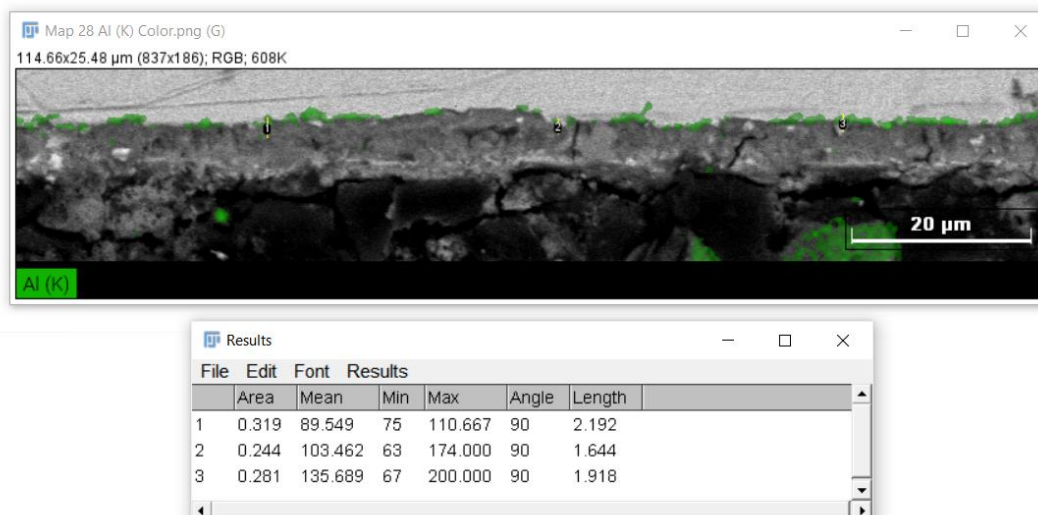
Fonte: AUTOR.

Figura 7 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 7 (Tabela 5).



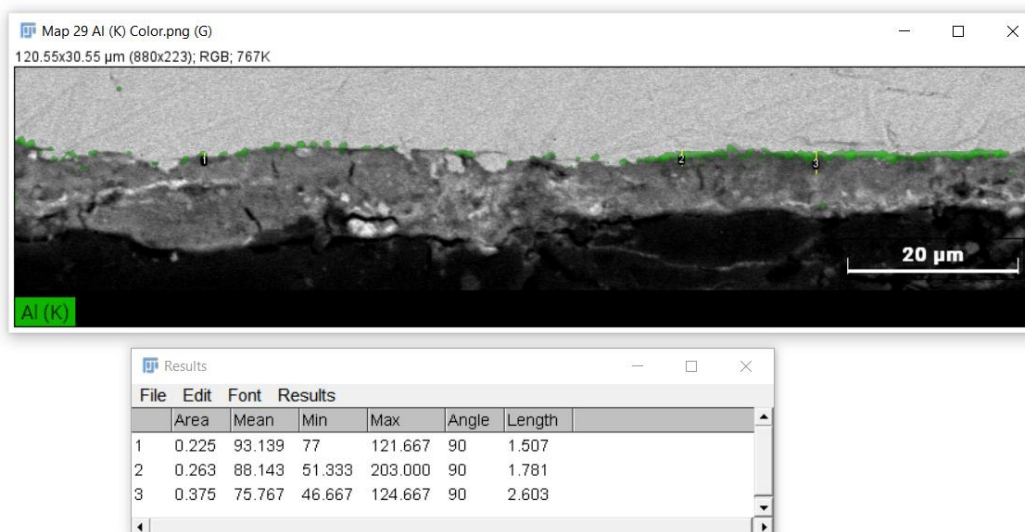
Fonte: AUTOR.

Figura 8 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 8 (Tabela 5).



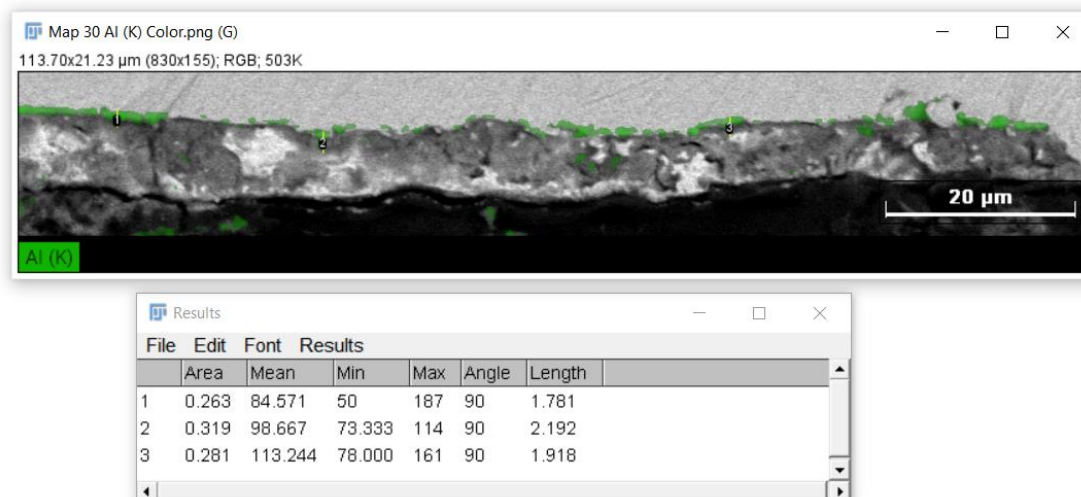
Fonte: AUTOR.

Figura 9 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 9 (Tabela 5).



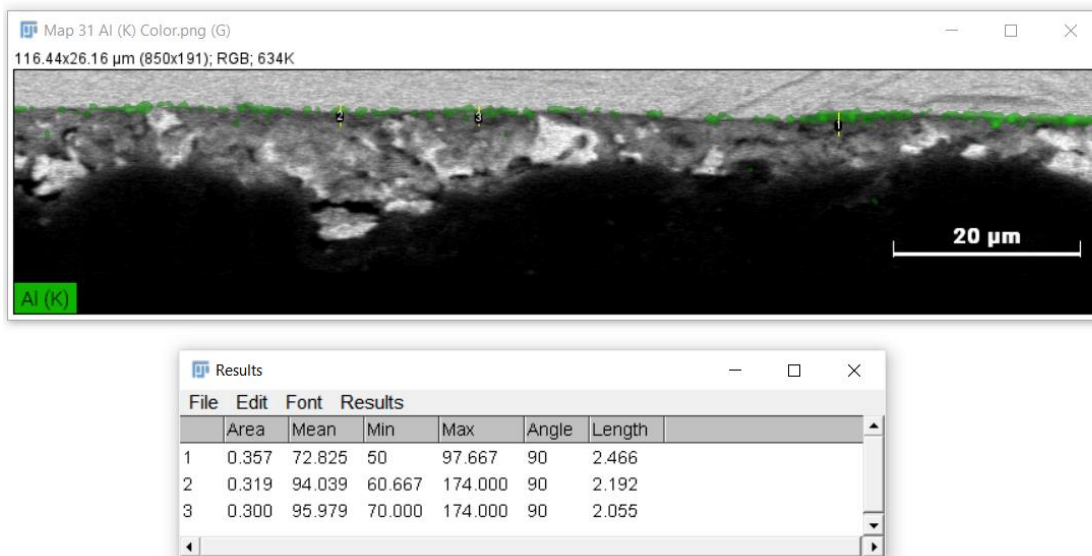
Fonte: AUTOR.

Figura 10 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 10 (Tabela 5).



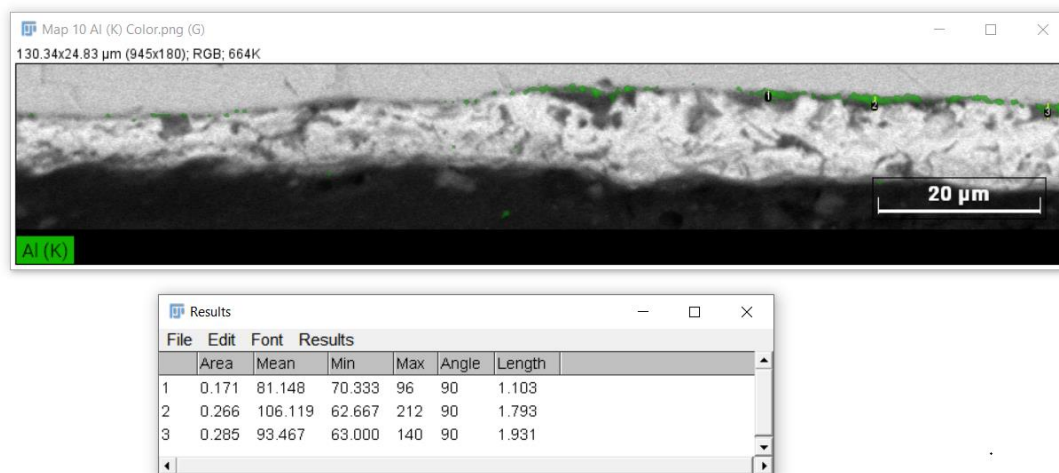
Fonte: AUTOR.

Figura 11 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 11 (Tabela 4).



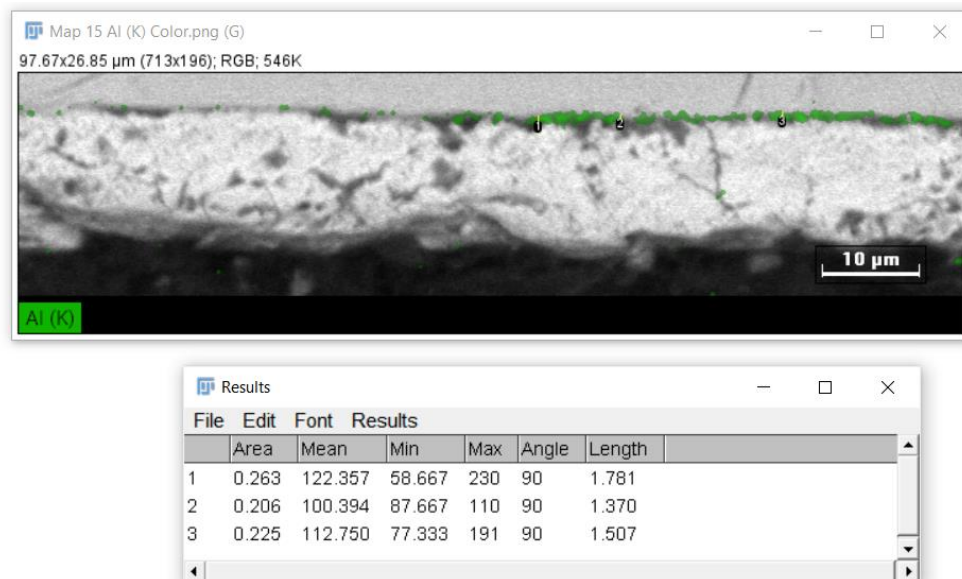
Fonte: AUTOR.

Figura 12 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 12 (Tabela 5).



Fonte: AUTOR.

Figura 13 – Medições espessura camada inibidora. Referente Mapeamento 13 (Tabela 5).

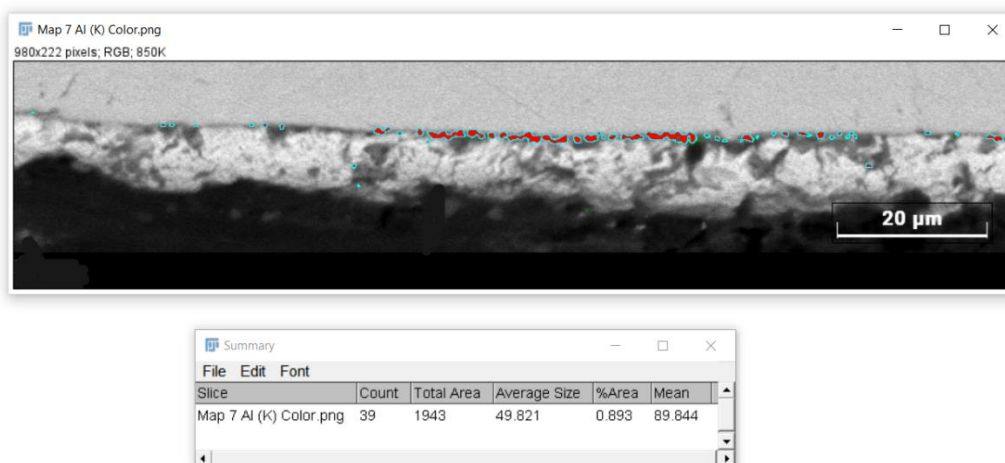


Fonte: AUTOR.

ANEXO 4

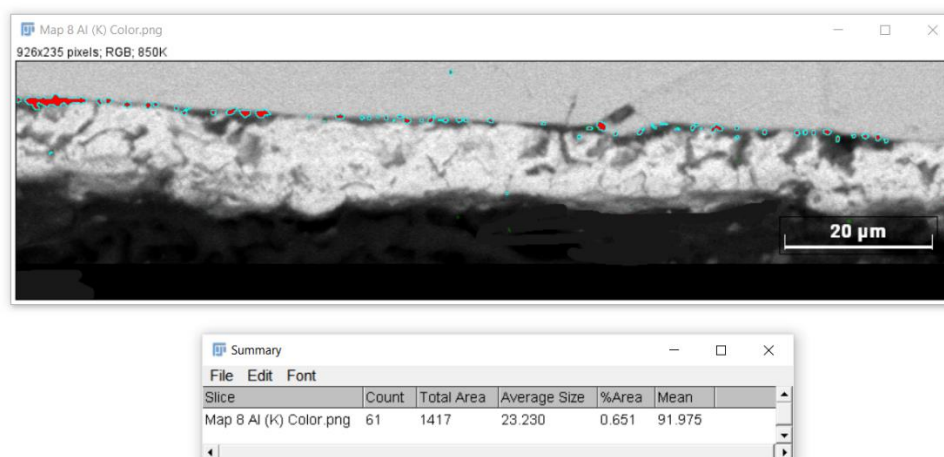
Imagens contendo medição de porcentagem de alumínio. Dados referentes aos mapeamentos descritos na Tabela 5.

Figura 1 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 1 (Tabela 6).



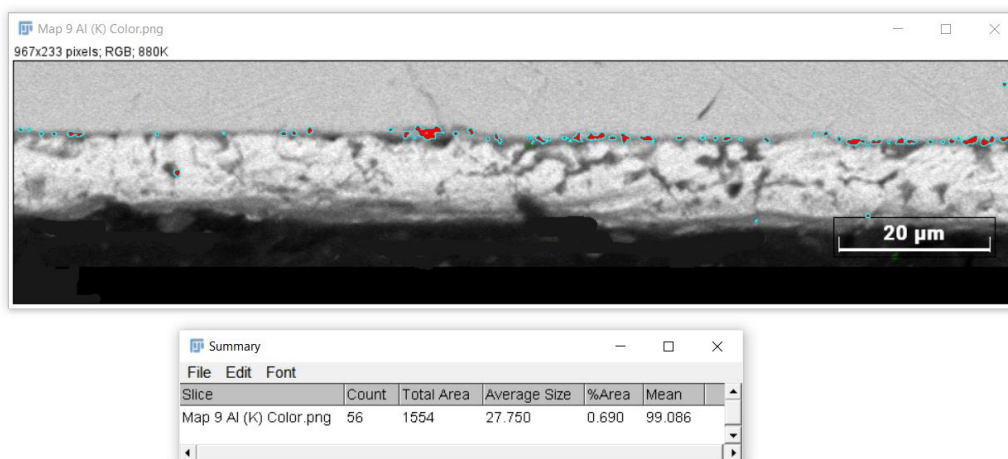
Fonte: AUTOR.

Figura 2 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 2 (Tabela 6).



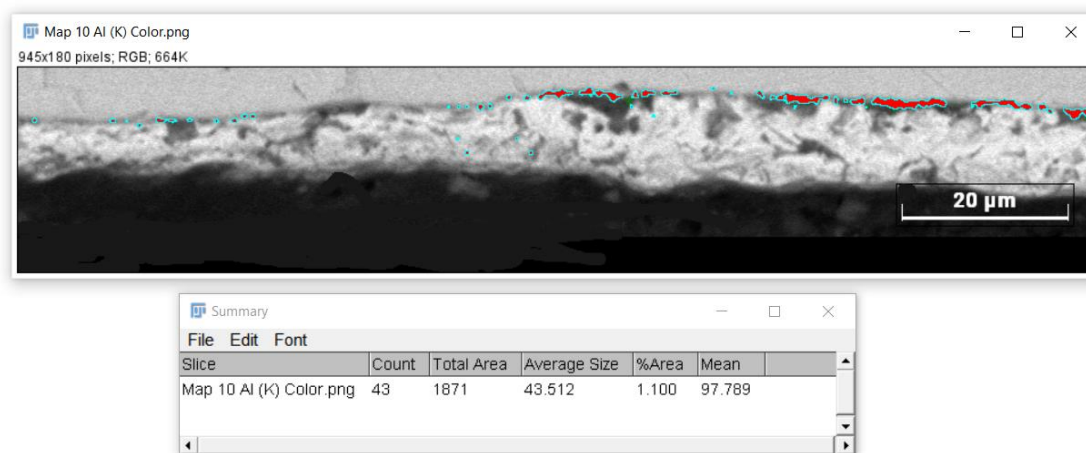
Fonte: AUTOR.

Figura 3 – Medições percentagem de alumínio. Referente Mapeamento 3 (Tabela 6).



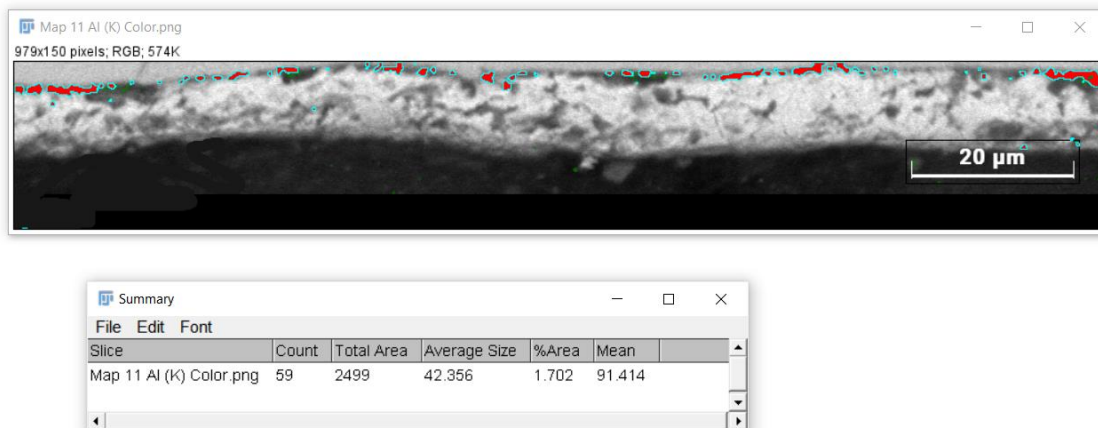
Fonte: AUTOR.

Figura 4 – Medições percentagem de alumínio. Referente Mapeamento 4 (Tabela 6).



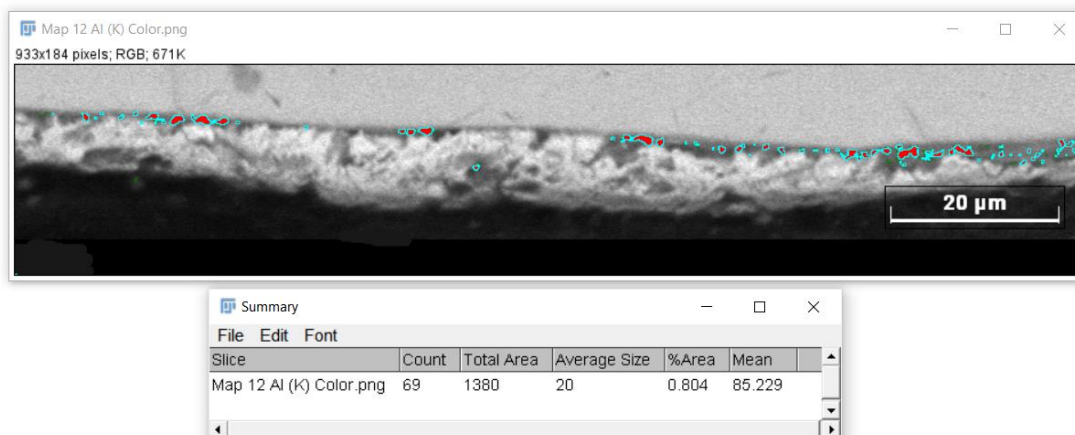
Fonte: AUTOR.

Figura 5 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 5 (Tabela 6).



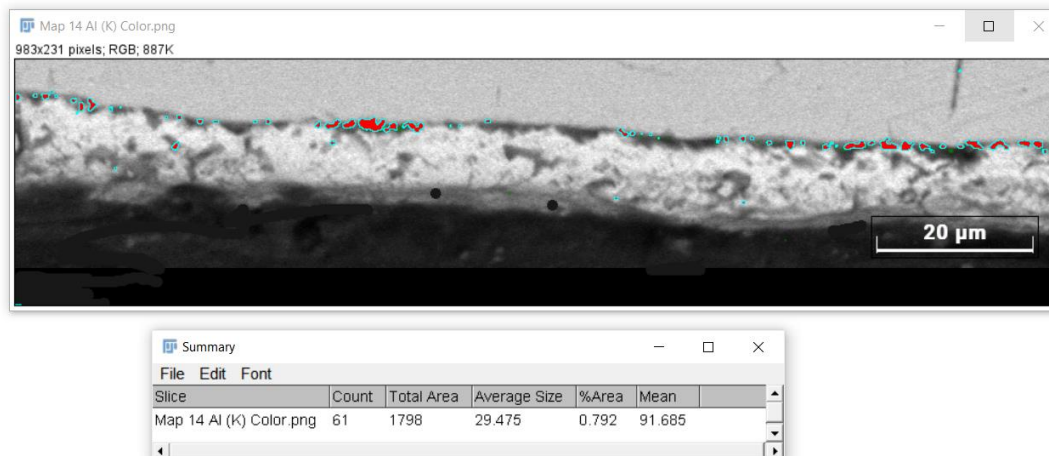
Fonte: AUTOR.

Figura 6 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 6 (Tabela 6).



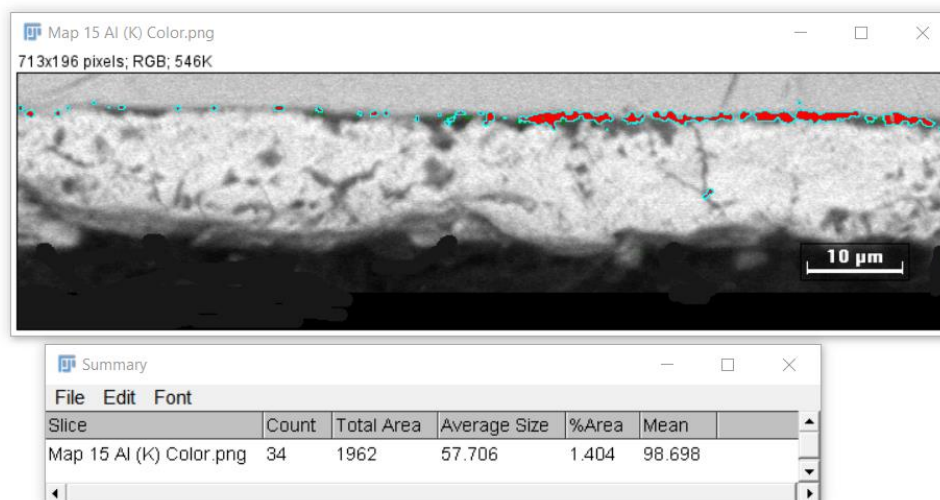
Fonte: AUTOR.

Figura 7 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 7 (Tabela 6).



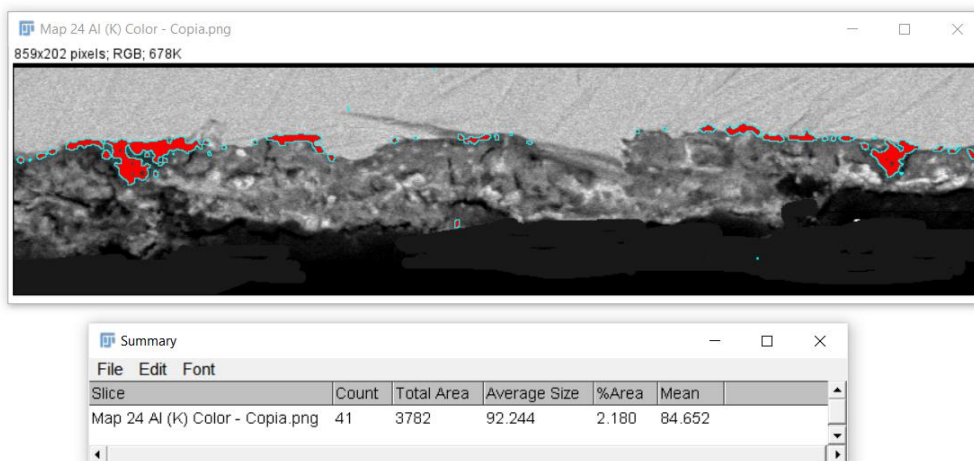
Fonte: AUTOR.

Figura 8 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 8 (Tabela 6).



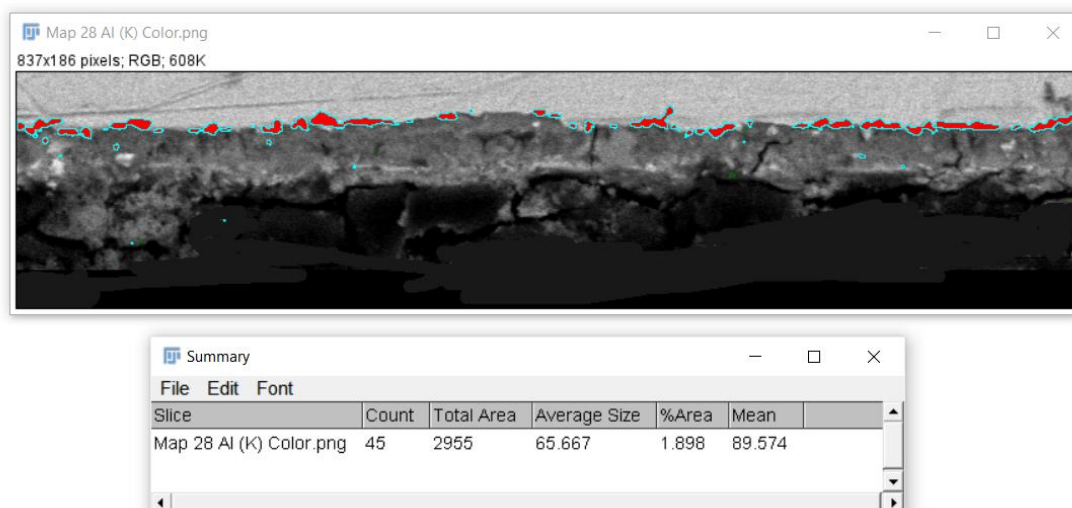
Fonte: AUTOR.

Figura 9 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 9 (Tabela 6).



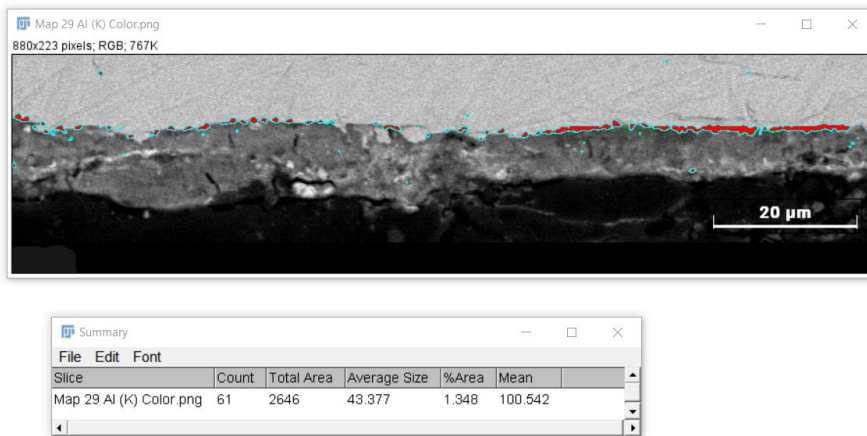
Fonte: AUTOR.

Figura 10 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 10 (Tabela 6).



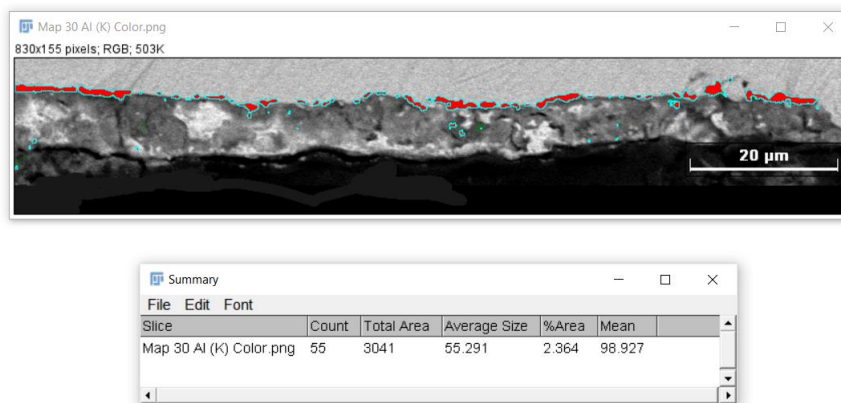
Fonte: AUTOR.

Figura 11 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 11 (Tabela 6).



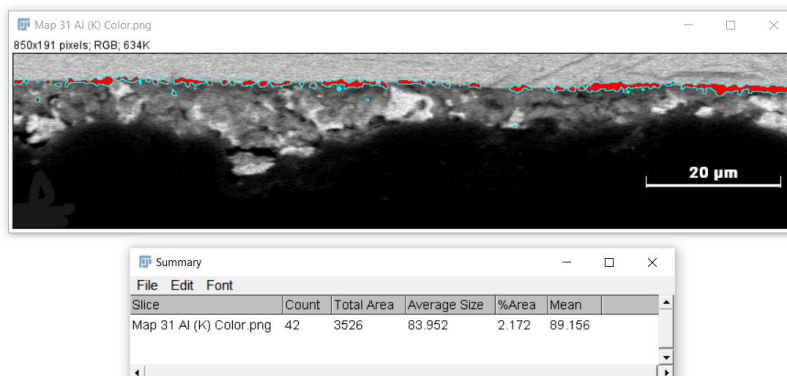
Fonte: AUTOR.

Figura 12 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 12 (Tabela 6).



Fonte: AUTOR.

Figura 13 – Medições porcentagem de alumínio. Referente Mapeamento 13 (Tabela 6).



Fonte: AUTOR.