



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL DE IMAGENS PARA ANÁLISE DE
DESCONTINUIDADES DE SOLDAGEM EM BICICLETAS**

LUCAS SILVA COSTA

**Orientador: Prof. Franciéric Alves de Araújo
Co-Orientador: Prof. Ayrton de Sá Brandim**

TERESINA - PI

2020

LUCAS SILVA COSTA

**PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL DE IMAGENS PARA ANÁLISE DE
DESCONTINUIDADES DE SOLDAGEM EM BICICLETAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Franciéric Alves de Araújo
Co-Orientador: Prof. Ayrton de Sá Brandim

TERESINA - PI

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Costa, Lucas Silva

C837p Processamento computacional de imagens para análise de
descontinuidades de soldagem em bicicletas / Lucas Silva Costa. - 2020.
96 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal do
Piauí, Campus Teresina Central, 2020.

Orientador : Prof. Dr. Franciêric Alves de Araújo.

Coorientador : Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim.

1. Processamento computacional de imagens. 2. Plugin. 3.
Descontinuidades de soldagem . 4. Bicicleta. I.Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ - IFPI
CAMPUS TERESINA CENTRAL / DIRETORIA DE PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS / PPG-EM
Praça da Liberdade, 1597 - Centro - Teresina - PI, CEP. 64.000-040
Fone: (86) 3131 - 9468 endereço eletrônico: <http://ppgem.ifpi.edu.br/hom>

LUCAS SILVA COSTA

PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL DE IMAGENS PARA ANÁLISE DE
DESCONTINUIDADES DE SOLDAGEM EM BICICLETAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

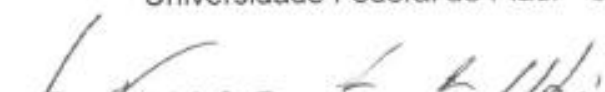
Aprovada em: 12/03/2020

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Franciêric Alves de Araújo (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI


Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim (Co-Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI


Profª. Drª. Tatianny Soares Alves (Avaliadora Externa)
Universidade Federal do Piauí - UFPI


Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho (Avaliador Interno)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente em memória ao meu pai, Luís Bispo Silva Costa, que sempre me ensinou o valor dos estudos e como eles engrandecem o ser humano.

A minha mulher, Paolla Ruana da Silva Matos, a quem admiro e amo muito, e em toda essa trajetória me incentivou e apoiou acreditando sempre em mim mais até do que eu mesmo.

A minha mãe, Maria das Graças da Silva

Ao meu orientador, Franciéric Alves de Araújo, que sempre acreditou em minha capacidade de melhorar e aprender mais, me auxiliando sempre em tempo hábil.

Aos meus amigos: Rui Barros e Pedro Veras ambos estagiários que me ajudaram em todos os testes de soldagem.

A Jefferson Rafael Nery por contribuir com a obtenção de amostras e por seu conhecimento ímpar sobre soldagem

Ao supervisor de engenharia Vinicius Leão por seu apoio e compreensão sobre a necessidade melhorias, e a todos que auxiliaram ao fornecimento de amostras.

A FAPEPI/CAPES por seu apoio financeiro, e sem ele essa pesquisa jamais seria possível.

A todos meus amigos e professores de mestrado que trabalharam junto para finalização de diversos artigos científicos.

RESUMO

O processamento computacional de imagens é um dos principais instrumentos para a investigação mais aprofundada em microscopias, e muito recorrente na metalurgia, permitindo estudo qualitativo e quantitativo referente a microestrutura abordada. Essa aplicação à tecnologia da soldagem possui poucos relatos de investigações, principalmente para análises em aços de baixo carbono, que são muito difundidos na indústria metal-mecânica. A soldagem em aços desse tipo é presente na produção de grande porte, como por exemplo, em quadros de bicicletas de passeio, que se apresentam como transporte barato e ecologicamente sustentável e em constante crescimento. O principal tipo de soldagem para a produção industrial de bicicletas feitas por quadros de aço, é a MIG/MAG, que por meio de seu método de soldagem semi-automático alcança altos índices de produtividade, porém descontinuidades na microestrutura da soldagem ocorrem, e podem prejudicar a produção. A análise por processamento computacional, utilizando softwares como o ImageJ, possibilita o desenvolvimento de um método padronizado e automatizado, aplicável em microscopias de soldagem, realizadas em tubos de aço com baixo teor de carbono. Tal padronização, por meio dessas ferramentas computacionais de investigação de micrografias, permite a criação de plugins dentro de um programa de análise, especificamente o ImageJ, ou seja, concede um novo registro de software patenteável que verifica a existência e identificação das descontinuidades de soldagem supracitadas.

Palavras-chave: Processamento computacional de imagens, Plugin, Descontinuidades de soldagem e Bicicleta.

ABSTRACT

Computational image processing is one of the main instruments for further investigation in microscopy, and is very recurrent in metallurgy, allowing for qualitative and quantitative study regarding the microstructure addressed. This application to welding technology has few reports of investigations, mainly for analysis on low carbon steels, which are very widespread in the metal-mechanical industry. Welding on steels of this type is present in large-scale production, such as, for example, on bicycle frames, which are presented as inexpensive and ecologically sustainable transport and in constant growth. The main type of welding for the industrial production of bicycles made by steel frames, is MIG / MAG, which through its semi-automatic welding method achieves high productivity rates, however discontinuities in the welding microstructure occur, and can harm production. The analysis by computational processing, using software such as ImageJ, allows the development of a standardized and automated method, applicable in welding microscopies, performed in steel tubes with low carbon content. Such standardization, through these computational tools of investigation of micrographs, allows the creation of plugins within an analysis program, specifically ImageJ, that is, it grants a new patentable software registration that verifies the existence and identification of the aforementioned welding discontinuities.

Keywords: Computational processing of images, Plugin, Welding discontinuities and Bicycle.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Elementos de um sistema de processamento de imagens.	15
Figura 2– Sistema de visão artificial.	16
Figura 3- Exemplo de análise por processamento computacional de imagem em microscopia de metal (a) a imagem completa com grades (b) mesma imagem, porém restrita a um setor.	19
Figura 4– Exemplo de segmentação: a) Imagem com tons de cinza, identificando fundo e objeto; b) Resultado da segmentação de tons de cinza	23
Figura 5 – Microscopia de aço SAE 1006, nital 2%, 2000x.	28
Figura 6– Método de representação esquemática de método de soldagem MIG/MAG tradicional.	29
Figura 7 – Tipos de operação de soldagem	30
Figura 8– Inclusões em soldagem.	32
Figura 9 – Microscopia de soldagem em liga de aço baixo carbono com inclusões destacadas.	33
Figura 10 – Impurezas, o que caracteriza inclusões em soldagem.	34
Figura 11 - Micrografias ópticas indicando a propagação de trincas na soldagem de Liga metálica	35
Figura 12– Trincas representadas nos pontos indicados pelas setas	35
Figura 13– Microscopia de soldagem em liga de zinco com porosidades destacadas por meio de circunferências em amarelo.	36
Figura 14 – Porosidade em microscopia de soldagem b) Ampliação interna a porosidade anterior revelando micro-poros	37
Figura 15– Simulação de secção de soldagem com falta de fusão/penetração na região fundida em liga de alumínio.	38
Figura 16– Gabarito de soldagem	41
Figura 17- Bicicleta na máquina de soldagem.	42
Figura 18– Layout de fluxo produtivo em soldagem	43
Figura 19– Ensaio de fadiga em quadro de bicicleta.	44
Figura 20– Região analisada.	45
Figura 21 - Região para análise de soldagem.	45
Figura 22– Embutimento de amostras.	46
Figura 23– Politriz para lixamento e polimento.	47
Figura 24– Modo de lixamento	47
Figura 25– Microscópio Olympus BX51M	48
Figura 26 – Fluxograma de análise computacional de imagens.	50
Figura 27 – Intensidade de Pixel mostrada em superfícies morfológica	52
Figura 28 – Histogramas de segmentação para espaço de cores	53
Figura 29 - Parâmetros utilizados pelo plugin Auto Threshold	54
Figura 30 - Sequência de Processamento de imagens: a) Imagem do microscópio; b) Pré processamento com Color Threshold; c) Imagem em 8bits; d) Segmentação Default; e) Mediana com Median.	55
Figura 31 - Amostras dos dados das imagens binárias representando trincas, falta de penetração/fusão, porosidades e inclusões sólidas.	57
Figura 32 - Análise de forma de partículas de rególito lunar de seções finas por Diâmetro Feret	62
Figura 33- Plugin de Identificação de existência de descontinuidade	64

Figura 34 – Amostras Processadas para análise de existência de descontinuidades de soldagem: a) Amostra 01; b) Amostra 02; c) Amostra 03; d) Amostra 04; e) Amostra 05; f) Amostra 06; g) Amostra 07; h) Amostra 08 ; i) Amostra 09; j) Amostra 10; l) Amostra 11; m) Amostra 12.	65
Figura 35 - Plugin de Identificação de Porosidade	68
Figura 36 – Processamento de amostra 01.....	68
Figura 37 – Erro em amostragem de fração de área da amostra 01	69
Figura 38 - Plugin de Identificação de Inclusão	73
Figura 39 - Plugin de Identificação de Ausência de fusão/penetração	75
Figura 40 - Processamento de amostra 12.	76
Figura 41 – Gráfico de Tons de cinza por pixel da amostra 08.....	78
Figura 42 – Análise por tons de cinza em amostras com ausência de fusão/penetração: a) Amostra 02; b) Amostra 04; c) Amostra 08; d) Amostra 12	79
Figura 43 - Plugin de Identificação de Trinca	80
Figura 44 – Amostras processadas após modificações de parâmetros de soldagem: a) Amostra 13; b) Amostra 14; c) Amostra 15; d) Amostra 16; e) Amostra 17; f) Amostra 18; g) Amostra 19; h) Amostra 20 ; i) Amostra 21; j) Amostra 22; l) Amostra 23; m) Amostra 24.	83
Figura 45 – Microscopias de soldagem: a) Amostra 01; b) Amostra 02; c) Amostra 03; d) Amostra 04; e) Amostra 05; f) Amostra 06; g) Amostra 07; h) Amostra 08 ; i) Amostra 09; j) Amostra 10; l) Amostra 11; m) Amostra 12.	96
Figura 46 - Microscopias de soldagem: a) Amostra 13; b) Amostra 14; c) Amostra 15; d) Amostra 16; e) Amostra 17; f) Amostra 18; g) Amostra 19; h) Amostra 20 ; i) Amostra 21; j) Amostra 22; l) Amostra 23; m) Amostra 24.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Componentes microestrutura de aço SAE 1006	27
Tabela 2– Dados soldagem	42
Tabela 3 – Resultados de porosidade para amostra 01	69
Tabela 4 - Resultados de porosidade para amostra 03	70
Tabela 5 - Resultados de porosidade para amostra 04	70
Tabela 6 - Resultados de porosidade para amostra 05	70
Tabela 7 - Resultados de porosidade para amostra 06	71
Tabela 8 - Resultados de porosidade para amostra 08	71
Tabela 9 - Resultados de porosidade para amostra 10	71
Tabela 10 - Resultados de porosidade para amostra 11	72
Tabela 11 - Resultados de inclusão para amostra 04	74
Tabela 12 - Resultados de inclusão para amostra 08	74
Tabela 13 - Resultados de inclusão para amostra 12	74
Tabela 14 - Resultados de ausência de fusão/penetração para amostra 02	76
Tabela 15- Resultados de ausência de fusão/penetração para amostra 04	77
Tabela 16- Resultados de ausência de fusão/penetração para amostra 08	77
Tabela 17- Resultados de ausência de fusão/penetração para amostra 12	77
Tabela 18 - Tabela geral de descontinuidades identificadas	81
Tabela 19 – Tempos de soldagem	82

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivos	14
1.1.1 Geral.....	14
1.1.2 Específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Processamento computacional de imagem.....	15
2.1.1 Aplicação em Engenharia de Materiais	17
2.2 Pré-processamento	19
2.3 Segmentação	22
2.4 Pós-Processamento	23
2.5 Reconhecimento de padrões.....	24
2.6 Extração de características	25
2.7 Aço SAE 1006	27
2.8 Soldagem MIG/MAG	29
2.9 Descontinuidades de Soldagem.....	31
2.9.1 Inclusão	32
2.9.2 Trincas.....	33
2.9.3 Porosidade	36
2.9.4 Falta de fusão/penetração	37
2.10 Trabalhos relacionados	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Soldagem de bicicletas.....	41
3.2 Obtenção de amostra	43
3.3 Metalografia de materiais	46
3.4 Aquisição de imagens.....	48
3.5 Processamento computacional de imagens microscópicas	50
3.5.1 Identificação de existência das descontinuidades	51
3.5.2 Identificação do tipo de descontinuidade.....	56
3.5.2.1 Porosidade	58
3.5.2.2 Inclusão	60
3.5.2.3 Ausência de fusão/penetração	60
3.5.2.4 Trincas.....	63
4. RESULTADOS.....	63
4.1. Existência de descontinuidades	63
4.2. Identificação de descontinuidades.....	67
4.2.1. Porosidades	67
4.2.2. Inclusão	72
4.2.3. Ausência de fusão/penetração	75
4.2.4. Trincas.....	80
4.2.5 Resultados de amostras retiradas de Processo Produtivo	81
4.3. Modificações de parâmetros	82
5. CONCLUSÃO	85
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	86
7. APÊNDICE	96
7.1. Amostras antes de modificação (diretamente de setor produtivo).....	96
7.2. Amostras depois de modificação (diretamente de setor produtivo)	98
7.3. Links para Plugins	100

1. INTRODUÇÃO

A soldagem consiste na união de duas peças metálicas por meio de aplicação de energia, que varia em intensidade dependendo das características das estruturas a serem unidas. Dentre os tipos de soldagem o método GMAW (Gas Metal Arc Welding), representa àqueles que utilizam gases de proteção, inativo ou ativo, respectivamente chamado de MIG/MAG (Metal Inative Gas/Metal Active Gas), muito difundido na indústria metal-mecânica. Porém, segundo Veiga (2011) a soldagem do tipo MIG/MAG possui diversas limitações: a ausência de fusão suficiente, limitação das espessuras de material base até 50 mm, risco de inclusões com dióxido de carbono e grande sensibilidade em casos com presença de correntes de ar.

Estas limitações podem levar ao surgimento de algumas descontinuidades, microestrutura sem homogeneidade e que podem ser detectadas microscopicamente. A análise microscópica pode indicar quais as principais descontinuidades, sinalizando assim, a presença de problemas no processo, na técnica ou em parâmetros ocorridos durante a soldagem. Ferramentas, como o processamento computacional de imagens, auxilia a análise microscópica, automatizando ou padronizando o processo de investigação das descontinuidades.

A aplicação do processamento computacional de imagens é citada em Zhou *et. al* (2018) como um objeto de crescente interesse para análise microscópica, pois possui grande aplicabilidade no aprimoramento de informações para interpretação humana, visto que a automatização reduz a incidência de erros, além de ampliar a velocidade de análise.

As vantagens no processamento de imagens com descontinuidades em cordões de soldagem, contribuem para instaurar procedimento padrão para essa análise em aços específicos. No estudo de Da Silva (2017), a análise microestrutural de soldagem possui o estabelecimento de método baseado em processamento de imagens para estabelecer parâmetros para análise mecânica.

As descontinuidades analisadas podem causar redução da resistência mecânica, visto que, nas estruturas metálicas a região soldada e sua zona termicamente afetada (ZTA) geralmente são as regiões com maior recorrência de falhas mecânicas, considerando que estruturas metálicas que sofrem tensão e fadiga.

Em Norton (2013) e Villani (2016) é citado que a região soldada apresenta maior incidência de falhas estruturais, intensificadas com a presença de descontinuidades.

Essa presença de descontinuidades se tornou um grande obstáculo na produção em massa de quadros de bicicleta, feitas em aço de baixo carbono, para a indústria de bicicletas em questão. O produto exige muitas regiões soldadas, sendo a qualidade do produto como um todo, é muito afetada pelas possíveis descontinuidades de soldagem existentes, possibilitando comprometer resultado final na bicicleta.

A qualidade final para um quadro, produzido nacionalmente, é especificada segundo a norma NBR ABNT 14714 (2013) da Associação Brasileira de normas técnicas. Assim os ensaios de fadiga e de impacto que devem ser submetidos, conferem confiabilidade para qualquer geometria de bicicleta.

Logo, a qualidade do quadro da bicicleta é influenciada diretamente pela qualidade de soldagem, proporcional ao mínimo de descontinuidades estruturais, que podem ser analisadas microscopicamente com auxílio de mecanismos de processamento computacional de imagens. Essa análise pode indicar as principais causas de ocorrência dessas descontinuidades na microestrutura soldada, visto que cada descontinuidade possui, especificamente, uma quantidade de causas associadas.

Ao identificar as principais causas, é possível sugerir alterações em parâmetros, técnicas, ou método produtivo, que ocasionem em melhoria da qualidade final da bicicleta produzida, mantendo nível de produção e ampliando a confiabilidade.

Por meio do processamento computacional de imagens das descontinuidades, presentes na microestrutura soldada, é possível conferir uma padronização e maior confiabilidade de resultados, proporcionando melhor compreensão na queda de qualidade dos quadros de bicicleta, para indicar principais causas e modificá-las.

1.1. Objetivos

1.1.1 Geral

A análise busca, por meio de técnicas no processamento computacional de imagens, implementar um método padrão para a investigação de descontinuidades, como porosidades, falta de penetração, inclusões e trincas. Esse método possibilitaria visualizar e identificar essas descontinuidades, na microestrutura da soldagem MIG/MAG, em tubos com baixo índice de carbono, unindo a velocidade e confiabilidade dos processos computacionais com a aplicação na indústria de bicicletas, que utiliza esse tipo de aço (SAE 1006), e possui especificamente problemas de descontinuidades relacionadas às soldagens de seus quadros. Tal investigação, permite o desenvolvimento de plugins, que automatizam o processo de análise de micrografias, permitindo implementar criação de novo software patenteável.

1.1.2 Específicos

O principal objetivo do estudo é a padronização de uma metodologia para investigação e análise de descontinuidades na soldagem, por meio de implementação de plugins, com foco em:

- 1) Identificar a existência de descontinuidades de soldagem por meio de Processamento Digital de Imagens (PDI) com método padronizado.
- 2) Distinguir possíveis tipos de descontinuidades, caso existentes.
- 3) Quantificar e mensurar o grau das descontinuidades, apresentando-o ou não como um defeito.
- 4) Implementar mudanças nos parâmetros e/ou métodos de soldagem, para assim corrigir a presença das descontinuidades, caso estas se apresentem como prejudiciais a estrutura soldada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

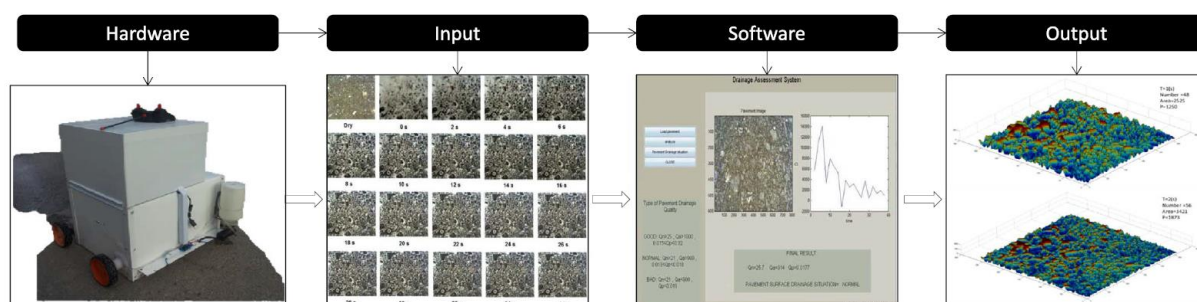
2.1 Processamento computacional de imagem

A definição de imagem é essencial para a correta compreensão do seu processamento digital. Para Gonzalez & Woods (2018), essa definição é baseada na percepção visual humana, onde a imagem é considerada uma projeção na retina que atua como um plano dos raios luminosos provenientes do espaço com objetos reais, em forma de onda eletromagnética. A imagem digital é um arquivo de computador composto basicamente por um cabeçalho, com diversas informações, e uma matriz de números, onde cada um deles identifica a cor ou Intensidade do pixel e posição correspondente na imagem.

O pixel é um ponto num plano bidimensional com intensidade luminosa conhecida que se apresenta como pequena parte da projeção da imagem caracterizando-se como valor unitário, elemento básico formador da imagem. A imagem formada por esses pixels pode ser manipulada de forma a ampliar a visibilidade de elementos, em função de outros (Goldenstein, 2010).

Os principais elementos de PDI, o processamento digital de imagens, são: aquisição, processamento e saída. A aquisição é a parte de obtenção das imagens, chamado de *input*, o processamento é a transformação da imagem para linguagem de programação, podendo ser manipulada por meio de software, e a saída, chamada de *output* que é a visualização das imagens processadas em computador. A Figura 1 apresenta de forma esquemática os principais elementos de processamento computacional de imagens (Mataei *et. al*, 2018).

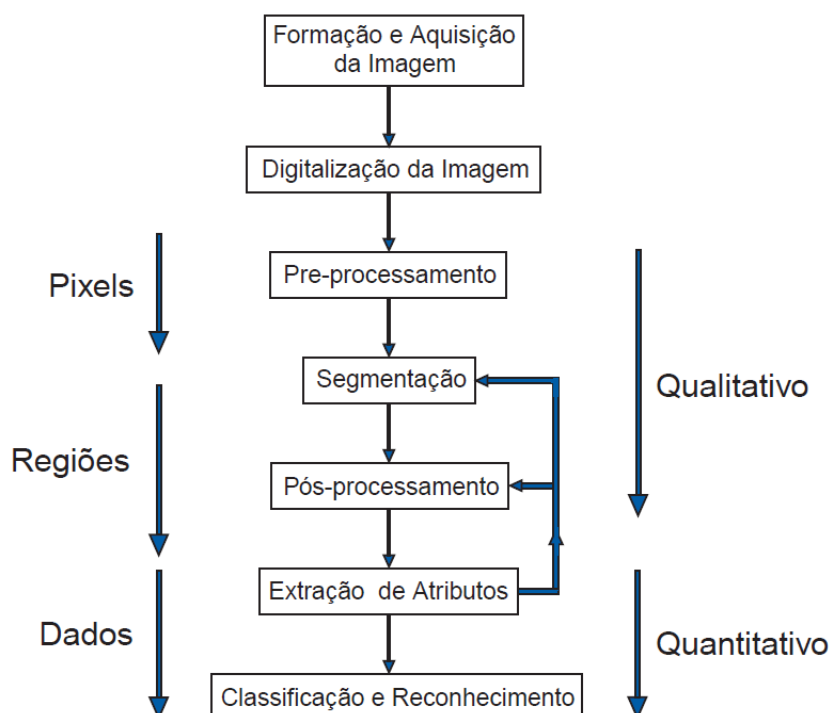
Figura 1- Elementos de um sistema de processamento de imagens.



Fonte: Mataei *et. al* (2018)

De forma mais concisa, por meio desse esquema é possível criar um sistema de visão artificial distribuído mais detalhado conforme a Figura 2.

Figura 2– Sistema de visão artificial.



Fonte: Gonzalez & Woods (2018).

A Figura 2 ilustra de forma esquematizada o sistema de visão artificial, guiada inicialmente pela captura e aquisição de imagens, seguindo para a digitalização, o pré-processamento, segmentação, pós-processamento, extração de atributos e classificação e reconhecimento de características.

A aquisição é a etapa de obtenção de imagens a serem analisadas com mínimo de ruídos possíveis, pois a imagem deve ser obtida de forma nítida. Essa imagem adquirida é digitalizada, porém, nos dias atuais, essa digitalização ocorre diretamente do microscópio óptico a um monitor (Mataei *et. al*, 2018)

O pré-processamento é etapa em que um conjunto de técnicas, com base em filtros, são aplicadas a imagem adquirida de forma a eliminar ruídos e/ou interferência que prejudiquem a análise correta da imagem computacional. A segmentação

acontece na sequência, possuindo maior grau de importância nos processamentos de imagem em geral, pois convertem os pixels a tons de cinza, contribuindo para manipulação de características que devam ser analisadas (Gonzalez & Woods 2018).

Após a segmentação, possíveis ruídos ou características indesejáveis a alguma análise em específico podem ter persistido, logo o pós-processamento atua como mecanismo para correção posterior. Essa etapa é sucedida da extração de atributos ou características que são reconhecidas e classificadas posteriormente. (Ferreira, 2012; Parcionick, 2010)

Essas etapas são discutidas de forma mais detalhada nos tópicos posteriores, com aplicação na metodologia de análise.

2.1.1 Aplicação em Engenharia de Materiais

O processamento computacional de imagens aplicado a microscopia, é um dos mecanismos para melhor compreender a Engenharia de Materiais, que dependendo das condições de processamento e da estrutura analisada, torna possível analisar constituintes microestruturais e até mesmo propriedades mecânicas. Esses resultados são obtidos por esteorologia dos materiais por meio de: distribuição espacial de determinados componentes das imagens, tamanho médio de grãos, medidas quantitativas, fração volumétrica e morfologia (Russ, 2018).

A microscopia ótica abrange diversas ciências e a atuação de metodologias quantitativas foi desenvolvida de diversas formas e para cada campo desenvolveram-se vocabulários específicos, sendo a engenharia de materiais utilizadas as terminologias ditadas pela ASTM (American Society for Testing and Materials).

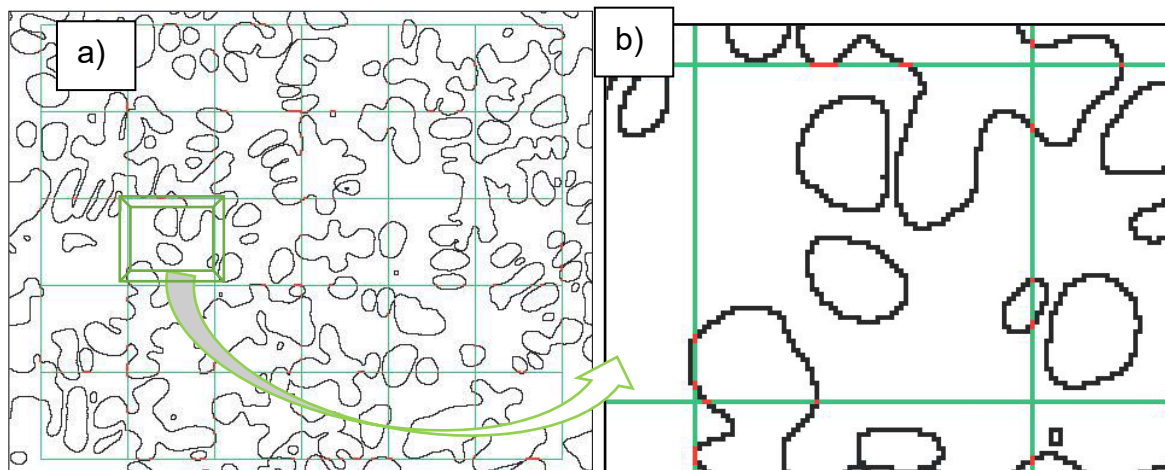
Para Goldenstein (2010) as medidas básicas que são realizadas em microscopia em geral envolvem a sobreposição sobre a estrutura de um conjunto de pontos, linhas, figuras geométricas ou áreas, que são usadas para realizar medidas ou contagens de aspectos morfológicos. Essa sobreposição de formas geométricas torna possível que um conjunto de pontos, que esteja ao acaso sobre a imagem da microestrutura, caiam sobre uma determinada estrutura da imagem revelando aspectos intrínsecos nela, baseados no total de pontos.

Para Goldenstein (2010) e Da Silva (2017), a superposição de linhas mede o comprimento conhecido sobre a estrutura, além de mensurar a fração do comprimento da linha que está sobre determinada estrutura ou mesmo o número de intersecções da linha teste com alguma amostra. É possível ainda medir a fração da área de uma dada fase ou o número de partículas ou grãos por unidade de área e a partir destas medidas podem ser reconstituídas as grandezas volumétricas, como tamanho médio de grão, número de partículas ou inclusões por unidade de volume.

Segundo Russ (2016), a fração volumétrica ou as proporções em volume entre fases, podem ser feitas em uma simples secção polida, pois a simples fração em relação a área que se deseja restringir, corresponde proporcionalmente a fração em volume. Os valores de fração da área, são obtidos por meio de um conjunto de procedimentos baseados em geometria e probabilidade que, a partir de medições ou contagem de elementos, os elementos estereológicos, uma imagem plana converte-se em uma estrutura tridimensional, produzindo informações sobre características da estrutura original.

Um exemplo prático de como a estereologia é empregada para caracterizar uma estrutura é mostrado a seguir. A Figura 3 exibe a seção de corte de uma estrutura hipotética de um material bifásico onde uma fase matriz, de coloração clara, da qual observam-se claramente seus contornos de grão, que se situam tanto nos seus contornos quanto no interior da fase clara. Esses grãos encontram-se muitas vezes agrupados, exigindo uma visão microscópica bidimensional de uma seção de corte da estrutura real.

Figura 3- Exemplo de análise por processamento computacional de imagem em microscopia de metal (a) a imagem completa com grades (b) mesma imagem, porém restrita a um setor.



Fonte: Adaptado de Russ (2016)

Sobre as imagens da Figura 3, foi traçada uma malha de linhas verdes paralelas, e linhas transversais. Estas linhas viabilizam a medição, pois dão parâmetro de comparação com a escala de ampliação da imagem e por meio dessa parametrização determina-se sua área. É possível ainda determinar qual a fração volumétrica que a fase cinza ocupa na estrutura, pois se a área pode ser contabilizada, logo partes da área podem ser quantificadas.

Segundo Petrou (2010) geralmente o PDI determina variações esteorológicas, como mudanças no tom de cinza, variação de coloração, figuras geométricas para estabelecer regiões que delimitam a área de interesse, para assim mensurá-la por meio da fração de área. A ampliação na Figura 3 (b) demonstra a delimitação e impõe que uma parte da área analisada pode ser estudada de forma semelhante a uma imagem completa.

2.2 Pré-processamento

Nas aplicações em engenharia de materiais, assim como em qualquer área do conhecimento, antes da aplicação de PDI na extração de informações para análise, em geral é necessário um procedimento na imagem para assegurar que ela satisfaça

a determinadas condições. Por exemplo, uma redução de ruídos que assegure informações mais realistas e uma expansão de contraste que permita que informações relevantes sejam detectadas. Esses procedimentos se caracterizam como a etapa de pré-processamento.

O pré-processamento, para Ferreira (2012), constitui um problema recorrente durante o processamento computacional de imagens, pois se caracteriza por tratamentos específicos não automatizados, como filtragem, dependendo de vários recursos que são influenciados diretamente pela decisão do operador que executa manualmente o pré-tratamento.

Segundo Ignácio (2013) a preparação da imagem no pré-processamento para posterior etapa de segmentação envolve duas categorias de procedimentos distintos de filtragem: No domínio do espaço real e no domínio da frequência. O domínio do Espaço Real refere-se à imagem propriamente dita, com a manipulação direta dos pixels da imagem, enquanto domínio da Frequência trata-se da modificação da imagem original por meio da transformada de Fourier, seguida de sua transformada inversa.

O filtro no domínio da frequência é caracterizado por captar a imagem que é transformada para esse domínio por meio da transformada de Fourier. Essa imagem é filtrada por diversos métodos de filtragem, que posteriormente é modificada por uma transformada inversa, recuperando a imagem no domínio real, porém totalmente processada. A transformada de Fourier pode ser representada na equação (1), que mostra a transformada para termos com uma única dimensão, e também representada em termos bidimensionais na equação (2), em que x e y representam as dimensões. A transformada também pode ser uma transformada discreta de Fourier quando se deseja um processamento mais veloz, representado na equação (3).

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x).e^{-2\pi uxi}.dx \quad (1)$$

$$F(u,v) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x,y).e^{-2\pi(ux+vy)i}.dx.dy \quad (2)$$

$$F(u, v) = \frac{1}{M.N} \cdot \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot \exp\left[2 \cdot \pi \left(\frac{u.x}{M} + \frac{v.y}{N}\right) \cdot i\right] \quad (3)$$

Onde na equação (1) e (2), “u” e “v” são variáveis matemáticas a armazenarem o valor a ser transformado, enquanto a equação (3) estabelece que as variáveis M e N são valores limites menores que um valor infinitesimal ditado na integral anterior.

Os filtros aplicados após transformação da imagem do domínio real para o domínio da frequência mais comuns são os filtros passa-baixa e passa-alta. O filtro passa-baixa retira os detalhes da imagem, que são os que geram alta frequência, eliminando alguns efeitos de borda, lados e transições abruptas, porém perdendo nitidez. O filtro passa-alta faz o inverso, valoriza as altas frequências e elimina as baixas frequências, enfatizando os detalhes finos. Ambos os filtros são convoluções multiplicadas com a transformada de Fourier (como por exemplo funções gaussianas), representados nas equações (4) e (5), respectivamente, representando os filtros passa-baixa e passa alta em que a variável “r” indica a frequência.

$$H(u, v) = 1, \text{ se } u^2 + v^2 < r^2 \quad (4)$$

$$H(u, v) = 0, \text{ se } u^2 + v^2 < r^2 \quad (5)$$

Muitos filtros podem ser aplicados fora do domínio da frequência, utilizando apenas o domínio real. Por exemplo, os filtros média, mediana e o kuwakara, que por serem assim aplicados são chamados de filtros não-lineares. Segundo Gupta *et. al* (2011) o filtro kuwakara é conhecido também como filtro de preservação de borda de desfoque. Esse filtro trabalha dividido a imagem em 4 janelas impondo em cada uma delas uma média e variância, definindo um valor médio de cada janela, que é atribuído ao pixel central nessas regiões.

O filtro da mediana para Vanita *et. al* (2013) impõe uma mediana sobre uma região e a partir desses valores de pixels, aqueles de valores muito distantes dessa mediana são eliminados e tratados como ruídos.

O filtro da média, segundo Kumar (2013) é simples, intuitivo e elimina consideravelmente o número de ruídos reduzindo a variação de intensidade entre um pixel e seus vizinhos, substituindo cada valor de pixel de uma imagem com o valor

médio dos seus vizinhos. Outros filtros aplicam uma reconversão de limiar de cinza para um limiar de cores menos detalhado, muito utilizado em exames médicos, como citado em Narciso (2014), que utiliza o filtro *Fire* (do software ImageJ/FIJI) para melhor captação de cavidade internas do corpo humano.

A réplica de procedimentos no pré-processamento normalmente não é possível, apesar de não necessariamente implicar em resultados distintos. Para Ignácio (2013) dificilmente a mesma imagem é obtida ao final do processo, visto que até para uma mesma imagem raramente é obtida uma única imagem final.

Para Ferreira (2012) é comum não evidenciar a etapa de pré-processamento, sendo dada maior importância para a etapa de segmentação. Porém, para aumentar a confiabilidade e o resultado da segmentação, todo e qualquer conhecimento prévio sobre a imagem em questão deve ser considerado, pois a etapa de segmentação determinará o eventual sucesso ou fracasso da análise. Porém as características a serem segmentadas devem ser conhecidas e extraídas da forma que melhor se adequa.

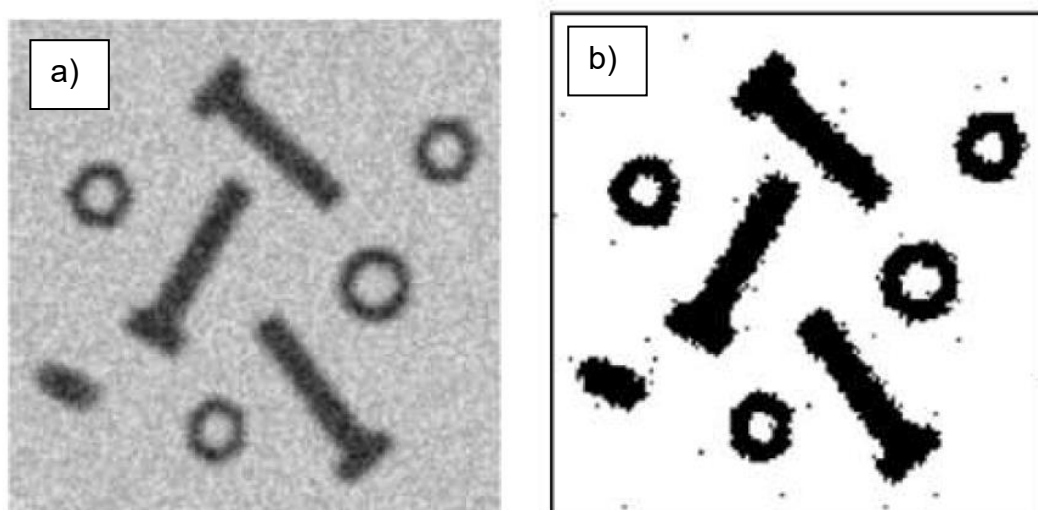
2.3 Segmentação

Seguinte a delimitação de características ocorre a etapa mais importante, a segmentação. O termo segmentação vem do termo em inglês "image segmentation", criado durante os anos 80, citado por Mui (1980). Esta área representa até hoje uma linha de pesquisa importante do processamento de imagens, principalmente por ela estar na base de todo o processamento da informação em uma imagem.

Esta etapa é a principal dentre as elencadas no processamento computacional de imagens e tem por característica extrair objetos de interesse, tais como poros, precipitados, grãos, fases entre outros, todos baseados nas particularidades e condições em que se encontra a imagem a ser analisada é encontrada. Para tanto, são exploradas características de similaridade e descontinuidade desses objetos, decorrentes de valores dos níveis de cinza dos pixels: brilho, texturas, bordas, contornos e formas (González & Woods, 2018). Para Dias (2012) é etapa de maior complexidade, uma vez que tenta representar computacionalmente um processo cognitivo que é inerente ao sistema olho/cérebro humano.

Para Gonzáles & Woods (2018) a segmentação divide a imagem em regiões que são distintas umas das outras e do fundo. Essas regiões são determinadas pelos tons de cinza, conhecidos por limiar de cinzas, que determinam pela variação entre o preto e o branco como um intermediário variante. A binarização é um método para posterior segmentação de imagem. A Figura 4 exemplifica uma segmentação de imagem.

Figura 4– Exemplo de segmentação: a) Imagem com tons de cinza, identificando fundo e objeto; b) Resultado da segmentação de tons de cinza



Fonte: Dias (2012)

A segmentação deve ser seguida de pós-processamento com possíveis filtragens. O pós-processamento define o sucesso da segmentação anterior, pois para a situação de resultado ineficiente, todo o método computacional pode ser repetido.

2.4 Pós-Processamento

No pós-processamento, segundo Yang (2011) ocorre correção dos defeitos de segmentação, onde acontece um procedimento de análise de componentes da imagem fora da área investigada, identificados como vazios. Existem filtros como os morfológicos e lógicos, aplicados de forma a abrir ou fechar esses componentes.

Nesses filtros existe uma seleção criteriosa de como acontecerá a modificação,

porém essa modificação pode ocasionar em mudança no resultado final de forma significativa, ou seja, o resultado final fica dependente de uma seleção muito cuidadosa.

Para Paciornik (2010) a separação de objetos que se tocam, a eliminação de objetos de que não se deseja extrair nenhuma informação e o agrupamento de objetos para a formação de objetos mais complexos são exemplos de procedimentos realizados na etapa de pós-processamento realizados por meio dessas operações lógicas e morfológicas.

Em Goldenstein (2010) as operações lógicas são operações pontuais, isto é, são desempenhadas pixel a pixel, gerando uma imagem de saída contendo pixels preservados ou invertidos em relação aos da imagem de entrada. As principais operações lógicas em processamento de imagens são a interseção (AND), o complemento (NOT) e a união (OR), a partir dos quais combinações podem ser feitas para formar qualquer outra operação lógica.

Diferentemente das operações lógicas, as quais são realizadas pontualmente pixel a pixel, as operações morfológicas são realizadas localmente, onde um pixel da imagem de saída é função do valor dos pixels numa vizinhança da imagem de entrada (Paciornik, 2010).

Porém, para texturas muito complexas a aplicação desses filtros, baseados nos operadores citados, não resolve os problemas de forma satisfatória. Nesses casos é comum acontecer uma superposição dos tons de cinza.

O pós-processamento é o que indica a necessidade de uma repetição da segmentação ou sua total modificação. Para extrair corretamente as características desejadas a etapa de pós-processamento deve apresentar imagem com o mínimo de interferências nos tons de cinza, de forma que padrões sejam reconhecidos.

2.5 Reconhecimento de padrões

A segmentação permite o processo final de análise no processamento digital de imagens, o reconhecimento de padrões, que para Decost (2017) é a parte do processamento que vai classificar os objetos a partir de informações encontradas na imagem, geralmente tendo como apoio uma base de conhecimento previamente

estabelecida.

Na parte posterior ao pós-processamento é realizada a análise de imagens digitais com a medição de itens quantitativos como área, perímetro e distâncias, a análise interpretativa final dos resultados e o tratamento de dados, que são feitos sobre a imagem.

Para Lind (2012) o ImageJ/FIJI apresenta-se como software com linguagem em JAVA, podendo sofrer edição de plug-ins, permitindo análises quantitativas, morfológicas entre outras, que de forma simplificada, enfatiza a facilidade de manipulação das imagens, apresentando resultados satisfatórios. Outros softwares como MATLAB e bibliotecas como o OpenCV possuem resultados semelhantes, porém com abordagens diferentes.

Para Baggio (2012) o OpenCV possui abordagem mais voltada para eficácia na aquisição de imagens, e análise mais focada em encontrar padrões, como por exemplo a identificação facial.

O MATLAB, é citado em Solomon (2013) como ferramenta com foco em análise, ignorando os fatores referentes a aquisição de imagens, apresentando resultados com implementação matemática, praticamente direta, permitindo manipulação mais sensível, porém menos simplificada.

Para Solomon (2013) e Lind (2012), MATLAB e ImageJ/FIJI devem possuir abordagem mais relacionada a análise microestrutural, apresentando resultados semelhantes, porém deduz-se que o indicado é um software mais específico, como ImageJ/FIJI. O estudo microscópico, por meio de PDI utilizando a melhor opção de software, em aços de grande aplicação industrial, como os ferríticos, possui relevância significativa para o sucesso da extração de características reconhecidas na forma de padrões. Assim obtém-se uma melhor extração de características requeridas, com obtenção final de dados objetivos.

2.6 Extração de características

A análise de quais recursos serão extraídos é feita após o reconhecimento de padrões onde características específicas são identificadas e selecionadas. O principal objetivo é tomar um padrão de entrada e atribuí-lo corretamente como uma das

possíveis classes de saída na extração. A extração de características deve obter as informações mais relevantes a partir dos dados originais e representá-las em um espaço de menor dimensionalidade. Quando os dados de entrada são convertidos para um algoritmo muito grande para ser processado e possui suspeita de redundância, os dados de entrada serão transformados em um conjunto reduzido de recursos padronizados. (Gaurav *et. al*, 2013).

Segundo Sharma *et. al* (2013) as características extraídas de uma imagem digital estão agrupadas em quatro grandes categorias: morfológicas, cromáticas, texturais e estruturais.

As características morfológicas, para Russ (2016), são aquelas obtidas por meio do perímetro de uma área de um determinado tipo de imagem, baseadas na medição da forma dos objetos que constituem uma imagem binária, onde são desconsideradas as intensidades do limiar de cinza e valorizar a forma em detrimento dos tons considerados como, por exemplo, a área, circularidade e largura.

A característica que não considera o limiar de cinza é a cromática, obtida por meio dos limiares de cores de imagem, baseadas na quantificação da intensidade dos pixels, principalmente os tons de cinza, característicos da segmentação tradicional, ou seja, os valores que descrevem a cor ou tons de cinza, descrevem as características cromáticas. Como por exemplo as medidas estatísticas das intensidades como média, mediana, desvio-padrão. (Kumar *et. al*, 2013)

Outra extração, porém, com maior complexidade, é a de características texturais, por possuírem maior profundidade de processamento, necessitando de procedimento mais complexo e intenso da imagem, que muitas vezes se baseia na variabilidade local das intensidades dos pixels, como forma de medir a textura. Outras técnicas são citadas recentemente para análise textural de forma mais detalhada como em Dudek *et. al* (2012) que utiliza uma análise mais aprofundada.

A extração de características estruturais ou contextuais, segundo Kumar *et. al* (2013) são as obtidas da relação entre dois ou mais objetos que constituem a imagem, baseadas em informações já coletadas dos outros grupos, como, por exemplo, a posição relativa de um elemento em relação a outro.

As características a serem extraídas variam muito dependendo do tipo análise realizada, que é dependente do tipo de material e de suas respectivas transformações.

2.7 Aço SAE 1006

Os metais são estruturas aplicadas com grande recorrência em praticamente diversos setores da indústria, principalmente os aços com baixo carbono. Esses aços são menos custosos e mais maleáveis, tornando-os populares a usos mais cotidianos e para desenvolvimento de estruturas que exigem poucos esforços, como para a construção de quadros de bicicletas.

Segundo Honeycombe (2017) os aços são compostos basicamente por ferro, carbono e impurezas, tais como enxofre e fósforo, e podem conter outros elementos entre eles cromo, tungstênio, vanádio, manganês, silício, níquel, molibdênio, cobalto, alumínio, entre outros. Especificamente, os aços SAE 1006 são classificados como ferríticos de baixo carbono, podendo possuir alguns desses elementos. Esse aço é representado como mostrado na tabela 1, em que a média de carbono é 0,06% de carbono.

Tabela 1– Componentes microestrutura de aço SAE 1006

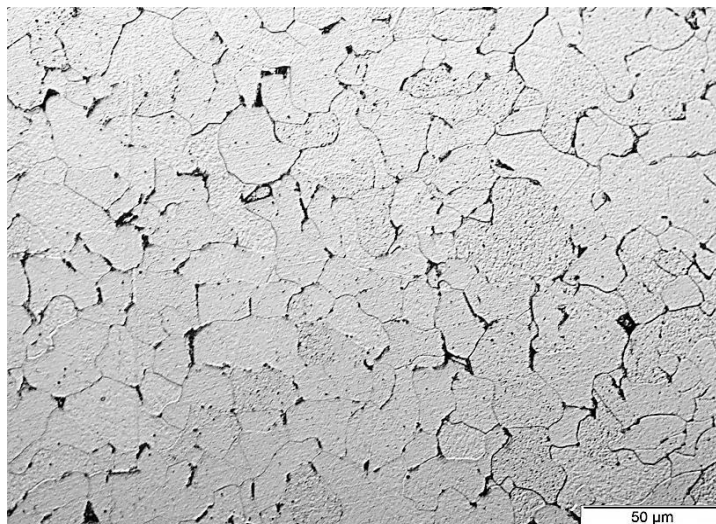
Elemento	Concentração (%)
Manganês, Mn	0,25 a 0,40
Carbono, C	0,08 (max)
Enxofre, S	0,05 (max)
Fósforo, P	0,04 (max)

Fonte: NBR NM 87 (2002)

A NBR NM 87 (2002) mostra a composição química de aços, incluindo aços-carbono, nomeando-os para a norma SAE (Society of Automotive Engineers). Os aços, em geral, possuem grande aplicação industrial na forma de tubos com solda longitudinal (chamada de costura) com seção circular, quadrada e retangular. A norma NBR 6591 (2008), especificamente para aços com essas características, estabelece parâmetros mínimos como porcentagem de alongamento, dureza e achatamento de acordo com o comprimento, diâmetro externo e interno do tubo.

Em decorrência do baixo teor de carbono o aço SAE/AISI 1006 apresenta microestrutura ferrítica, onde o pequeno índice de carbono associado a perlita se apresenta como pontos mais escuros espalhados em toda microscopia como a exibida na Figura 5.

Figura 5 – Microscopia de aço SAE 1006, nital 2%, 2000x.



Fonte: Corassini (2012)

A Figura 5 apresenta a microestrutura do aço 1006 laminada a frio com ampliação de 2000 vezes, com ataque químico por meio de Nital a 2%. Observa-se que apenas com uma ampliação muito alta é possível observar a parte não ferrítica, que possui carbono, expressa pelos pontos escuros. A observação de descontinuidades estruturais provocadas por soldagem, como porosidades, falta de penetração, inclusões e trincas são possíveis em baixa ampliação, possibilitando que partes escuras induzam a dedução de incidência dessas descontinuidades microestruturais.

O aço SAE 1006 possui características que o classificam como aço baixo carbono, metais assim classificados possuem ótima soldabilidade, tornando a sua soldagem em estruturas opção viável em níveis muito altos de produção, principalmente quando soldada pelo método MIG/MAG.

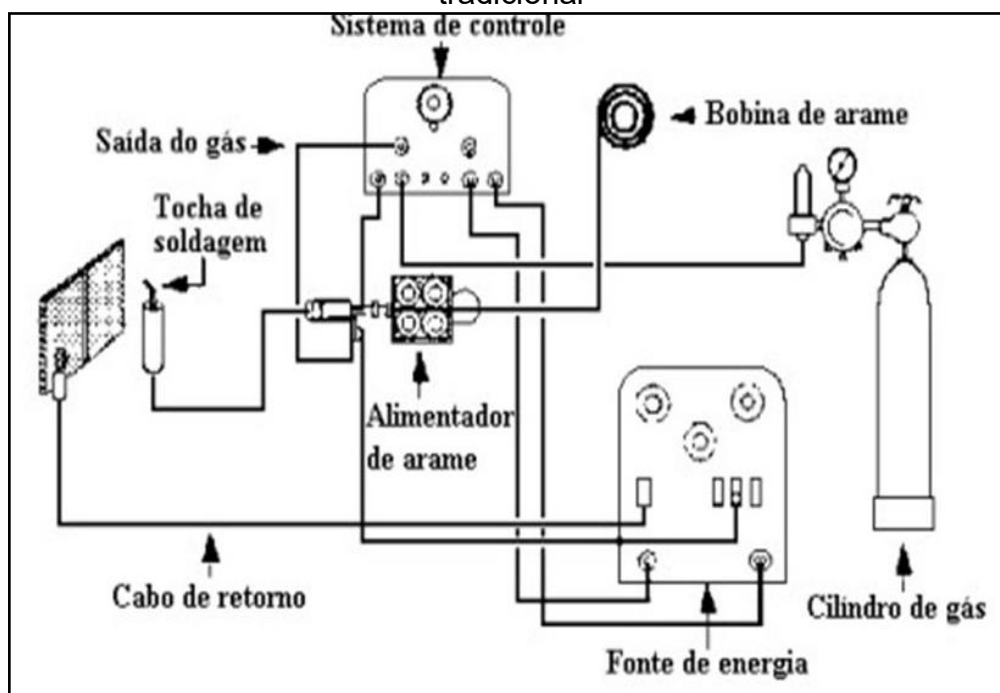
2.8 Soldagem MIG/MAG

A soldagem MIG/MAG é uma técnica comumente aplicada no setor industrial, principalmente em metais de baixo carbono (como no aço SAE 1006), no qual um arco elétrico é gerado e mantida entre o fio do eletrodo e a amostra de soldagem. Devido ao fornecimento contínuo de corrente, o fio é derretido e fica depositado nas juntas soldadas na forma de gotículas. O gás de proteção fornecido forma uma tocha protege a zona fundida dos contaminantes atmosféricos.

Para Sumesh *et. al* (2018) o processo GMAW é adequado para o uso industrial, considerado como o processo mais aplicado no meio industrial, e dentre as diversas técnicas de soldagem GMAW, a soldagem do tipo MIG/MAG é aplicada, visto o baixo custo e alta velocidade em um processo semi-automatizado.

Porém, nesse processo, defeitos como burn-through (furação por excesso de temperatura), falta de fusão, falta de penetração, porosidade, inclusões de óxidos ou contaminantes, defeitos de distorção e salpicos são muito comuns. A Figura 6 exibe como ocorre a soldagem MIG/MAG.

Figura 6– Método de representação esquemática de método de soldagem MIG/MAG tradicional



Fonte: Villani (2016)

Na Figura 6, é esquematizada a soldagem MIG/MAG de forma típica para Villani (2016), nesse processo existe uma fonte de material de adição, chamado de consumível, que fica em forma de bobina (detalhado na imagem como bobina de arame) e é puxado por meio de um alimentador até a tocha de soldagem. Essa tocha também possui gás passando por seu interior.

Porém, esse formato tradicional não é o único método de soldagem, visto que o esquema exemplificado demonstra um trabalho manual. A dependência manual é um indicador negativo para produção em massa. Por isso a AWS (American Welding Society) padronizou os tipos de operação de soldagem, mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Tipos de operação de soldagem

Tipo de operação →	Manual	Semiauto-mático	Mecanizado	Automático	Robotizado	Controle Adaptativo
Ação						
Abertura e manutenção do arco	Soldador	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô)
Alimentação de material	Soldador	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina	Máquina
Controle do calor e penetração	Soldador	Soldador	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô) (só com sensor)
Deslocamento da tocha	Soldador	Soldador	Máquina	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô)
Procura e seguimento da junta	Soldador	Soldador	Soldador	Máquina, trilha programada	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô) (só com sensor)
Direcionamento da tocha e do arco	Soldador	Soldador	Soldador	Máquina	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô)
Correção e compensação	Soldador	Soldador	Soldador	Não ocorre	Máquina (com sensor)	Máquina (Robô) (só com sensor)

Fonte: AWS (American Welding Society), (2011).

A soldagem mecanizada e robotizada, conforme exibido na Figura 7, são as mais presentes em soldagem de quadros em aço de bicicletas, incluindo o aço SAE 1006 (Morgan, 2019).

A soldagem mecanizada tem incidência de defeitos de soldagem maior (e consequentemente de descontinuidades considerado menos grave), visto que a interferência do soldador contribui para que o direcionamento, a correção e compensação é obtida por meio da tentativa e erro, contudo, a velocidade de soldagem é extremamente alta, obtendo assim alta produtividade.

Essa soldagem, mesmo em aços com soldabilidade muito boa, possui grande probabilidade de aparecimento de descontinuidades microscópicas, porém com modificação de parâmetros, podem ser minimizadas ou mesmo eliminadas. Esses parâmetros devem ser associados com cada tipo de descontinuidade, pois cada um possui causa (s) característica (s).

2.9 Descontinuidades de Soldagem

O processo de soldagem possui o potencial para introduzir diferentes descontinuidades no componente, e como consequência, a secção de solda é um grande campo de visualização e análise do comportamento da junta soldada (Wainer, 2011).

Para Villani (2016) os defeitos de soldagem são provenientes de descontinuidades, sendo estas divididas em descontinuidades dimensionais e estruturais. Exemplos de descontinuidades dimensionais são: dimensões incorretas, distorção e perfil incorreto. Enquanto as principais descontinuidades estruturais são: porosidades, inclusões, falta de fusão, falta de penetração, mordedura e trincas. Para estudos microscópicos apenas as descontinuidades estruturais são perceptíveis, sendo estas as únicas relevantes para análise microestrutural, assim essas descontinuidades.

Várias descontinuidades que podem ocorrer durante a soldagem, como os citados por Sumesh *et. al* (2018), que incluem a formação de porosidade ou cavidades devido ao gás, ou encolhimento (em que o gás pode difundir), inclusões de sólidos

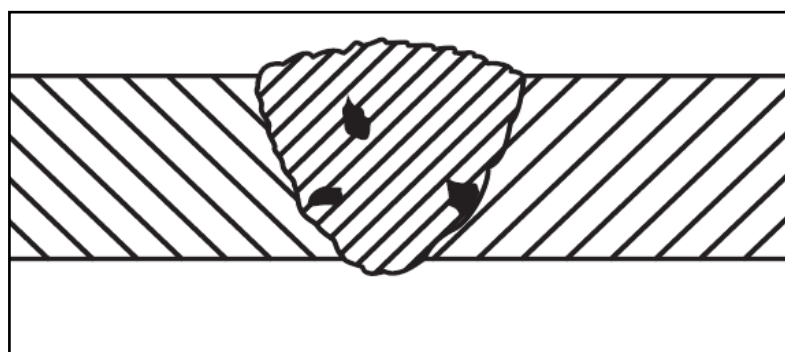
(como escória, fluxo e óxidos não metálicos, bem como cobre metálico e tungstênio), falta de fusão (o cordão de solda adere mal ao metal de base), penetração incompleta (a cordão de solda não trai a raiz da região da solda), e forma imperfeita como um rebaixo, assim como trincas e mordeduras.

Dentre as discontinuidades de soldagem, os mais comuns são as mordeduras, falta de fusão, falta de penetração, inclusão, porosidade e trinca. Para a análise microestrutural, as discontinuidades mais perceptíveis na microscopia são as inclusões, porosidades, falta de penetração e trincas, visto que podem ocorrer de forma a se disseminarem microscopicamente na zona fundida e contribuir diretamente para a qualidade de soldagem.

2.9.1 Inclusão

Para Yusof e Jamaluddin (2014) inclusões se caracterizam como discontinuidades de soldagem ocasionadas por aprisionamento de partículas sólidas, criadas a partir de materiais estranhos durante o processo de soldagem. A fonte de partículas sólidas pode ser de óxidos de superfície, sulfeto, eletrodos de tungstênio e escória. As inclusões de óxidos e escórias podem ser encontrados na superfície perto da raiz da solda, dentro da zona de fusão, entre o cordão de solda e a sua raiz como exibida na Figura 8.

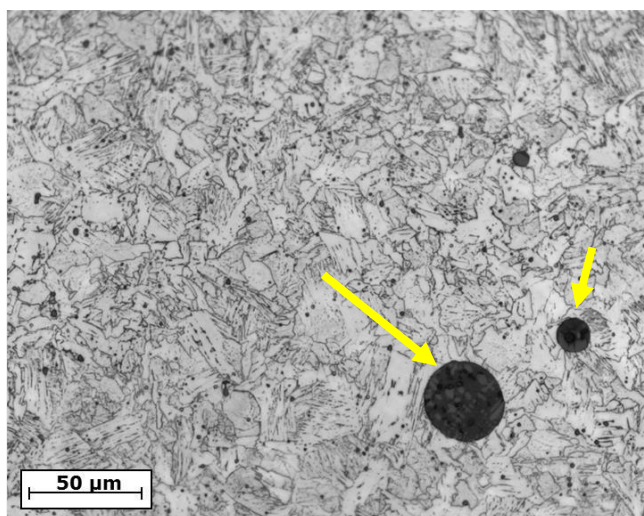
Figura 8– Inclusões em soldagem



Fonte: Singh (2016)

As inclusões podem causar modificações severas na qualidade final da soldagem, visto que a partir dessa descontinuidade é possível se originar outros. Segundo Chen *et. al* (2018), trincas podem surgir a partir de inclusões excessivas de impurezas, pois essas impurezas causam em uma decoesão entre a estrutura e a impureza estabelecendo-se como uma regiões de possível concentração de tensões. A Figura 9 ilustra as inclusões em microestrutura da soldagem.

Figura 9 – Microscopia de soldagem em liga da aço baixo carbono com inclusões destacadas.



Fonte: Silva (2010)

2.9.2 Trincas

A trinca, segundo Petcher *et. al* (2015), podem ocorrer durante um processo sem existência de fluxo de líquido de solda suficiente, tornando muito forte a consolidação do campo de derretimento e solidificação, ou seja, durante o acomodamento (expansão e contração) da zona de fusão com o metal base durante o resfriamento acontecem discordâncias de forma macro ou micro estrutural.

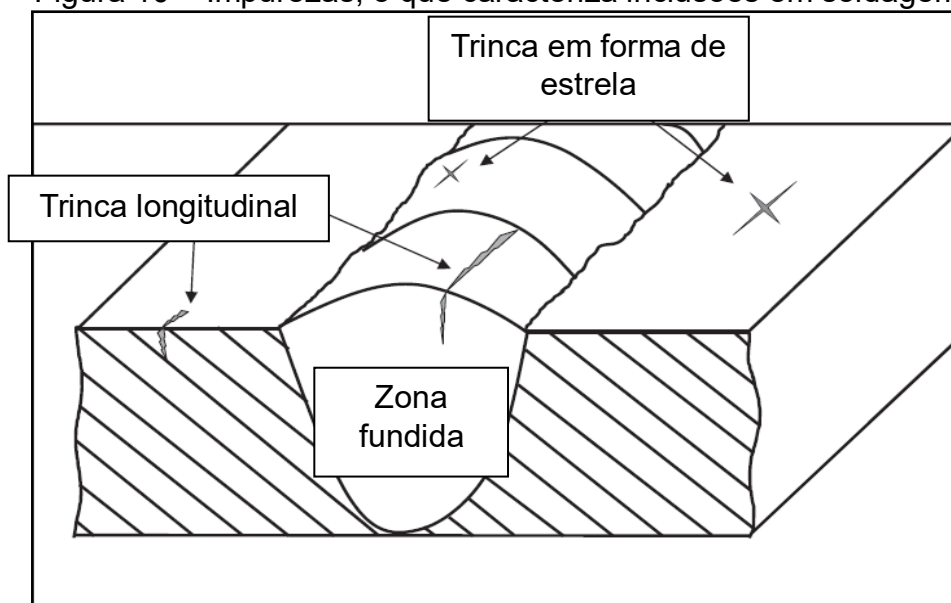
Para Villani (2016), a trinca é a descontinuidade de soldagem mais grave dentre as descontinuidades, e sempre é considerada um defeito, pois favorece a concentração de tensão propiciando início de fratura frágil. A trinca pode acontecer em qualquer região da soldagem, seja na zona fundida (normalmente em metais de alta resistência mecânica), ou na zona termicamente afetada.

Veiga (2011) aponta que dentre os tipos de trincas, a trinca a frio é recorrente em soldagem MIG/MAG, e essa descontinuidade, que é induzida por hidrogênio, acontece após o fim da soldagem, em que as tensões residuais remanescentes entre o material de base e a região soldada a soldagem fundida sempre causa tensões residuais, tensões essas que combinadas ao uso de hidrogênio na zona termicamente afetada, pode resultar em trincas. Weiss (2012), cita que a soldagem em geral, sempre causa tensões residuais, pois o metal a ser soldado recebe grande variação de energia diretamente na sua microestrutura.

A trinca a quente ou trinca de solidificação, segundo Hubschen (2016), é comum em aços alta liga que utilizam consumíveis especiais e durante a solidificação ocasiona o surgimento de trincas, ocorrendo em aços baixo carbono apenas quando existe um excesso de enxofre no centro da peça.

Em Yusof e Jamaluddin (2014) a trinca é citada como o defeito de soldagem mais prejudicial dentre as descontinuidades estruturais, pois as principais falhas que possam vir a acontecer em uma estrutura são provenientes de tensões repetitivas, ou seja, de fadiga, originada a partir de trincas. A trinca pode ocorrer em qualquer região do material soldado, com maior frequência na região de zona de solda, mas aparecendo na região termicamente afetada ou mesmo no metal base em decorrência da contração e expansão durante a soldagem.

Figura 10 – Impurezas, o que caracteriza inclusões em soldagem

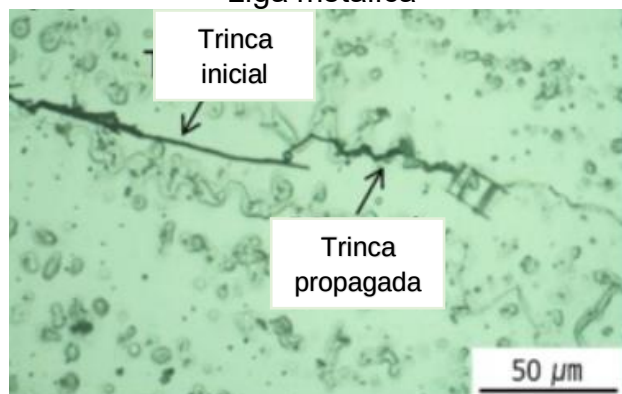


Fonte: Yusof e Jamaluddin (2014)

Em Guo *et. al* (2018) a influência entre crescimento de grãos é proporcional ao número de trincas, em diferentes tipos de titânio, em região soldada para análise de resistência na soldagem. Nesse caso, o aumento do número de trincas mesmo em proporções menores ocasiona redução da resistência.

Dzindo (2018) cita o crescimento de trinca por simulação computacional, em uma região soldada, por meio de método de elementos finitos. Em que a relação entre crescimento de trinca com princípio em região de soldagem é evidenciada de forma maior do que esse mesmo crescimento em região semelhante, porém, não sendo junta soldada. Na Figura 11 é exibido uma propagação de trinca em soldagem.

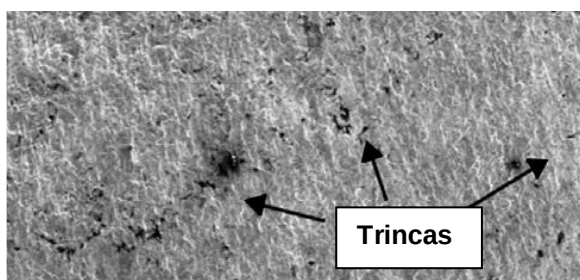
Figura 11 - Micrografias ópticas indicando a propagação de trincas na soldagem de Liga metálica



Fonte: Adaptado de Lim *et. al* (2019)

Na Figura 12, as trincas são exibidas de forma ainda não propagada na estrutura soldada, atuando como uma espécie de armazenadores de tensões. Segundo Chen *et. al* (2018) atua com uma contribuição progressiva para aumento das tensões residuais .

Figura 12– Trincas representadas nos pontos indicados pelas setas



Fonte: Chen *et. al* (2018)

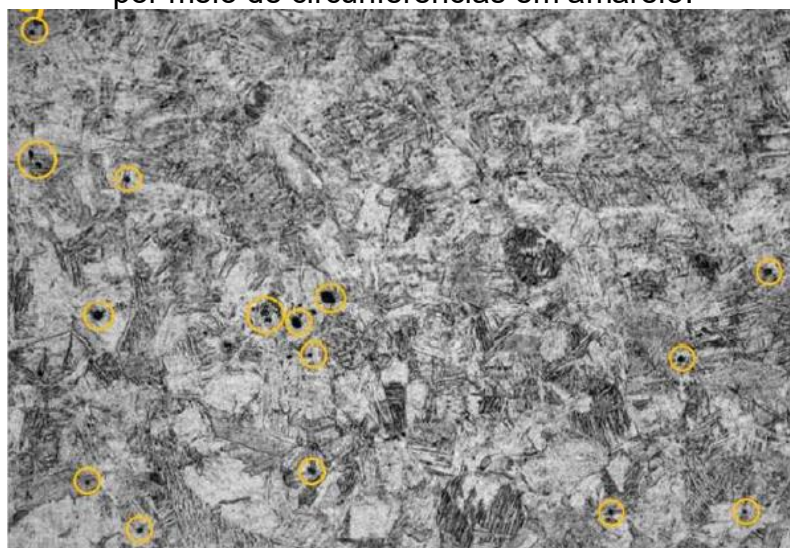
2.9.3 Porosidade

A porosidade é o resultado aprisionamento do gás no metal de solda solidificado e geralmente de aspecto esférico, porém o aspecto mais alongado pode ocorrer. A ausência de práticas de limpeza e bom monitoramento de gás de proteção em soldagem como MIG/MAG causa porosidades e sua correta detecção previne prejuízos a estrutura soldada (Villani, 2016).

Como forma de detecção, Singh (2016) cita que a inspeção visual pode ser eficaz se os poros estiverem na superfície de soldagem, porém grande parte da porosidade fica na parte interna da zona fundida, sendo um dos métodos de inspeção a ultrassônica. No entanto, a inspeção ultrassônica é usada regularmente para a para seções grossas ou áreas inacessíveis, além de se apresentar como método custoso, e não conveniente para avaliação de matérias de baixo valor agregado.

A verificação de porosidade por meio de microscopia permite uma inspeção mais aprofundada, com menor índice de erros que as demais, porém é considerado como ensaio destrutivo, visto que é necessário o corte, lixamento e polimento da amostra para visualização em microscópio. A Figura 13 a seguir apresenta um exemplo de microscopia de junta soldada de uma liga de zinco.

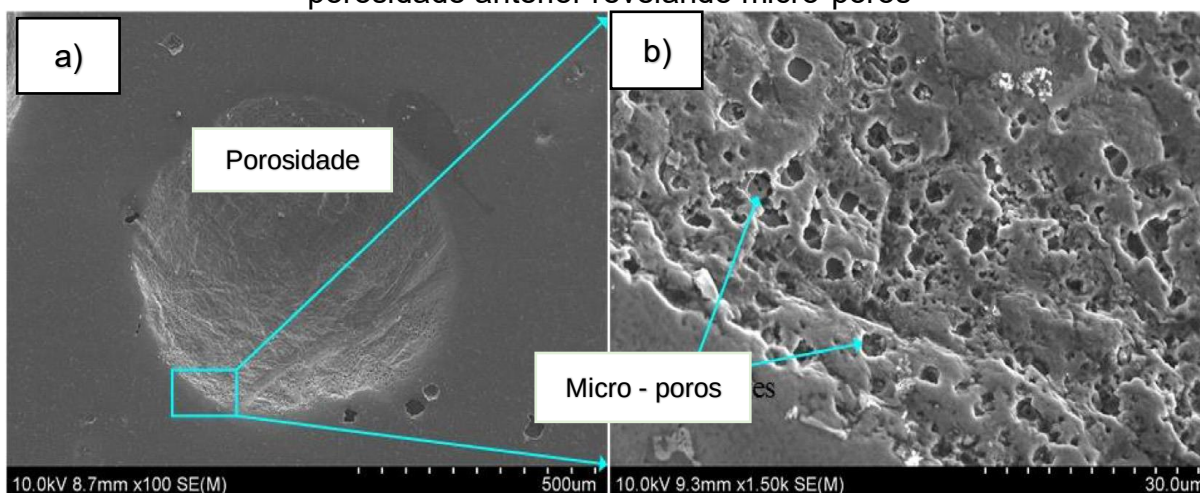
Figura 13– Microscopia de soldagem em liga de zinco com porosidades destacadas por meio de circunferências em amarelo.



Fonte: Bandi *et. al* (2018)

A porosidade é a penetração de gases dentro da soldagem, a existência dessa descontinuidade significa baixa proteção da zona fundida e esse fenômeno pode ocorrer em decorrência de grande quantidade de energia, acima da necessária durante o arco elétrico. No trabalho de Huang *et. al* (2018) é indicada a presença de micro-poros internos a uma porosidade, que são diretamente associados a intensidade da corrente elétrica na soldagem a arco elétrico, ou seja, menores correntes elétricas geram micro-poros menores que resultam em menores porosidades. A Figura 14 ilustra a microporosidade interna ao poro.

Figura 14 – Porosidade em microscopia de soldagem b) Ampliação interna a porosidade anterior revelando micro-poros



Fonte: Adaptado de Huang *et. al* (2018)

2.9.4 Falta de fusão/penetração

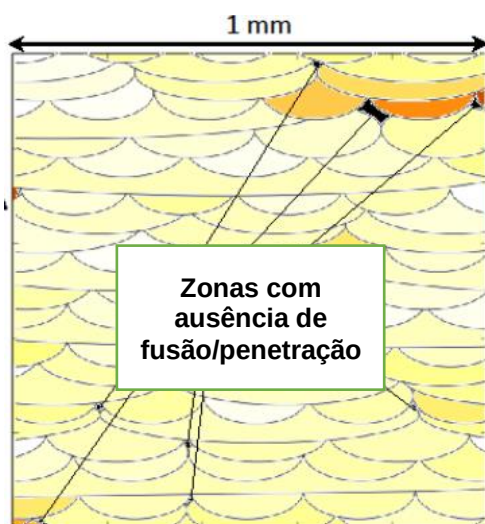
A falta de fusão/penetração é descrita como conexão incompleta ou penetração entre o metal de base e o cordão de soldagem. Para Mukherjee *et. al* (2018), essa descontinuidade ocorre quando a zona fundida não funde completamente, não formando uma ligação coesiva com o metal base. Um indício de ausência de fusão/penetração por meio de micrografias são as inclusões e porosidades presentes nas soldagens no local dessa descontinuidade.

Na soldagem a arco elétrico, principalmente na GMAW, com destaque a soldagem MIG/MAG, essa descontinuidade pode ocorrer sob diferentes condições: baixa corrente de soldagem, velocidade de soldagem rápida ou lenta, efeitos de sopro

do arco, movimento incontrolável da zona fundida e fixação inadequada (Mourad, 2012).

Algumas bibliografias como em Villani (2016) ou em Veiga(2011) caracterizam a falta de fusão e a falta de penetração como descontinuidades distintas. Porém, alguns trabalhos, como por exemplo, Bai *et. al* (2017), Yusof e Jamaluddin (2014) e Mukherjee *et. al* (2018), consideram como uma mesma descontinuidade apresentando graus diferentes de gravidade. Essa ausência de penetração é considerada uma descontinuidade de soldagem perigosa em uma estrutura soldada devido ao efeito entalhe: uma rachadura pode se propagar ainda mais sob a menor carga aplicada. Nesse caso, ocorre quando a zona de fusão não penetra completamente no fundo da junta soldada, ou seja, anteriormente não havia penetração ou penetração mínima do cordão de soldagem, e nesse caso acontece a penetração, mas incompleta. Para Bayat *et. al* (2019) o efeito entalhe, citado anteriormente, é definido como uma penetração irregular no metal soldado, formando concentradores de tensão. A Figura 15 exibe secções soldadas com presença de falta de fusão/penetração.

Figura 15– Simulação de secção de soldagem com falta de fusão/penetração na região fundida em liga de alumínio.



Fonte: Adaptado de Tang *et. al* (2017)

A Figura 15 exibe regiões na zona fundida com ausência de fusão/penetração de forma a enfatizar presença dessa descontinuidade nessa área e não apenas nas regiões próximas a zona termicamente afetada. Para Tang *et. al* (2017) a velocidade

de soldagem é um fator significativo para o aparecimento dessa descontinuidade na região fundida.

Assim é válido destacar que as causas para ambos os graus de ausência de fusão/penetração são iguais, incluindo as técnicas usadas para estudo, como: radiografia, inspeção ultrassônica, partículas magnéticas e inspeção microscópica. No entanto, a radiografia é incapaz de detectar pequenas áreas de descontinuidade. Enquanto para a inspeção de partículas magnéticas não é aconselhável a formatos muito complexos (Yusof e Jamaluddin, 2014). O PDI associado a inspeção microscópica pode surgir como método diferente dos convencionais, que serão analisados em trabalho semelhantes ao escopo dessa dissertação.

2.10 Trabalhos relacionados

O processamento computacional é aplicado em múltiplas áreas do conhecimento com diversos softwares, porém sempre com foco em uma solução automatizada e menos suscetível a erros. Segundo De Giovanni *et. al* (2017) existe a preocupação em quantificar poros de forma a evitar erros, que microscopicamente podem ser significativos para uma análise equivocada. Nesse trabalho a quantificação de porosidade em ligas de alumínio e silício são de importância significativa, visto a aplicabilidade em setores como o automotivo e aeroespacial, onde por meio de análise microscópica delimitou locais com maior índice de porosidade e com a presença do que chama de “Inter material” (muito semelhante a inclusões encontradas em microscopias de soldagem), que posteriormente converte e imagens em 3D.

Para Park *et. al* (2015) o processamento das imagens microscópicas de liga de Cromo e aço carbono contribuiu para uma análise gráfica posterior em software JMatPro que pressupõe algumas propriedades mecânicas como transformação de fase, com base na fração volumétrica e características geométricas, e tensão máxima permitida através de cruzamento de dados com tabelas das normas técnicas da AWS (American Welding Society).

Para a análise de descontinuidades de soldagem, a análise microscópica se faz pouco recorrente em termos imediatos, visto que um monitoramento em tempo real é o mais abordado, como a utilização de análise por ultrassom. Por exemplo em Boaretto (2016) e Petcher (2015) realizaram análises de defeitos de soldagem

MIG/MAG por meio de inspeção por ultrassom, porém válidas para apenas falhas macroscópicas não perceptíveis por observação, ou seja, que possuam dimensões significativas, mas apenas na parte interna da zona de fusão. A análise por ultrassom é válida para a análise de defeitos com consequências muito imediatas.

Uma análise microscópica permite que sejam observadas todas as descontinuidades relevantes, porém mais voltada para uma abordagem na confiabilidade do material, com percepção das descontinuidades da soldagem que aponte a causa de redução de vida útil desejada.

Bahokhonov (2016) em estudo computacional do efeito microestrutural, feito na deformação e fratura de alumínio soldado por fricção, indicou diversas propriedades mecânicas na região soldada obtidas por meio de processamento de imagens e de forma posterior método de elementos finitos. Um estudo aprofundado pode ser feito por meio de processamento de imagens, porém um estudo semelhante às características exigidas para uma análise em ultrassom também é possível, como em Ranjan (2016), que quantifica e revela defeitos em cordão de soldagem MIG/MAG, de forma macroscópica.

Nizam *et. al* (2016) realizaram uma investigação de trabalhos que exploram a verificação de defeitos de soldagem e seus respectivos métodos. Nesses trabalhos a maioria aplicou verificação por tons de cinza, por linguagem neural e lógica Fuzzi. No trabalho de Nacereddine *et. al* (2018) utilizando uma lógica geométrica e adaptando a um modelo com múltiplas variáveis gaussianas foram identificados defeitos de soldagem obtidas por radiografia. Estes resultados indicam a praticidade do processamento computacional em imagens para a visualização de defeitos, e consequentemente de descontinuidades presentes na soldagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Soldagem de bicicletas

Para a análise da soldagem, são necessárias amostras soldadas que representem de forma semelhante a produção industrial de quadros de aço para bicicletas. Logo, essas amostras são obtidas diretamente das linhas de produtivas.

A soldagem nessas linhas ocorre de forma semi-automatizada, tipo de operação mecanizada (Figura 7), onde os tubos são posicionados conforme um gabarito removível (Figura 16), posicionado segundo o modelo de bicicleta a ser produzido.

Figura 16– Gabarito de soldagem



Fonte: Acervo do autor (2020)

Esse processo ocorre em diferentes tubos com posições distintas de na bicicleta, sendo estes presos ao gabarito (mostrado na Figura 16), posicionado por meio do operador, que aciona a máquina, executando um giro completo em torno do próprio eixo, que fica na maior barra transversal do gabarito. Este giro, acontece sob determinada amperagem (corrente elétrica) de soldagem, que é diretamente proporcional a velocidade de soldagem. Essa variação na corrente elétrica determina o ritmo da produção. Na Figura 17 são observados os tubos presos ao gabarito na

máquina de soldagem.

Figura 17- Bicicleta na máquina de soldagem



Fonte: Acervo do autor (2020)

O Sistema de soldagem acima citado é alimentado por máquinas de soldagem, modelo de marca Aotai que fornecem a tensão e o material de adição (arame sólido de diâmetro 1mm, AWS ER70S-6 com composição aproximada de C-0,08%, Si-0,5% e Mn-1,1%).

Essa máquina de soldagem possui parâmetros de processos exibidos na Tabela 2 a seguir.

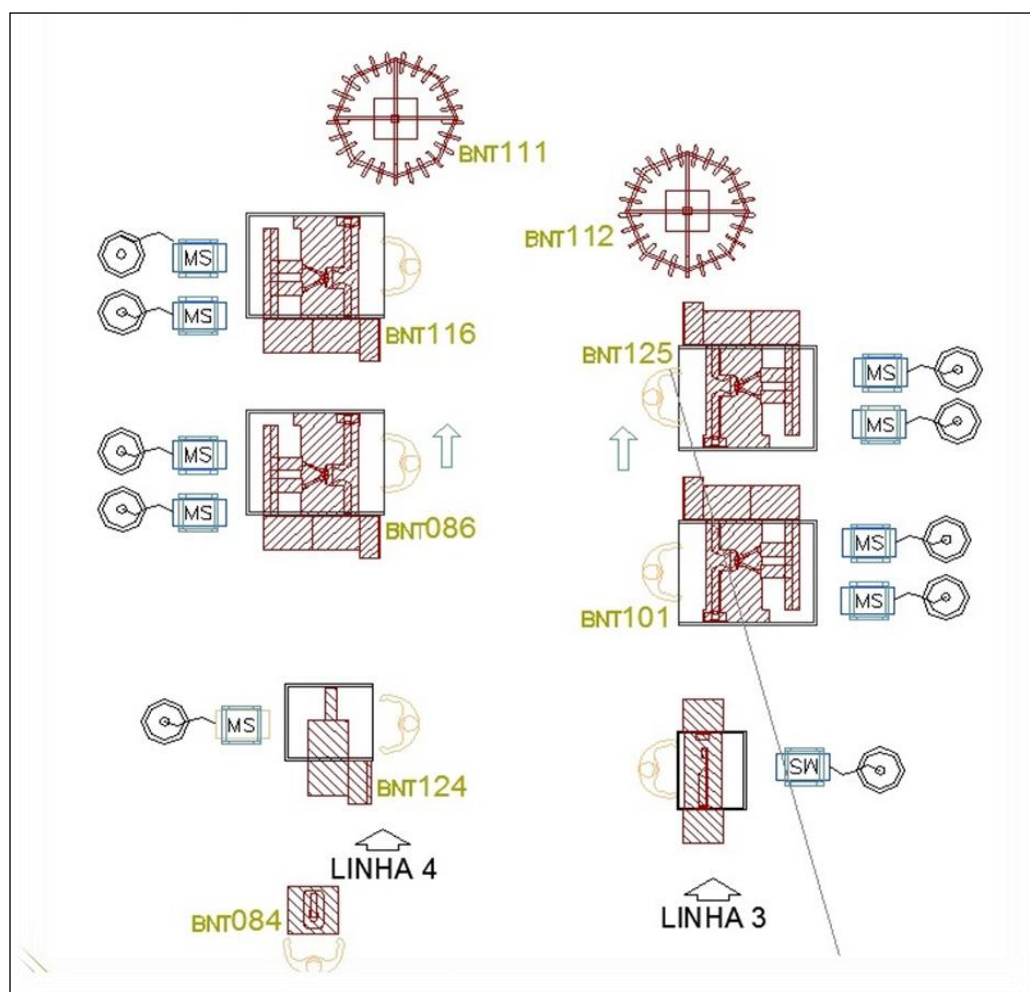
Tabela 2– Dados soldagem

Dados de soldagem	
Tensão	17V - 35V (usado em média 24V)
Corrente elétrica	60A - 420A (usado em média 280A)
Vazão de gás	7L/min - 10L/min
Proporção de gases	92% Ar - 8%CO ₂
Velocidade de consumo de arame	15m/min (média)

Fonte: Acervo do autor (2020)

As máquinas de soldagem são posicionadas conforme a Figura 19 apresentada a seguir, com desenho em AutoCad de planta de maquinário.

Figura 18– Layout de fluxo produtivo em soldagem



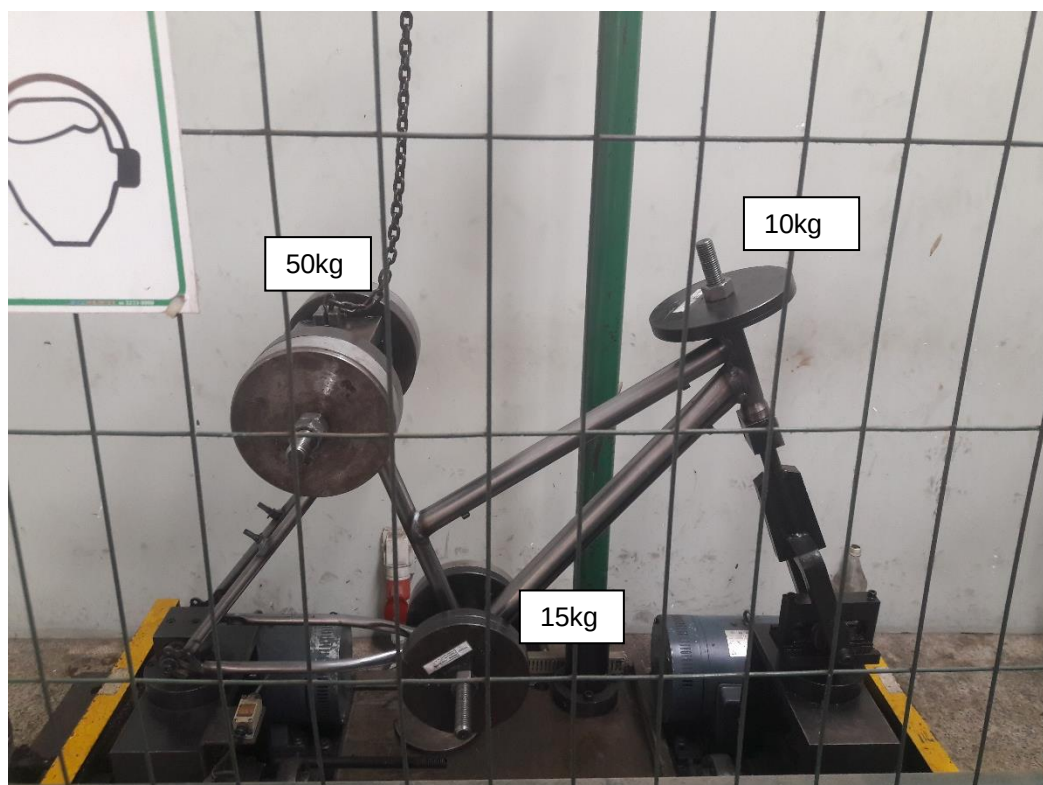
Fonte: Acervo do autor (2020)

A Figura 18 ilustra o fluxo produtivo de soldagem de quadros de aço, onde cada linha exemplificada (linha 3 e linha 4) responde por uma linha de produção distinta. Nessas linhas são produzidas as primeiras partes do quadro de aço. Após a soldagem, é analisado no quadro melhor região de obtenção de amostras.

3.2 Obtenção de amostra

Para rastrear o local onde possa ter maior incidência de discontinuidades microestruturais de soldagem, foi escolhido um modelo de quadro específico e avaliado em uma máquina de fadiga específica para ensaios desse tipo em bicicletas de aço. A Figura 19 exibe o quadro de bicicleta em máquina de fadiga.

Figura 19– Ensaio de fadiga em quadro de bicicleta



Fonte: Acervo do autor

O ensaio segue a norma 14714 (2013) que determina que cargas de 50kg, 15kg e 10kg foram posicionadas respectivamente, no tubo de selim, tubo do central e tubo de direção. Esse ensaio é utilizado para verificar a confiabilidade de um quadro de bicicleta baseado no número de ciclos que nesse estudo foram 100.000 ciclos como parâmetro e uma rotação de 400RPM.

Os principais locais de aparecimento de falhas são referentes aos equipamentos de soldagem representados como BNT086 e BNT0101, apresentados na Figura 19. Os locais de soldagem nos quadros, soldados nessas máquinas, foram os locais indicados para retirar as amostras. É válido destacar que essas amostras são obtidas de quadros de bicicleta vindos diretamente da linha de produção, o ensaio apenas indica estes locais, ou seja, as amostras não são obtidas dos quadros submetidos a ensaio por máquina de fadiga.

A Figura 20 aponta as amostras da região da bicicleta que foram retiradas do quadro de aço, onde a região soldada para análise microscópica foi cortada de forma posterior.

Figura 20– Região analisada



Fonte: Acervo do autor (2020)

A amostra foi cortada para a análise transversal da soldagem conforme Figura 20, de forma a contribuir para a aleatoriedade de percepção de discontinuidades de soldagem, que provavelmente estão espalhadas no decorrer de toda a região soldada. Na Figura 21 observa-se as regiões de corte para retirada da amostra.

Figura 21 - Região para análise de soldagem



Fonte: Acervo do autor (2020)

As amostras foram obtidas de cada bicicleta, sendo recolhidas 12 amostras diretamente do meio produtivo de acordo com os métodos de soldagem citados (tópico 3.1), para análise por meio de processamento computacional de imagens. Nessa análise deve ser desenvolvido um método padronizado e de alta confiabilidade, permitindo identificar e quantificar com mínima taxa de erro, quais as principais discontinuidades, para assim indicar possíveis modificações no modo de soldagem vigente. Tal método resulta em plugin, que gera extensão única em Imagej, como um novo registro de software.

Após essas modificações, mais 12 amostras são recolhidas para repetição da análise, de acordo com a portaria normativa nº 563 do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) para as bicicletas com quadro de aço infantis, com maior exigência quanto a segurança. Permitindo demonstrar que por meio de PDI, soluções para descontinuidades de soldagem se mostrem viáveis para a realidade da indústria metalúrgica.

3.3 Metalografia de materiais

Para análise microscópica é necessário metalografia com os procedimentos corretos para a obtenção de imagem de forma mais nítida, para que a aquisição de imagens não seja obstáculo para um adequado processamento computacional.

A amostra obtida foi embutida com resina acrílica em pó e catalisador de forma a auxiliar na fixação, para melhor visualização da secção de soldagem, que foi recortada de forma a exhibir apenas a região da zona fundida e com tamanho suficiente para embutimento, como na Figura 22.

Figura 22– Embutimento de amostras



Fonte: Acervo do autor (2020)

Foram embutidas 24 amostras de secções soldadas, que após embutimento foram lixadas e polidas, em duas máquinas Aropol Arotec, respectivamente específicas para o indicado, conforme exemplificado na Figura 23.

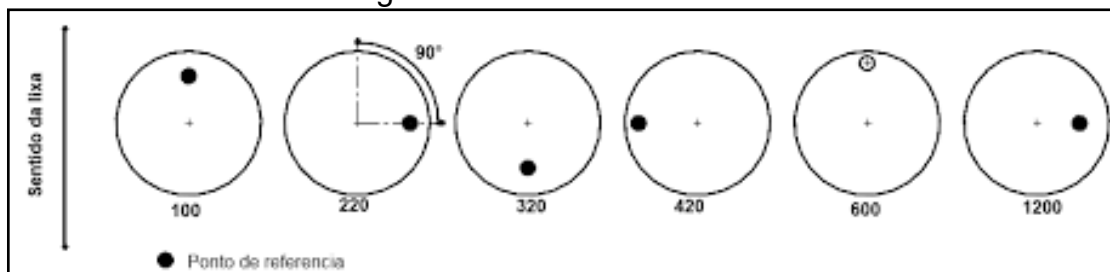
Figura 23– Politriz para lixamento e polimento



Fonte: Acervo do autor (2020)

O material foi lixado em uma sequência adequada de lixa, partindo da mais grossa para a mais fina em termos de partículas abrasivas: primeiro a lixa de 80, seguida pelas de 220, 320, 400, 600 e 1200, todas essas variando 90° da posição da peça conforme Figura 24, onde são exibidas as diferentes posições de um ponto da peça a ser lixada na máquina politriz.

Figura 24– Modo de lixamento



Fonte: Rohde (2010)

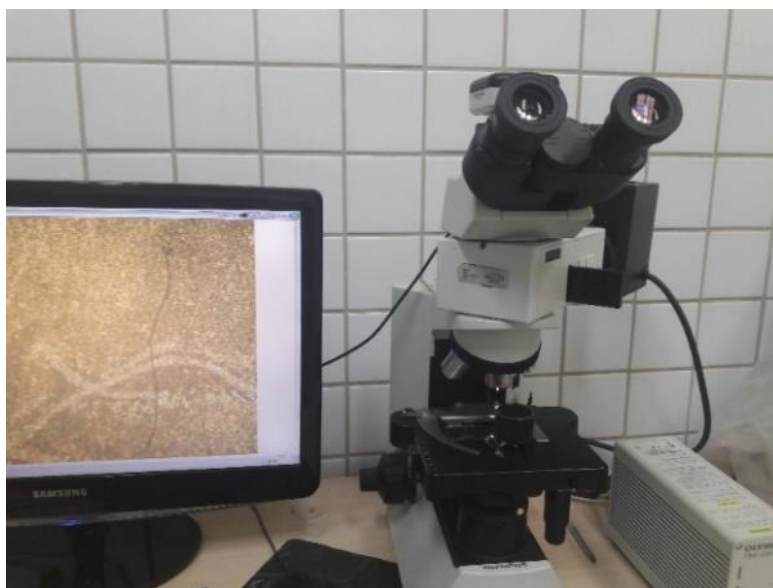
Após o lixamento foi realizado o polimento com pano de polimento específico, utilizando alumina seguido por ataque químico com Nital 2%, especificados conforme

norma NBR-8108 (2012) para aços baixo-carbono como o avaliado. Em seguida, a superfície foi limpa com álcool e seca com o auxílio de secador comum.

3.4 Aquisição de imagens

A microscopia da soldagem pode exibir diversos aspectos intrínsecos, como as suas descontinuidades estruturais. Para obter o máximo de informações para esse objetivo é necessária baixa ampliação, com exceção de investigações dentro da própria descontinuidade estudada, que não configura o objetivo desse processamento de imagens. As micrografias foram observadas por meio de Microscópio Óptico Olympus BX51M com câmera acoplada, conforme Figura 25.

Figura 25– Microscópio Olympus BX51M



Fonte: Acervo do autor – IFPI (2020)

Essas imagens foram capturadas em secção soldada sem embutimento, apenas com corte como mostrado na Figura 25, porém o foco ficou prejudicado, com dificuldades no brilho e nitidez das imagens obtidas. O embutimento contribuiu para melhorias na qualidade da imagem obtida.

O material utilizado (aço SAE1006) possui alta taxa de corrosão dificultando a aquisição de imagens. Como solução, o tempo entre o polimento, ataque químico e

visualização, foi mínimo.

Evitando a corrosão, a obtenção de imagens nítidas que revelem possíveis descontinuidades de soldagem presentes na microscopia, é o principal obstáculo. A utilização do Nital à 2%, associado a iluminação Köhler (muito comum a microscópios tradicionais), facilita a observação. Segundo Wayne (2019) esse método óptico que permite um método de visualização chamado de iluminação de campo escuro, uma técnica comum e aplicada desde os primeiros microscópios que permite visualizar melhor o contraste, auxiliando na investigação de fendas, poros e riscos.

Essas imagens microscópicas foram obtidas com ampliação total de 40x na zona de fusão, com ampliação de 10x no microscópio e de 4x na lente objetiva.

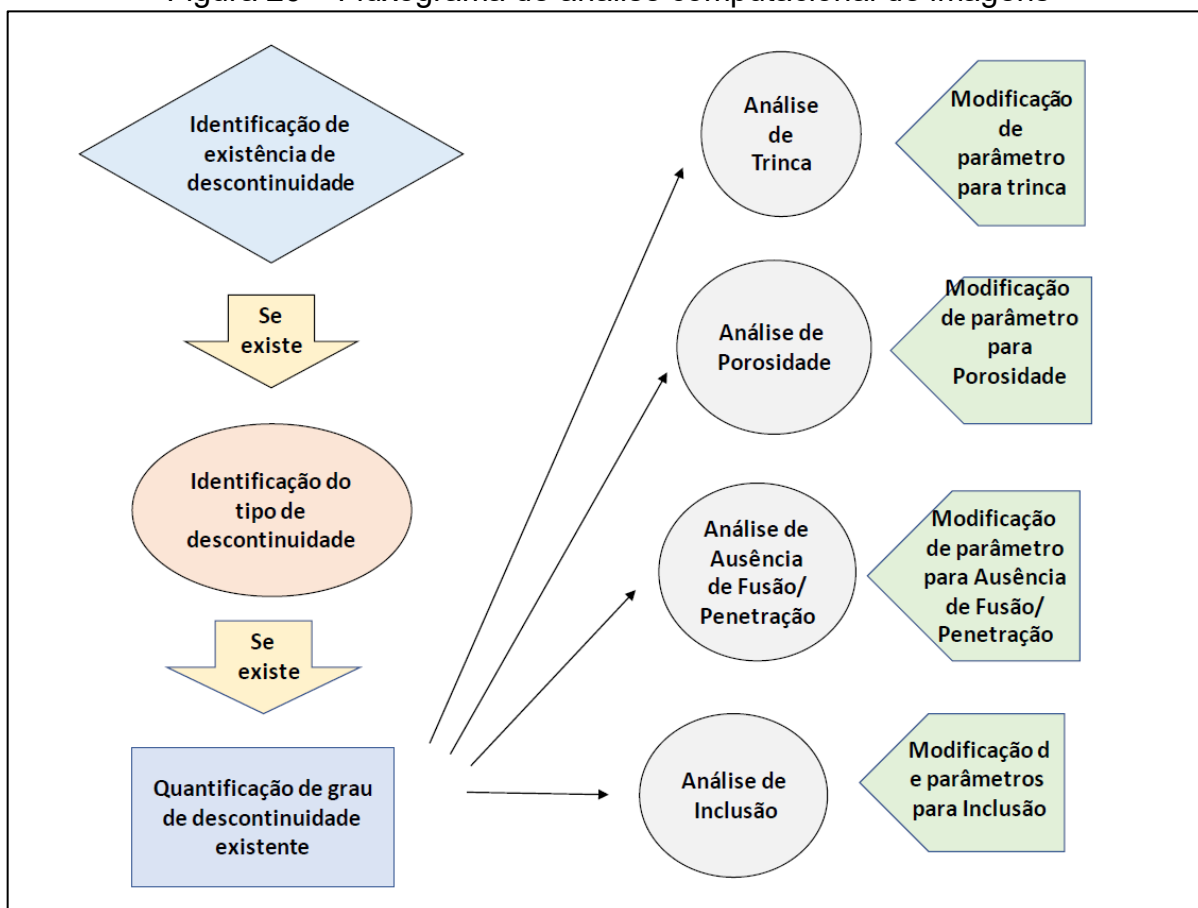
Tal ampliação foi escolhida pois é a menor ampliação microscópica possível, seguindo o indicado em Honeycombe (2017) que aponta que em menores ampliações microscópicas de soldagem melhores são as informações sobre descontinuidades.

Foram obtidas 12 amostras diretamente da linha de produção, e para cada uma foi analisada uma imagem microscópica e posteriormente foram adquiridas mais 12 amostras segundo este mesmo método de aquisição, porém modificando parâmetros de soldagem. As modificações desses parâmetros são baseadas na análise das 12 imagens iniciais, e serão detalhadas no tópico de resultados. É válido ressaltar que todas as imagens obtidas estão exibidas no apêndice sem processamento computacional.

3.5 Processamento computacional de imagens microscópicas

O processamento tem como objetivos a identificação e quantificação das discontinuidades de soldagem e segue o fluxograma da Figura 26 a seguir.

Figura 26 – Fluxograma de análise computacional de imagens



Fonte: Acervo do autor (2020)

O fluxograma inclui cada um dos obstáculos básicos a serem contornados para um processamento computacional satisfatório.

Inicialmente foi necessário identificar a existência de alguma discontinuidade, pois a primeira condição de análise é o reconhecimento da presença ou ausência de falta de homogeneidade na microestrutura da soldagem. Em seguida, separar por tipo cada discontinuidade encontrada, quantificar cada uma delas a fim de apontar qual discontinuidade que se manifesta como defeito.

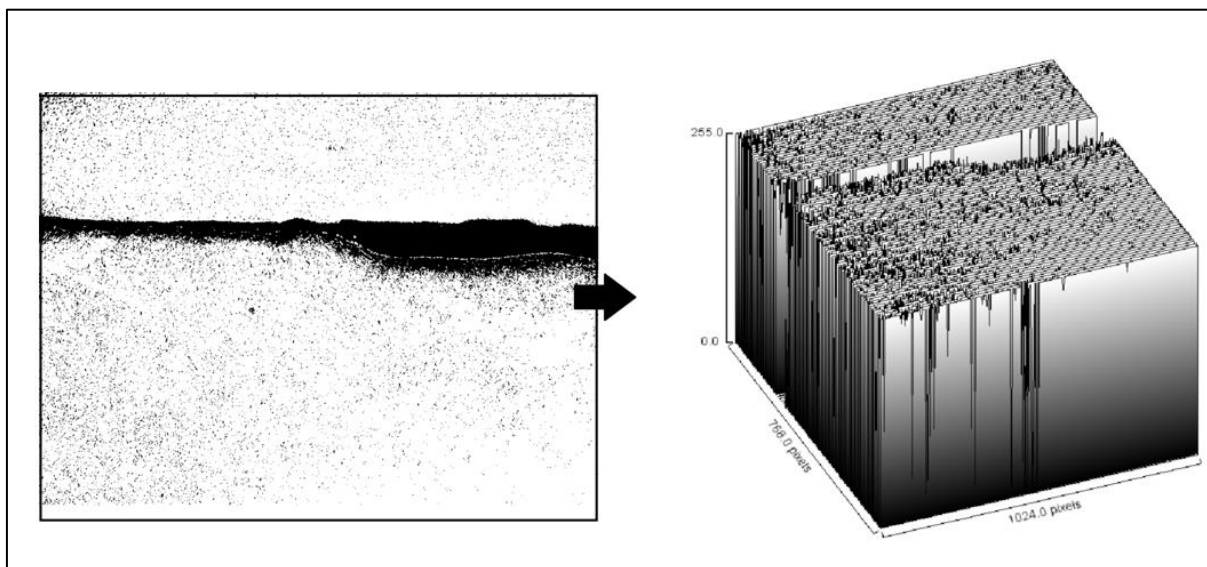
3.5.1 Identificação de existência das descontinuidades

O método de identificação foi orientado pelo conceito básico de descontinuidade de soldagem que é definido por Villani (2016) e Veiga (2011) como ausência de continuidade e homogeneidade na microestrutura de soldagem causada por razões distintas e se manifestando de maneiras diversas. As possíveis descontinuidades, elas deverão aparecer de forma semelhante, na forma de anomalias na microscopia da soldagem, porém cada uma com sua particularidade que a diferencia das demais, ou seja, mesmo que descontinuidades distintas possuam similaridades que as identificam como tal, todas têm um ponto em comum. No caso das descontinuidades estudadas, elas foram identificadas nas regiões mais escuras, ou seja, com o menor valor de pixel.

Essas regiões mais escuras são reveladas devido ao método de aquisição de imagem por meio de iluminação Köhler (muito comum a microscópios tradicionais) permite facilitar essa observação. Segundo Wayne (2019) esse método óptico permite um método de visualização chamado de iluminação de campo escuro, que é uma técnica comum aplicada desde os primeiros microscópios por permitir visualizar melhor o contraste, auxiliando na investigação de fendas, poros e riscos.

O método Köhler auxilia na investigação da imagem como ela é, ou seja, com a imagem em cores sem conversão inicial para 8 bits. O método de pré-processamento é focado em mostrar o que é descontinuidade e o que são apenas características da microestrutura soldada. Na maior parte das amostras existe a presença de regiões com mudanças abruptas nas intensidades dos pixels, ou seja, regiões predominantemente claras possuem em seu interior regiões escuras, exibindo possíveis falhas ou descontinuidades evidenciadas pelo método Köhler. A Figura 27 indica um exemplo da amostra 02, que se repete em diversas amostras.

Figura 27 – Intensidade de Pixel mostrada em superfícies morfológica



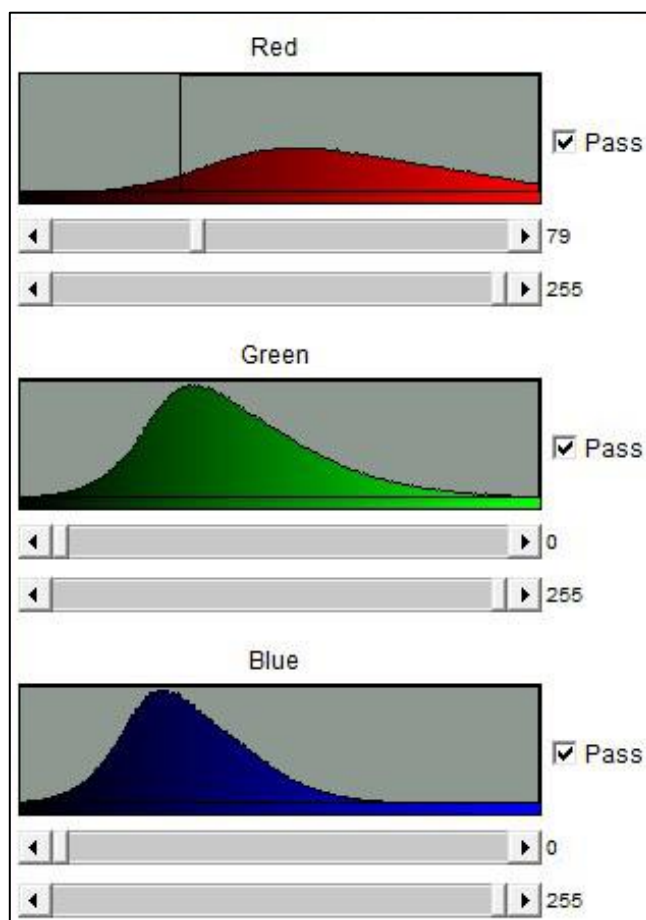
Fonte: Acervo do autor (2020)

Na Figura 27 foi realizada uma análise que não possui qualquer rotina de processamento, o que é aqui exemplificado basicamente como representação em 8 bits e segmentação sem modificações do natural, a fim de representar a imagem apenas em tons de cinza, para mostrar hipóteses a serem utilizadas antes do pré-processamento.

Na Figura 27, os vales representam os tons mais escuros e regiões mais claras estão mais ao topo. O proeminente vale se repete nas outras amostras, porém com diferentes intensidades, logo uma avaliação da existência de descontinuidades de soldagem guiada por essa intensidade de pixels é válida. De forma semelhante no trabalho de Kumar *et. al* (2014), as intensidades dos tons de cinza são usados como base para avaliação de defeitos e descontinuidades de soldagem.

Para esse propósito foi utilizado o *Threshold Color* para pré-processamento, predominantemente utilizado como método computacional de segmentação de imagens com grande variabilidade de cores. Nele é possível a aplicação de espaço RGB (iniciais de *Red*, *Green* e *Blue*) que utiliza três Histogramas nas cores vermelha, verde e azul. As imagens têm coloração predominantemente em amarelo e preto, logo a mudança no histograma *Red* possui maior relevância, visto que engloba a cor amarelada, apresentada na figura 28 a seguir.

Figura 28 – Histogramas de segmentação para espaço de cores

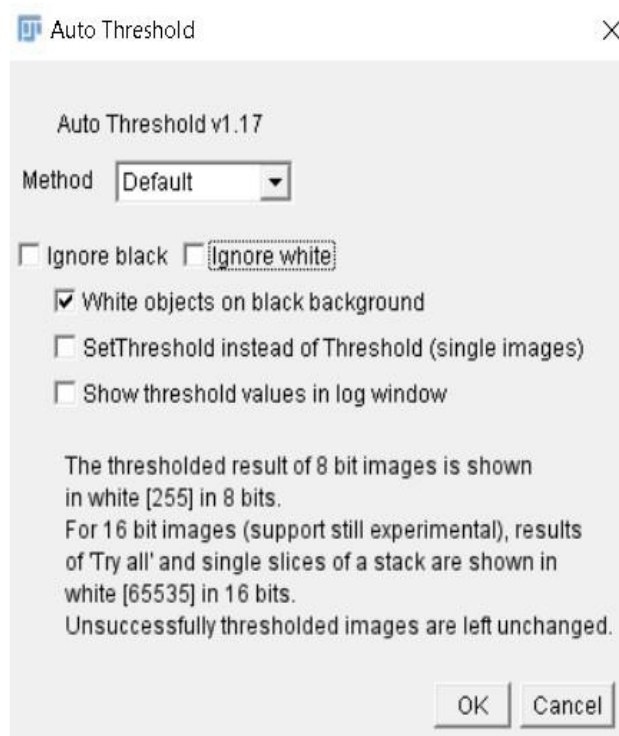


Fonte: Fonte: Acervo do autor – ImageJ/Fiji (2020)

Na Figura 28 é observado que a faixa utilizada para o histograma *Red* possui faixa entre 79 a 255, enquanto os demais são mantidos de 0 a 255. Com a utilização de um mecanismo muito presente chamado de *Dark Background* é invertido a zona de análise resultando na faixa entre 0 e 79. Isso significa que apenas as regiões mais escuras, onde se localizam as discontinuidades, serão analisadas, filtrando as demais partes da imagem.

Após a utilização do *Threshold Color*, a imagem foi convertida em 8 bits para análise de limiar de cinza. Em seguida foi realizada a segmentação, do atalho *Auto Threshold* no método padrão (*Default*), pois houve menor necessidade de destacar a discontinuidade, que obteve grande ênfase durante o pré-processamento. A Figura 29 apresenta o método de segmentação.

Figura 29 - Parâmetros utilizados pelo plugin *Auto Threshold*



Fonte: Acervo do autor – ImageJ/Fiji (2020)

A segmentação realizada por meio da *Auto Threshold* utilizando a versão padrão (default) foi referente ao método original de limiar automático disponível no ImageJ, que é uma variação do algoritmo *IsoData*. O método *IsoData* também é conhecido como relações iterativas com características semelhantes a mediana (Lind, 2012).

Para Ferreira (2012) o *Auto Threshold* utilizando a versão padrão (*default*) é um procedimento que divide a imagem em objeto e fundo tomando um limiar inicial, o que se ajusta na ideia utilizada durante esse pré-processamento, em que as regiões identificadas como fundo são filtradas (valor entre 79 e 255), enquanto a região de descontinuidade é destacada.

O pós-processamento se caracteriza por eliminar resquícios de ruídos na imagem, como a microestrutura estudada é resultado de uma soldagem e trata-se de uma mistura, é provável que elementos dessa mistura apareçam como regiões mais escuras e possam resultar em possíveis erros de identificação de descontinuidade.

A diferença sempre é a intensidade dos pixels, pois uma região com

descontinuidade sempre resulta em pontos menos intensos (pixels de valor menor) do que outras regiões. Assim um filtro *Median* atenua nesses ruídos, pois estabelece um valor médio de pixels eliminando os valores distantes desse valor, eliminando regiões que não contribuem para análise além de outras com inconvenientes, como por exemplo a própria escala.

O valor que mais se adequou a todas as imagens analisadas foi de 4 pixels de raio em relação ao valor de mediana das faixas analisadas, ou seja, para uma região de 4 pixels de raio os números inteiros com valores próximos ao valor de mediana dessa região foram selecionados, enquanto os demais foram eliminados.

Com base na sequência de processamento, as imagens sem descontinuidades apresentam apenas imagens sem nenhuma informação, ou seja, vazias, pois a análise identifica apenas as descontinuidades. Como foi obtido uma sequência única para identificação de existência de descontinuidade de soldagem, é possível uma padronização, e assim a criação de algoritmos.

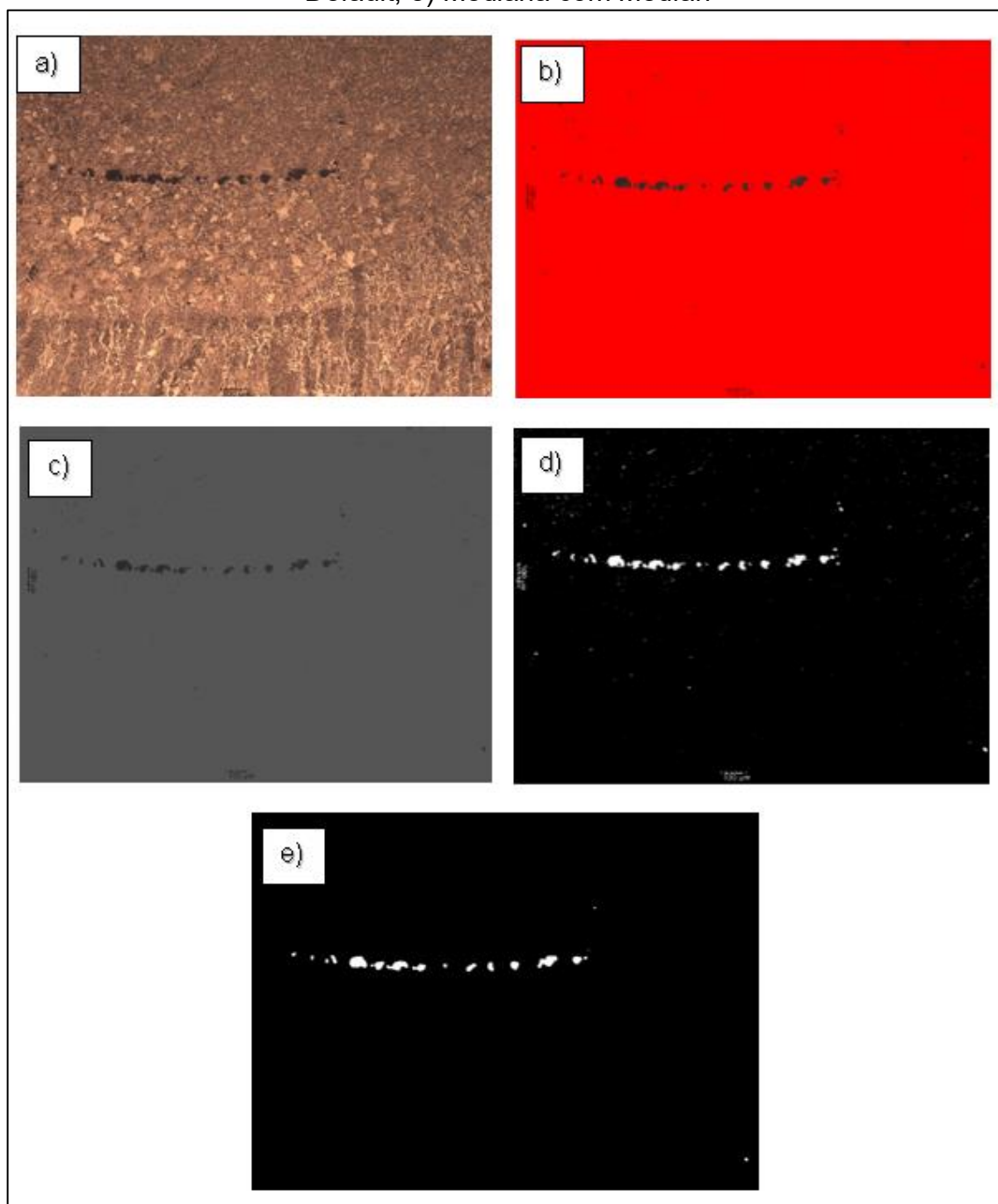
O ImageJ/Fiji possui a característica de criação de plugins baseados na sequência de processamento utilizado, de forma a anexar outros plugins integrados ao software. Muitos desses plugins são populares, pois são adaptados a diversos tipos de imagens microscópicas, seja de ordem biológica, química ou mesmo no caso da metalurgia.

O plugin criado amplia a velocidade de processamento, analisando as imagens em menores valores de tempo, na ordem de grandeza de segundos. Essa velocidade não reduz menor grau de confiabilidade das imagens obtidas, uma vez que o plugin apenas replica os métodos utilizados.

O plugin desenvolvido e utilizado como método de identificação da existência de descontinuidades apresenta a sequência de processos estabelecidos anteriormente, porém utilizando uma linguagem computacional em JAVA (forma padrão para programação do ImageJ/Fiji). Essa sequência é representada na Figura 30 abaixo.

Figura 30 - Sequência de Processamento de imagens: a) Imagem do microscópio; b) Pré processamento com Color Threshold; c) Imagem em 8bits; d) Segmentação

Default; e) Mediana com Median



Fonte: Acervo do autor (2020)

3.5.2 Identificação do tipo de descontinuidade

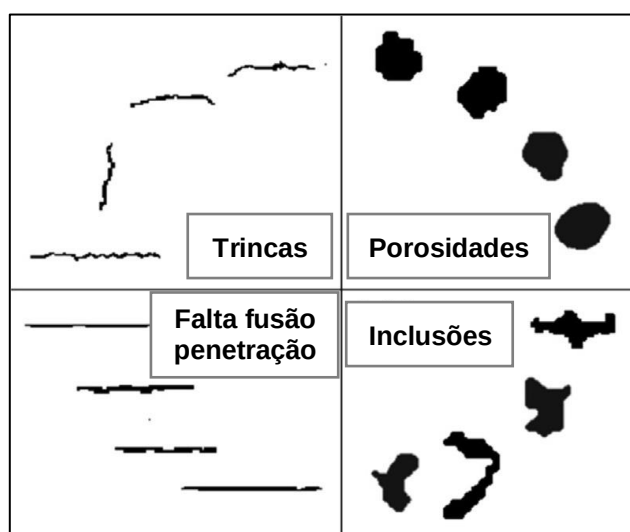
Para identificar o tipo de descontinuidade presente na microestrutura de soldagem foi necessário compreender as principais particularidades de cada uma. É válido destacar que a distinção acontecerá de forma geométrica, ou seja, dependendo

dos formatos apresentados nas microscopias, visto que a análise por grau de cinza não ocasiona diretamente em distinção da descontinuidade, pois como já exibido no tópico anterior, o limiar de cinza é semelhante para qualquer que seja a descontinuidade, contribuindo apenas para a identificação de existência.

As descontinuidades analisadas (porosidades, ausência de fusão/penetração, trincas e inclusões) são as mais visualizadas dentre todas, como relatado em Nizam *et. al* (2016) que evidenciou 60 trabalhos que tratam da identificação baseada em visão e classificação de defeitos ou descontinuidades em ambientes de soldagem.

Logo, analisar essas 4 anomalias em específico, configura a melhor opção, em que cada uma possui diferenças bem únicas em relação a outra. Em Nacereddine *et. al* (2019) as quatro descontinuidades são evidenciadas em cordão de soldagem com baixa ampliação, mas vistas por imagens radiográficas. A Figura 31 indica os principais formatos segmentados.

Figura 31 - Amostras dos dados das imagens binárias representando trincas, falta de penetração/fusão, porosidades e inclusões sólidas.



Fonte: Adaptado de Nacereddine *et. al* (2019)

Nessa figura é exibido o resultado da segmentação dos quatro tipos de descontinuidades. As trincas são exibidas como linhas sinuosas de pequena espessura e apresentadas de forma irregular, com diversos ângulos de direção, o que comprova a gravidade dessa descontinuidade sempre classificada também como defeito de soldagem.

A falta de fusão/penetração indica características parecidas com as trincas, porém são sempre lineares e contínuas, sempre apresentando a mesma direção para uma mesma imagem analisada.

As inclusões são mostradas como aspectos geométricos disformes, com configurações distintas, mais complexa para identificação. Porém, as porosidades possuem características elípticas ou circulares.

Estas características exigem que os plugins representem cada análise de descontinuidade, identificando-as. Os procedimentos para identificar cada descontinuidade utilizam o mesmo pré-processamento, segmentação e pós-processamento aplicado a identificação de existência, pois o objetivo geral é um procedimento único. As etapas subsequentes são referentes a um método de reconhecimento de padrões e extração de atributos que caracterizem a descontinuidade como tal.

3.5.2.1 Porosidade

As descontinuidades de porosidade são as mais facilmente identificáveis, visto seu formato geométrico uniforme e característico proveniente do formato das bolhas de gases que se desprendem da região soldada. Segundo Silva (2014), que avaliou e representou em formato 3D com ImageJ, uma representação dos defeitos de soldagem em solda subaquática, foi utilizado um parâmetro chamado Esfericidade (representado em “ Ψ ”).

Esse parâmetro é definido matematicamente como o inverso de compacidade apresentada na equação 7, que é uma relação exponencial obtida através da equação 6 representada pela variável “C” (Willian et. al, 2010).

$$C = \frac{V^2}{S^3} \quad (6)$$

$$\Psi = \frac{\pi^{1/3} 6V^{2/3}}{S} \quad (7)$$

No trabalho de Silva (2014) as variáveis são representadas por “V” e “S” nas equações 6 e 7 são respectivamente, o volume estimado da microscopia e a área visualizada. A compacidade representa um número com valores muito altos e difíceis

de controlar e analisar, com a esfericidade possuindo valores que ficam entre 0 e 1, mais manipuláveis, onde valores muito próximos a 1 são equivalentes a esfera.

Para resultados semelhantes sem necessidade de reconstrução via software para 3 dimensões, trabalhos como de Sá (2011) utilizam apenas as imagens como são obtidas e calculam a circularidade, obtendo resultados semelhantes aos obtidos para esfericidade. Também exemplificado em McFalls (2018) que indica a circularidade como método de avaliar porosidade em soldagem a laser. A equação 8 apresenta a relação matemática utilizada para definir a porosidade.

$$Cr = \frac{4\pi S}{p^2} \quad (8)$$

A equação 8 é proveniente de Lind (2012) e de livre acesso no próprio software ImageJ, representando em “Cr” a circularidade, em que as variáveis “S” e “p” representam respectivamente, a área e perímetro de região analisada. Assim como a esfericidade, a circularidade possui valores entre 0 e 1, em que o valor 1 representa uma circunferência.

Logo a aplicação da circularidade em um plugin automatizado, representa forma embasada de representar as descontinuidades porosas.

Para a implementação desse plugin foi utilizada a circularidade como base, além de programação do tópico anterior (3.5.1) com valores de porosidade utilizados foram de $0.8 < Cr < 1$. Essa margem foi utilizada valores inferiores a 0.8 englobam formatos que poderiam se assemelhar a inclusões, significando valores de comprimento muito maiores que o valor do próximo do comprimento de uma circunferência, afastando a possibilidade de ser um poro, que possui característica circular. Valores entre 0.81 e 0.92 causaram pouca diferença efetiva nos resultados aumentando apenas o tempo de processamento. Valores acima de 0.92 causaram a não identificação de poro, pois se aproxima muito dos valores referentes a uma circunferência perfeita.

3.5.2.2 Inclusão

As inclusões possuem aspecto parecido com as porosidades, pois se tratam de partículas alheias a microestrutura da mistura entre metal de base e material de adição que forma a região soldada, logo essas partículas em forma de grão e se alojam possuem geometria esférica, assemelhando-se a poros quando vistas em corte transversal na microscopia.

Porém esses grãos têm aspecto disforme, ou seja, sem forma geométrica coincidente como a porosidade, logo sua circularidade é também afetada. Em trabalhos como o de Margret *et. al* (2010) a inclusão é citada como um defeito circular de imagem, enquanto a ausência de fusão e trinca são vistos como defeito retangular de imagem.

Logo a verificação por meio de método semelhante a porosidade modificando apenas os parâmetros relacionados a grau de circularidade segue como hipótese aplicada em trabalhos como o de Nacereddine *et. al* (2019) que apresenta em 96 iterações com predominância de circularidade para o intervalo de $0.32 < Cr < 0.73$, em mais de 90% das amostras soldadas e obtidas por radiografia.

Para Silva (2014) na amostra soldada foram encontradas 250 inclusões com esfericidade com média de 0.55 e valor mínimo de 0.24 e máximo de 0.74, onde essa esfericidade representa um valor geométrico de aspecto circular em forma tridimensional.

Assim, para análise de circularidade os valores entre 0.3 e 0.75 incluem inclusão como descontinuidade existente.

A faixa restante fica entre 0 e 0.3, que deve ser indicada para a análise das demais descontinuidades, ou seja, uma variação utilizada para a ausência de fusão /penetração ou para trinca.

3.5.2.3 Ausência de fusão/penetração

Como citado no tópico anterior, em Margret *et. al* (2010), o defeito de ausência de fusão/penetração é considerado um defeito retangular, ou seja, em uma análise morfológica essas descontinuidades possuem características lineares. É válido

ressaltar que segundo Bai *et. al* (2017) a ausência de fusão/penetração possui naturalmente dimensões maiores que as encontradas em trincas, pois elas possuem uma continuidade, que dependendo de sua gravidade pode ser macroscópica.

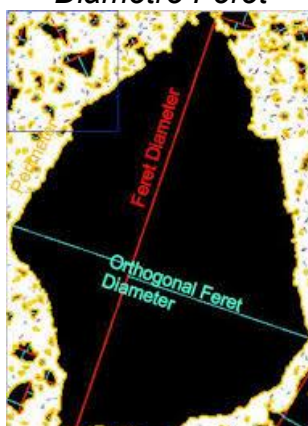
Para Bayat *et. al* (2019) essa descontinuidade possui linearidade que se destaca em detrimento das demais, possuindo no mínimo de poros com dimensões entre 100 e 150 μm de dimensão. Esses poros são causados não pelos motivos convencionais indicados nos tópicos anteriores relativos a porosidade, mas por um descolamento ocasionado pela retração de material soldado após resfriamento. Mukherjee *et. al* (2018) indica que algumas regiões com a falta de fusão/penetração possuem existência de porosidade ou inclusões nesses poros, porém o mais comum é existência de falha linear.

No geral a dimensão e a linearidade são os principais fatores que determinam a falta de fusão/penetração, possibilitando a confirmação com a presença de poros ou inclusões. Assim a extração de atributos é focada na análise por uso da ferramenta *Feret*.

Essa ferramenta foi matematicamente difundida pela primeira vez quando aplicada em um artigo de Church (1968) que implementou um comparativo entre o *Diâmetro Feret* e o *Diâmetro de Martin*. Nesse estudo, o diâmetro se relaciona a uma elipse posicionada em relação a um ângulo qualquer e os métodos de medida seriam linhas paralelas como parâmetro ou linhas que tocam a elipse de forma pontual (*Feret*), em que por método numérico é evidenciado a maior relevância do *Diâmetro Feret* e razão do *Diâmetro de Martin*.

Para Altuhafi *et. al* (2013) o *Diâmetro do Feret* representa o diâmetro do círculo circunscrito ou a maior distância entre dois pontos ao longo do limite do objeto. O trabalho de Kiekhaefer *et. al* (2013) aponta a aplicação de medições de minerais lunares através da utilização desse diâmetro. A Figura 32 apresenta a utilização desta ferramenta.

Figura 32 - Análise de forma de partículas de rególito lunar de seções finas por *Diâmetro Feret*



Fonte: Kiekhaefer *et. al* (2013)

Ambos os diâmetros são provenientes da elipse circunscrita a toda partícula analisada. Como observado o ângulo não deve variar o resultado final, porém pode causar pequenos erros de leitura, e para tal o ImageJ possui análise do *Diâmetro Feret* nos eixos x e y.

Para a análise de soldagem, a utilização dessa ferramenta aplicável em diferentes ocasiões ajusta-se a necessidade de averiguação da linearidade presente em uma ausência de fusão/penetração, somada a filtragem de casos com alto valor de circularidade (para essa descontinuidade só analisadas circularidades entre 0.0 e 0.3, como citado anteriormente).

Para atender as especificidades exigidas, foi implementado o valor de circularidade abaixo de 0.3, eliminando dúvidas de possíveis porosidades ou inclusões muito grandes. Além disso, é utilizado um tamanho mínimo de falha de 100 μm , representado por “row” que indica o *Diâmetro Feret*.

A avaliação de ausência de fusão/penetração inicialmente foi guiada por avaliação de regiões que estavam intercaladas por falha muito evidente na microscopia. Porém, isso não eliminaria a necessidade de um observador atuando em uma inspeção visual da falha, além de gerar possíveis erros em regiões muito próximas da região termicamente afetada. Conforme observado na avaliação de Nizam *et. al* (2016), que pesquisou cerca de 60 trabalhos relacionados ao processamento computacional de imagens microscópicas de soldagem, e em sua grande maioria, implanta rotinas de análise voltada para especificamente os pontos que se localizam as descontinuidades e não na região no qual estão imersas. Essa

Análise é válida para identificação e não para quantificação de descontinuidades e defeitos.

3.5.2.4 Trincas

As trincas são as descontinuidades mais graves, uma vez que se classifica como um defeito automaticamente, apenas por sua detecção (Villani, 2016). As demais descontinuidades só se classificam como defeitos caso possuam uma taxa alta em função da área a analisada.

Tais trincas possuem diversas dimensões, com características variadas dependendo do tipo que se apresenta, além dos aspectos do material de adição, material base e de parâmetros durante a soldagem (Stefane *et. al*, 2018). A trinca possui formato semelhante a uma linha sem direção definida, porém ao contrário da falha da ausência de fusão e penetração não possui linearidade, isso reflete diretamente em suas dimensões. As trincas não representam valores de *Feret* tão grandes como os de ausência de fusão/penetração. Logo, os valores desse diâmetro Feret utilizado foi menor que 100 μm .

4. RESULTADOS

4.1. Existência de descontinuidades

Para analisar descontinuidades de soldagem a principal condição é a existência das mesmas. Para a indústria em questão, os quadros de aço estão com qualidade abaixo das estabelecidas por norma especificada, logo a análise de existência de descontinuidades dentro da soldagem que causem problemas estruturais deve ser investigada.

Para isso, a criação de um plugin automatizado que elimine amostras com ausência de descontinuidades, pode indicar o percentual de amostras avaliadas com dúvidas e o quanto isso afeta o processo de fabricação. A Figura 33 indica o plugin implantado para análise de existência de descontinuidades.

Figura 33- Plugin de Identificação de existência de descontinuidade

```

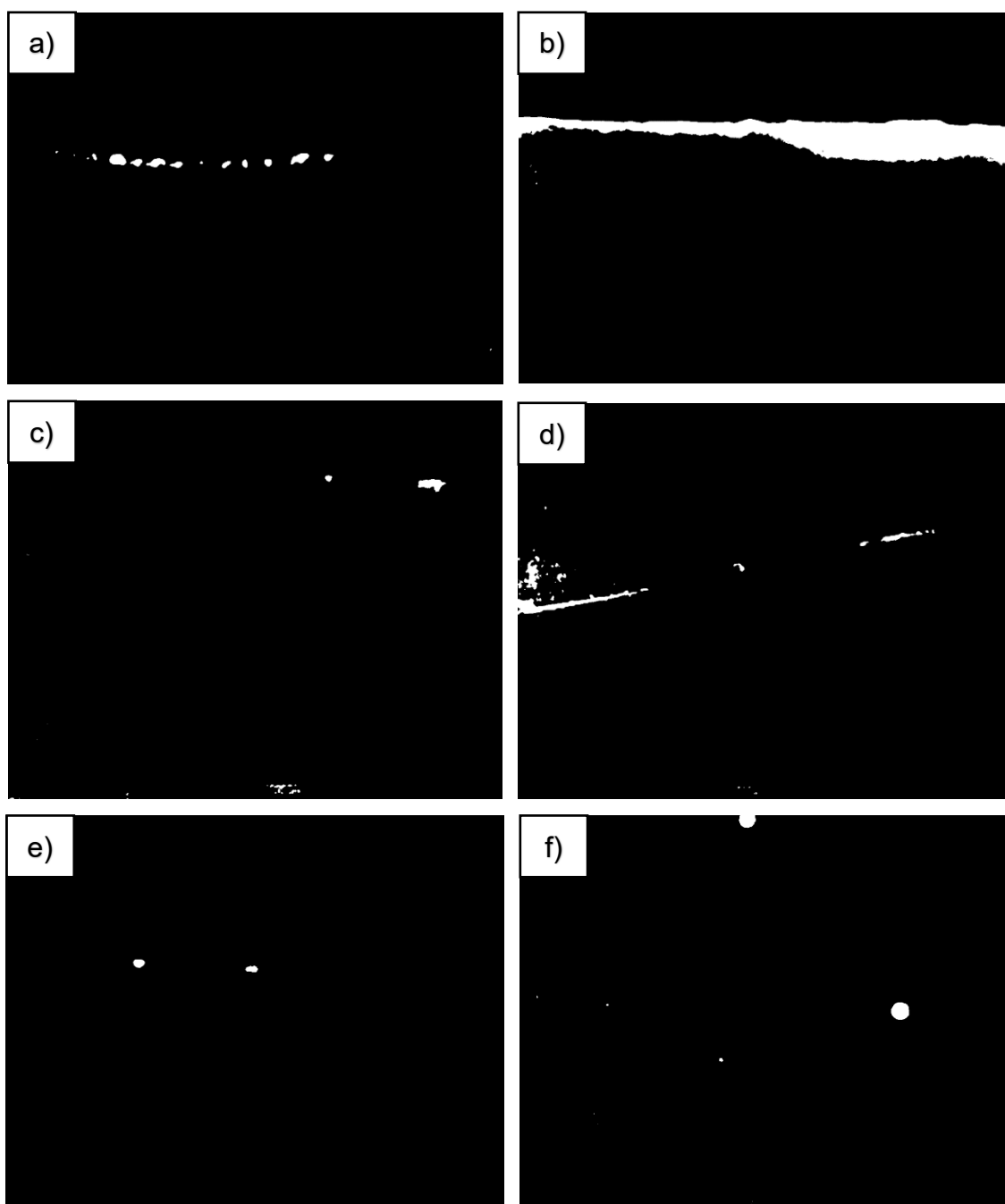
1 import ij.*;
2 import ij.process.*;
3 import ij.gui.*;
4 import java.awt.*;
5 import ij.plugin.*;
6
7 public class Identificação_Descontinuidade implements PlugIn {
8
9     public void run(String arg) {
10         ImagePlus imp = IJ.getImage();
11         IJ.run("Open...", "");
12         IJ.run(imp, "Color Threshold...", "");
13         // Color Threshold 2.0.0-rc-69/1.52n
14         // Autogenerated macro, single images only!
15         min=newArray(3);
16         max=newArray(3);
17         filter=newArray(3);
18         a=getTitle();
19         run("RGB Stack");
20         run("Convert Stack to Images");
21         selectWindow("Red");
22         rename("0");
23         selectWindow("Green");
24         rename("1");
25         selectWindow("Blue");
26         rename("2");
27         min[0]=79;
28         max[0]=255;
29         filter[0]="pass";
30         min[1]=0;
31         max[1]=255;
32         filter[1]="pass";
33         min[2]=0;
34         max[2]=255;
35         filter[2]="pass";
36         for (i=0;i<3;i++){
37             selectWindow(""+i);
38             setThreshold(min[i], max[i]);
39             run("Convert to Mask");
40             if (filter[i]=="stop") run("Invert");
41         }
42         imageCalculator("AND create", "0","1");
43         imageCalculator("AND create", "Result of 0","2");
44         for (i=0;i<3;i++){
45             selectWindow(""+i);
46             close();
47         }
48         selectWindow("Result of 0");
49         close();
50         selectWindow("Result of Result of 0");
51         rename(a);
52         // Colour Thresholding-----
53         IJ.run(imp, "8-bit", "");
54         IJ.setAutoThreshold(imp, "Default dark");
55         IJ.run(imp, "Maximum...", "radius=4");
56     }

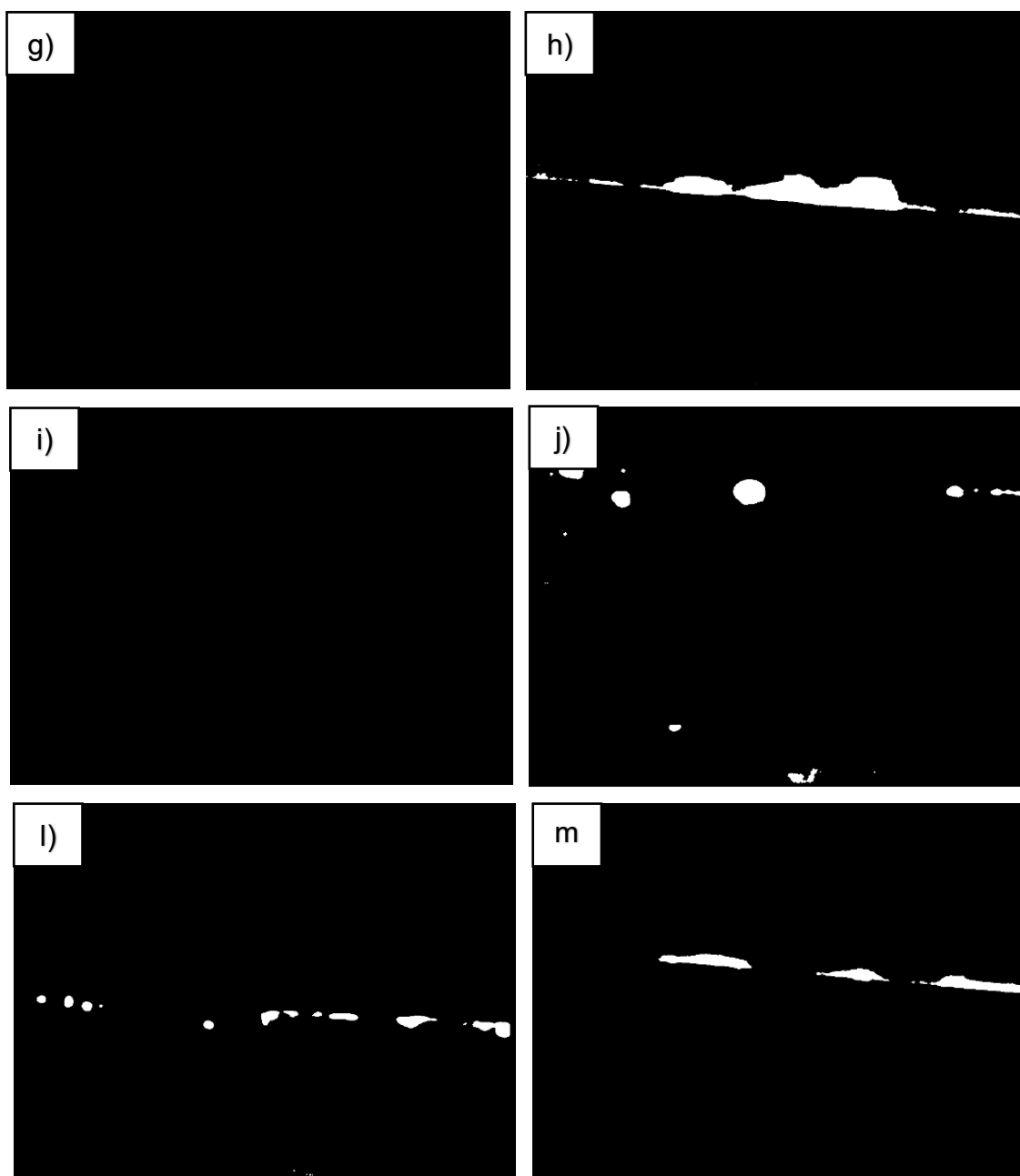
```

Fonte: Acervo do autor – ImageJ/Fiji (2020)

O Plugin indica rotina inédita para análise de existência de descontinuidades de soldagem em aço SAE 1006, aplicado diretamente em setor industrial. Todas as 12 amostras que foram retiradas do setor produtivos foram examinadas por meio desse plugin gerado, indicado na Figura 33, resultando nas imagens ilustradas na Figura 34.

Figura 34 – Amostras Processadas para análise de existência de descontinuidades de soldagem: a) Amostra 01; b) Amostra 02; c) Amostra 03; d) Amostra 04; e) Amostra 05; f) Amostra 06; g) Amostra 07; h) Amostra 08 ; i) Amostra 09; j) Amostra 10; l) Amostra 11; m) Amostra 12.





Fonte: Acervo do autor (2020)

Conforme observado nas micrografias nas Figura 34 g) e 34 i) não possuem imagem de processamento segmentadas após serem submetidos a rotina computacional presente no plugin representado na Figura 33. Isso significa que as possíveis falhas existentes, não representem descontinuidades de soldagem, ou que não possuam falha alguma na região soldada.

Logo, dentre as 12 amostras retiradas diretamente do processo produtivo, apenas 2 não possuíram existência de descontinuidade, o que representa 83,33% de amostras com algum tipo de falha estrutural.

Isso significa que o plugin desenvolvido atua nas micrografias de baixa ampliação em regiões soldadas, indicando a existência de descontinuidades de soldagem, porém não as especificando, não possibilitando ações para atenuá-las. Logo, a identificação é a parte da metodologia para delimitar plano de ação em setor produtivo, como para especificar e diversificar a forma de extração de características de uma imagem de região soldada.

É válido destacar que o plugin para identificação da existência de descontinuidades de soldagem atua de forma satisfatória dentro do objetivo estabelecido, possibilitando o desenvolvimento de novo registro de software para visualização de tais descontinuidades.

4.2. Identificação de descontinuidades

As descontinuidades foram isoladas dentro da imagem captada, e para a visão computacional foram simplificadas para avaliações em limiar de cinza que em regiões de descontinuidade podem ser avaliadas morfologicamente dentro de sua geometria.

4.2.1. Porosidades

O método de programação para identificação de porosidades, segue como continuação da utilizada na identificação de existência de descontinuidades, sendo assimilado como complemento.

Cada descontinuidade se torna ramificação do plugin inicial, ou seja, cada uma das 4 descontinuidades possui 4 diferentes plugins provenientes do utilizado na avaliação de existência.

A Figura 35 representa a ramificação indicada para porosidade de soldagem.

Figura 35 - Plugin de Identificação de Porosidade

```

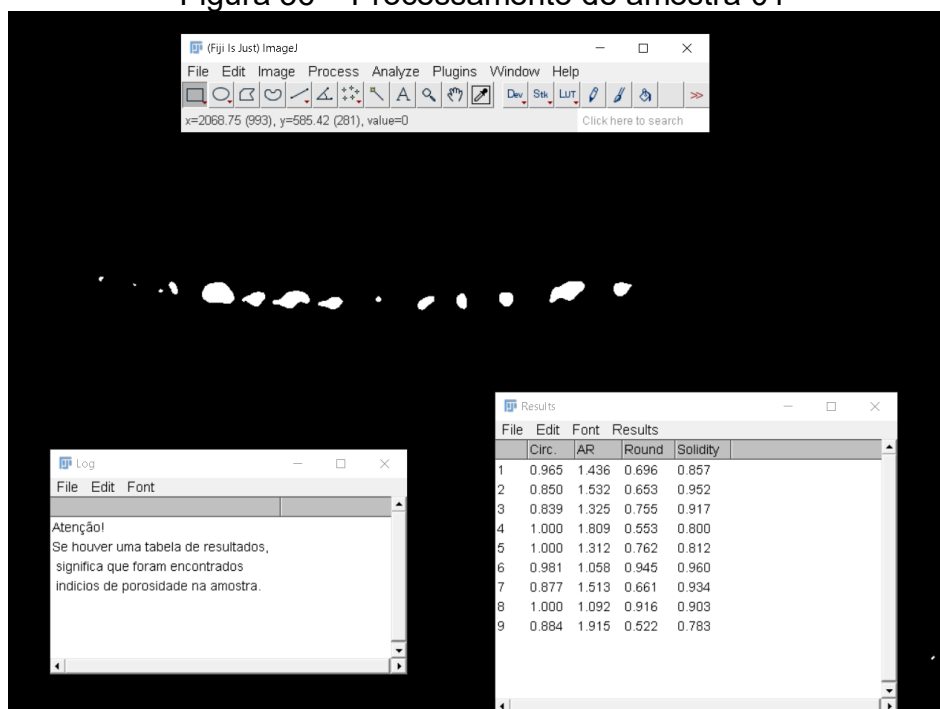
42 // Colour Thresholding-----
43 run("8-bit");
44 run("Auto Threshold", "method=Default dark");
45 run("Median...", "radius=4");
46 //Fechar Threshold Color
47 selectWindow("Threshold Color");
48 run("Close");
49 //Mostrar circularidade nos resultados
50 run("Set Measurements...", "shape redirect=None decimal=3");
51 //Calcular circularidade
52 run("Analyze Particles...",
53 " size=1-Infinity circularity=0.80-0.99 show=Nothing display clear");
54
55 print("Atenção!");
56 print("Se houver uma tabela de resultados,"
57 + "\n significa que foram encontrados"
58 + "\n indícios de porosidade na amostra.");

```

Fonte: Acervo do autor (2020)

O plugin implementado para porosidade responde segundo a figura 36.

Figura 36 – Processamento de amostra 01



Fonte: Acervo do autor (2020)

O software emite a resposta sobre a existência de poros na imagem: “Atenção! Se houver uma tabela de resultados, significa que foram encontrados indícios de porosidade na amostra”. Esta mensagem resulta em uma tabela indicando a

circularidade seus derivados matemáticos, que para esta análise são dispensáveis, pois a circularidade em si já é o suficiente para delimitar qual tipo de descontinuidade é especificada, porém é emitida automaticamente e será analisada.

O plugin não consegue detectar a fração de área automaticamente, pois lê as descontinuidades como regiões distintas e detecta 100% em todos os poros, como exemplificado na tabela de resultados da amostra 01 exibida na Figura 37.

Figura 37 – Erro em amostragem de fração de área da amostra 01

	Circ.	%Area	AR	Round	Solidity
1	0.965	100	1.436	0.696	0.857
2	0.850	100	1.532	0.653	0.952
3	0.839	100	1.325	0.755	0.917
4	1.000	100	1.809	0.553	0.800
5	1.000	100	1.312	0.762	0.812
6	0.981	100	1.058	0.945	0.960
7	0.877	100	1.513	0.661	0.934
8	1.000	100	1.092	0.916	0.903
9	0.884	100	1.915	0.522	0.783

Fonte: Acervo do autor (2020)

Conforme a utilização do plugin, cada amostra foi avaliada e representada nas tabelas de 3 a 10 que indicam resultados obtidos para porosidade. Essas tabelas exibem a circularidade, apenas as acima de 0.8, além de exibir a grandeza *Round* que é a relação de perímetro entre a circunferência circunscrita e o perímetro da região analisada e *AR* o seu inverso, em que *Solidity* é a área convexa pelo seu perímetro. Apenas *Solidity* apresentou alguma relação de acréscimo ou decréscimo com variação de circularidade. Essas nomenclaturas da tabela: *Round*, *Solidity* e *AR*, são assim colocados literalmente em inglês em detrimento da existência de traduções distintas em trabalhos diferentes, como por exemplo em Da Silva (2014), Parccionik *et. al* (2010). É válido indicar que as demais amostras não apresentaram resultados de porosidade

Tabela 3 – Resultados de porosidade para amostra 01

Amostra 01				
	Circularidade	AR	Round	Solidity
1	0.965	1.436	0.696	0.857
2	0.850	1.532	0.653	0.952
3	0.839	1.325	0.755	0.917
4	1.000	1.809	0.553	0.800
5	1.000	1.312	0.762	0.812

6	0.981	1.058	0.945	0.960
7	0.877	1.513	0.661	0.934
8	1.000	1.092	0.916	0.903
9	0.884	1.915	0.522	0.783
% Área = 0.381				

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 4 - Resultados de porosidade para amostra 03

Amostra 03				
	Circularidade	AR	Round	Solidity
1	0.956	1.124	0.890	0.940
2	0.967	1.579	0.633	0.889
3	1.000	1.500	0.667	1.000
4	1.000	1.159	0.863	0.897
% Área = 0.138				

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 5 - Resultados de porosidade para amostra 04

Amostra 04				
	Circularidade	AR	Round	Solidity
1	1.000	1.295	0.772	0.857
2	0.949	1.461	0.685	0.948
3	1.000	1.000	1.000	1.000
4	0.835	1.791	0.558	0.921
5	0.913	1.232	0.812	0.915
6	0.971	1.417	0.706	0.933
7	1.000	1.000	1.000	1.000
8	1.000	2.000	0.500	1.000
9	0.827	1.274	0.785	0.915
10	0.914	1.605	0.623	0.800
11	1.000	1.000	1.000	1.000
12	1.000	1.000	1.000	1.000
% Área = 0.206				

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 6 - Resultados de porosidade para amostra 05

Amostra 05				
	Circularidade	AR	Round	Solidity
1	0.911	1.308	0.764	0.927
% Área = 0.081				

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 7 - Resultados de porosidade para amostra 06

Amostra 06				
	Circularidade	AR	Round	Solidity
1	0.831	1.385	0.722	0.958
2	0.820	1.363	0.734	0.800
3	0.932	1.094	0.914	0.968
4	1.000	1.263	0.792	0.919
5	0.945	1.194	0.837	0.911
% Área = 0.769				

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 8 - Resultados de porosidade para amostra 08

Amostra 08				
	Circularidade	AR	Round	Solidity
1	1.000	1.553	0.644	0.909
2	0.803	2.086	0.479	0.907
3	1.000	1.500	0.667	1.000
% Área = 0.072				

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 9 - Resultados de porosidade para amostra 10

Amostra 10				
	Circularidade	AR	Round	Solidity
1	0.973	1.052	0.950	0.909
2	1.000	1.144	0.874	0.889
3	0.887	1.199	0.834	0.964
4	0.838	1.413	0.708	0.932
5	0.928	1.221	0.819	0.851
6	0.903	1.156	0.865	0.962
7	0.943	1.092	0.916	0.846
8	1.000	1.464	0.683	0.857
9	1.000	1.553	0.644	0.909
10	1.000	1.000	1.000	1.000
11	0.824	1.722	0.581	0.918
12	0.873	1.000	1.000	0.714
% Área = 1.004				

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 10 - Resultados de porosidade para amostra 11

Amostra 11				
	Circularidade	AR	Round	Solidity
1	0.969	1.107	0.903	0.952
2	0.921	1.327	0.754	0.955
3	0.924	1.043	0.959	0.941
4	1.000	1.147	0.872	0.909
5	0.931	1.191	0.840	0.934
6	1.000	1.380	0.725	0.875
7	1.000	1.553	0.644	0.909
8	1.000	2.000	0.500	1.000
% Área = 1.249				

Fonte: Acervo do autor (2020)

Assim o valor percentual da fração de área será analisado sempre válidas para regiões com circularidade maiores que 0.8. Logo, foram utilizados diversas referências de normas de ensaios não destrutíveis e trabalhos com ultrassonografia, pois por meio de microscopia desejam-se os mesmos efeitos de ensaios complexos, porém com visão artificial e processamento de imagens. Dentre as normas a API Standart (1999) indica que um valor acima de 8% de porosidades em relação a área observada representa um defeito de soldagem enquanto na norma ASME V (2015) de avaliação não destrutiva de soldagem que indica 5% de poros em relação a região analisada. Assim como citado em Singh (2016) a porcentagem equivale a 5% do somatório das áreas dos poros. Assim a fração de área de poros em relação a área observada a ser considerada como defeito é de 5%.

Conforme avaliado nas tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 possuem 8 amostras que apresentaram porosidades, em que todas possuem fração de área abaixo dos 5%, indicando que esses poros constituem descontinuidade que não caracteriza defeito, logo não se faz necessário a modificação de parâmetros para soldagem.

4.2.2. Inclusão

Para a inclusão a dimensão é o parâmetro mais importante, visto que a inclusão deve ser evitada sempre que possível, mesmo não representando descontinuidade tão grave quanto as demais. O tamanho ideal de inclusões está associado à sua

composição. O tamanho ótimo dos óxidos de Titânio foi de 2,0 μm das partículas e os de Sulfeto de Manganês foi superior a 1,0 μm , como relatado por Hajeri et al. (2016). O tamanho ideal de inclusões de óxidos de Alumínio e Enxofre varia de 0,5 a 1,5 μm , conforme relatado por Huang et al. (2015). As inclusões compostas de Manganês (Mn) devem ser menores que 0,85 μm conforme investigado por Mu et al. (2014), as inclusões compostas por Magnésio devem estar na faixa de 0,3 a 0,8 μm de acordo com a pesquisa de Zhang et al. (2015).

Assim, pode-se concluir que a faixa de ampliação do microscópio exibe apenas inclusões maiores que os 2,0 μm . Logo, qualquer inclusão identificada pode ser considerada como defeito de soldagem.

Assim como na porosidade, o software emite a resposta sobre a existência de poros na imagem: “Atenção! Se houver uma tabela de resultados, significa que foram encontrados indícios de inclusão na amostra”. Esta mensagem resulta em uma tabela indicando dimensão de inclusão por diâmetro *Feret*, e sua circularidade. É válido dizer que o diâmetro Feret serve para quantificar o grau de gravidade de uma descontinuidade de soldagem, porém não é um método de reconhecimento de padrões como para trinca e ausência de fusão/penetração, ou seja, serve para quantificar um padrão reconhecido por circularidade.

A Figura 38 representa o plugin indicado para inclusão de soldagem.

Figura 38 - Plugin de Identificação de Inclusão

```

40 selectWindow("Result of Result of 0");
41 rename(a);
42 // Colour Thresholding-----
43 run("8-bit");
44 run("Auto Threshold", "method=Default dark");
45 run("Median...", "radius=6");
46 //Fechar Threshold Color
47 selectWindow("Threshold Color");
48 run("Close");
49 //Mostrar circularidade nos resultados
50 run("Set Measurements...", "shape redirect=None decimal=3");
51 //Calcular circularidade
52 run("Analyze Particles...",
53 " size=1-Infinity circularity=0.3-0.75 show=Nothing display clear");
54
55 print("Atenção!");
56 print("Se houver uma tabela de resultados,"
57 + "\n significa que foram encontrados"

```

Fonte: Acervo do autor (2020)

As tabelas 11 a 13 exibem os resultados de inclusão.

Tabela 11 - Resultados de inclusão para amostra 04

Amostra 04		
	Circularidade	Dimensão (μm)
1	0.349	52.250
2	0.674	64.314
3	0.323	55.002
4	0.691	44.145
5	0.557	42.492
6	0.694	15.167
7	0.745	28.336
8	0.634	31.250
9	0.718	12.861

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 12 - Resultados de inclusão para amostra 08

Amostra 08		
	Circularidade	Dimensão (μm)
1	0.717	69.253
2	0.318	29.241
3	0.725	13.176

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 13 - Resultados de inclusão para amostra 12

Amostra 12		
	Circularidade	Dimensão (μm)
1	0.335	36.384

Fonte: Acervo do autor (2020)

Nas amostras 04, 08 e 12 foram encontradas inclusões de soldagem, identificadas como tais devido sua circularidade. A menor inclusão possui 12.861 μm e a maior chega a 69.253 μm , ou seja, possuem dimensões bem acima do indicado como inclusão ideal em outros trabalhos já citados no início deste tópico, que indicam com valores entre 0.3 e 2 μm .

Por meio dos resultados das tabelas 11 a 13, é apontada a pequena quantidade de inclusões, exemplificado na amostra 12 só possui uma descontinuidade identificada com dimensões bem elevadas (acima de 2 μm), indicando a possibilidade

dessas inclusões serem causadas pela ausência de fusão/penetração.

Desta forma a descontinuidade de inclusão pode ser considerada um defeito de soldagem, podendo causar tensões internas à microestrutura soldada, pois cria ausência de coesão interna, porém sua causa efetiva pode estar ligada a ausência de fusão/penetração, com já citado em Mukherjee *et. al* (2018).

4.2.3. Ausência de fusão/penetração

A ausência de fusão/penetração segue com uma análise baseada em sua retangularidade e dimensões, utilizando o diâmetro *Feret* como princípio de reconhecimento de padrões e extração de características conforme exibido no plugin indicado na figura 39.

Figura 39 - Plugin de Identificação de Ausência de fusão/penetração

```

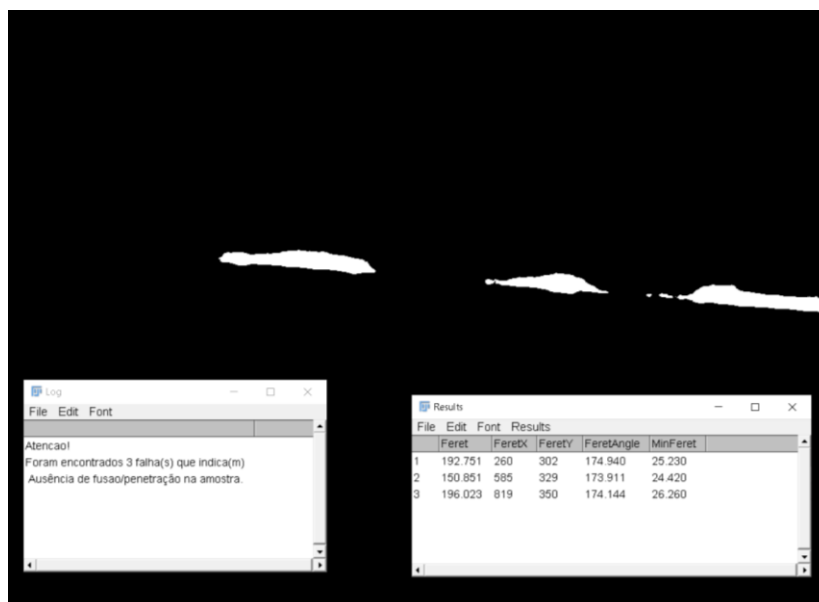
50 // Mostrar resultados do diâmetro de Feret
51 run("Set Measurements...", "feret's redirect=None decimal=3");
52
53 //Calcular circularidade
54 run("Analyze Particles...",
55 " size=1-Infinity circularity=0.00-0.3 show=Nothing display clear");
56
57
58 rows = eval("js","Analyzer.getResultsTable().size()");
59
60 //print("rows: " + rows);
61
62 ocorrencias = 0;
63
64 for ( i=0; i<rows; i++){
65     row=eval("js","Analyzer.getResultsTable().getStringValue('"+
66     "Feret"+"', "+i+"");
67     if(row!=" " && parseFloat(row) > 100){
68         //print(row);
69         ocorrencias += 1;
70     }
71 }
72
73 if (ocorrencias > 0) {
74     print("Atencao!");
75     print("Foram encontrados " + ocorrencias
76     + " falha(s) que indica(m)"
77 + "\n Ausência de fusao/penetração na amostra.");
78 } else {
79     print("Não foram encontrados indícios da "
80     + "\n Ausência de fusao/penetracão na amostra.");
81 }

```

Fonte: Acervo do autor (2020)

O plugin implementado para a ausência de fusão/penetração responde segundo a figura 40.

Figura 40 - Processamento de amostra 12.



Fonte: Acervo do autor (2020)

O software emite a resposta sobre a ausência de fusão/penetração na imagem, “Foram encontrados ‘x’ falha (s) que indica (m) Ausência de fusão/penetração na amostra”, resultando em uma tabela indicando todas as dimensões Feret (nos eixos x e y além dos ângulos) e esse ‘x’ representa a quantidade de falhas. Para a não identificação de descontinuidade, emite a mensagem: “Não foram encontrados indícios de Ausência de fusão/penetração na amostra”, resultando em uma tabela com resultados que justifiquem a resposta do plugin. As Tabelas 14 a 17 apresentam os resultados das falhas identificadas como ausência de fusão/penetração.

Tabela 14 - Resultados de ausência de fusão/penetração para amostra 02

Amostra 02					
	Feret (μm)	Feret X(μm)	Feret Y(μm)	Ângulo Feret ($^{\circ}$)	Feret mínimo (μm)
1	1.028.125	0	217	174.866	90.874
Nº de Falhas = 1					

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 15- Resultados de ausência de fusão/penetração para amostra 04

Amostra 04					
	Feret (μm)	Feret X(μm)	Feret Y(μm)	Ângulo Feret (°)	Feret mínimo (μm)
1	108.853	939	357	10.587	16.604
2	314.396	0	547	10.631	41.109
N° de Falhas = 2					

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 16- Resultados de ausência de fusão/penetração para amostra 08

Amostra 08					
	Feret (μm)	Feret X(μm)	Feret Y(μm)	Ângulo Feret (°)	Feret mínimo (μm)
1	602.164	232	353	175.142	66.509
2	134.729	890	407	174.036	13.453
N° de Falhas = 2					

Fonte: Acervo do autor (2020)

Tabela 17- Resultados de ausência de fusão/penetração para amostra 12

Amostra 12					
	Feret (μm)	Feret X(μm)	Feret Y(μm)	Ângulo Feret (°)	Feret mínimo (μm)
1	192.751	260	302	174.940	25.230
2	150.851	585	329	173.911	24.420
3	196.023	819	350	174.144	26.260
N° de Falhas = 3					

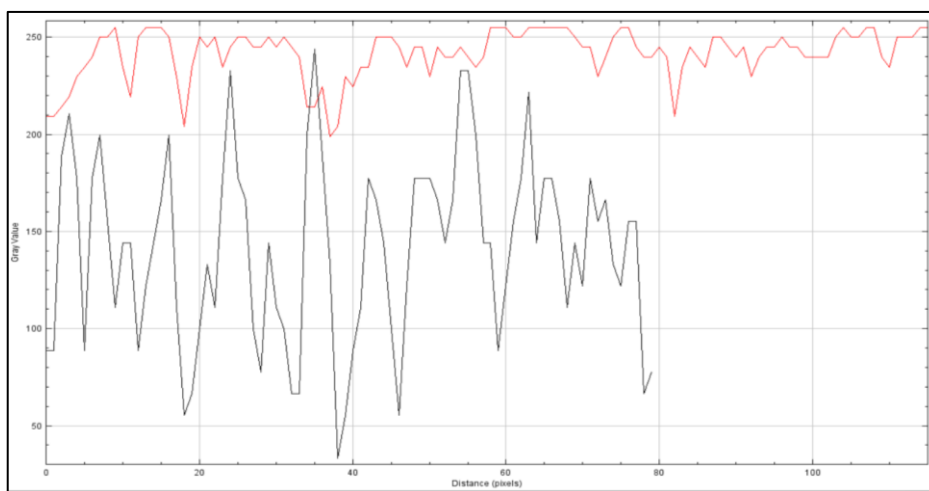
Fonte: Acervo do autor (2020)

Para quantificação das falhas o diâmetro *Feret* indica que quanto maior a falha, mais grave é a descontinuidade, indicando uma média em todas as amostras de 340.987 μm. Porém, verificar os tons de cinza nas regiões entre falhas confirma existência de ausência de fusão e penetração, pois significa que são duas microestruturas distintas.

É válido ressaltar que a verificação das regiões não é parâmetro para identificar a descontinuidade, mas serve como confirmação de falha já identificada e como quantificação do grau de penetração da soldagem em metal base. Para essa medição a imagem microscópica é simplesmente transformada em 8 Bits e segmentada de forma automática de forma a manter a imagem mais próxima do original.

Antes da análise, a Figura 41 abaixo apresenta um gráfico da amostra 08, para melhor compreensão.

Figura 41 – Gráfico de Tons de cinza por pixel da amostra 08



Fonte: Acervo do autor (2020)

De acordo com os resultados o eixo y representa o tom de cinza, que no software ImageJ/FIJI exibe como valor máximo de 255, indicando a cor branca, e o mínimo exibe 0, indicando a cor negra, enquanto o eixo x representa a distância entre os pixels medidos. Com essa plotagem é possível analisar por meio da amplitude, entre picos e vales das curvas, o grau de penetração da soldagem.

É válido destacar que, regiões claras indicam que o metal foi pouco modificado, pois aços de baixo carbono, como o aço SAE 1006, apresentam microestruturas com homogeneidade de tons de cores, normalmente apresentando tons predominantemente claros durante a conversão para o limiar de cinza.

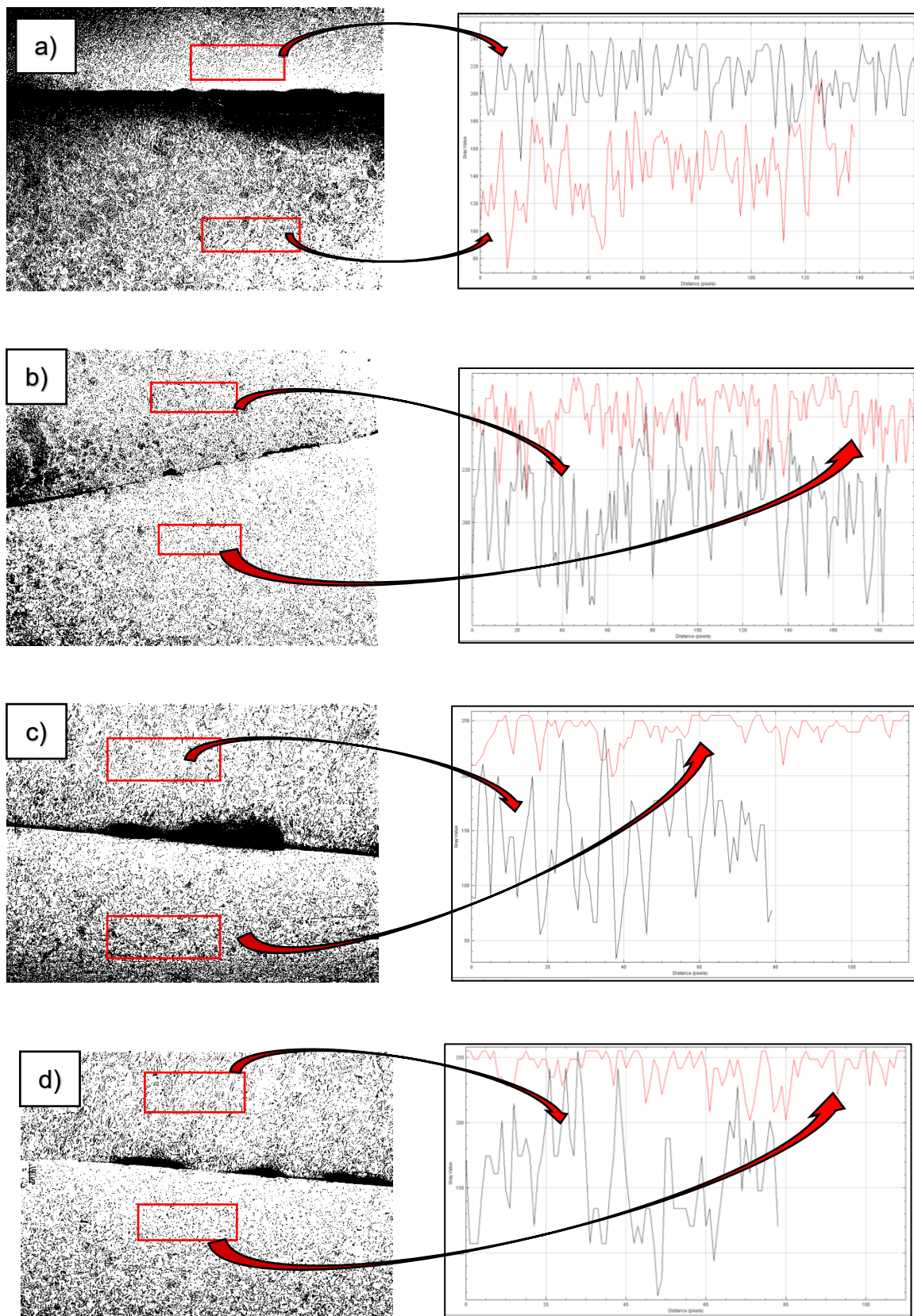
A curva de cor preta se localiza mais abaixo no gráfico da figura 42, ou seja, a maior parte dos pixels são mais escuros, indicando uma microestrutura mais difundida, enquanto existe uma amplitude muito grande entre os tons de cinza indicando mistura mais acentuada na poça de soldagem.

A curva vermelha se localiza mais acima no gráfico da figura 42, ou seja, a maior parte dos pixels são mais claros, indicando uma microestrutura menos difundida, enquanto existe uma amplitude menor entre os tons de cinza, indicando mistura menos acentuada na poça de soldagem.

As amostras com falhas indicando indício de ausência de fusão/penetração de

soldagem foram assim analisadas. Na figura 43 abaixo é mostrada a análise.

Figura 42 – Análise por tons de cinza em amostras com ausência de fusão/penetração: a) Amostra 02; b) Amostra 04; c) Amostra 08; d) Amostra 12



Fonte: Acervo do autor (2020)

Todas as amostras exibem diferenças entre as regiões separadas pela falha, apesar de visualmente ser imperceptível. As regiões possuem tons de cinza muito distintos entre si, revelando pouca difusão de soldagem no metal base, além de falhas de dimensões com média de 340.987 μm e inclusões em 3 das 4 amostras, provavelmente por consequência da descontinuidade. Com base nesses resultados, é possível deduzir que a ausência de fusão/penetração é considerada um defeito de soldagem.

4.2.4. Trincas

De acordo com o plugin para trinca, não foram encontrados nenhuma descontinuidade relacionada a trinca em nenhuma das amostras. Todas retornaram “Não há nenhum indício de trinca na amostra”. Levando a considerar duas hipóteses: não existe defeito de trinca em nenhuma das amostras ou o plugin eliminou as possíveis trincas existentes às identificando como ruídos. Para prosseguimento de plano de ação para modificação de parâmetros as trincas não foram levadas em consideração. A Figura 43 representa o plugin indicado para trinca de soldagem.

Figura 43 - Plugin de Identificação de Trinca

```

53 //Calcular circularidade
54 run("Analyze Particles...",
55 " size=1-Infinity circularity=0.00-0.3 show=Nothing display clear");
56
57
58 rows = eval("js","Analyzer.getResultsTable().size()");
59
60 //print("rows: " + rows);
61
62 ocorrencias = 0;
63
64 for ( i=0; i<rows; i++){
65     row=eval("js","Analyzer.getResultsTable().getStringValue('"+
66     "Ferret"+"', "+i+")");
67     if(row!=" " && parseFloat(row) < 100){
68         //print(row);
69         ocorrencias += 1;
70     }
71 }
72
73 if (ocorrencias > 0) {
74     print("Atencao!");
75     print("Foram encontrados " + ocorrencias
76     + " falha(s) que indica(m)"
77     + "\n      trinca na amostra.");
78 } else {
79     print("Não foram encontrados indícios da "
80     + "\n trinca na amostra.");

```


Fonte: Acervo do autor (2020)

4.2.5 Resultados de amostras retiradas de Processo Produtivo

Por meio dos resultados para identificação de cada tipo de descontinuidade, foi elaborada uma tabela geral para uma análise comparativa

Tabela 18 - Tabela geral de descontinuidades identificadas

Amostras Antes da Modificação	Existência de Descontinuidade	Identificação de Porosidade	Identificação de Inclusão	Identificação de Ausência de Fusão/Penetração	Identificação de Trinca
Amostra 01	Existe	Detectado	X	X	X
Amostra 02	Existe	X	X	Detectado	X
Amostra 03	Existe	Detectado	X	X	X
Amostra 04	Existe	Detectado	Detectado	Detectado	X
Amostra 05	Existe	Detectado	X	X	X
Amostra 06	Existe	Detectado	X	X	X
Amostra 07	X	X	X	X	X
Amostra 08	Existe	Detectado	Detectado	Detectado	X
Amostra 09	X	X	X	X	X
Amostra 10	Existe	Detectado	X	X	X
Amostra 11	Existe	Detectado	X	X	X
Amostra 12	Existe	X	Detectado	Detectado	X

Fonte: Acervo do autor (2020)

A Tabela 18 representa em “Existe” a presença de descontinuidade, em “X” a não identificação ou não existência da respectiva descontinuidade e em “Detectado” a identificação da descontinuidade. Observa-se que as porosidades são as descontinuidades mais presentes, porém quando quantificadas, possuem pouca influência negativa sobre a microestrutura soldada. Por outro lado as descontinuidades de inclusão e ausência de fusão/penetração são menos presentes, apesar de quando observadas de um parâmetro geral, representem respectivamente 30% e 40% das amostras com existência de descontinuidade, em que todos são caracterizados como defeitos de soldagem, como taxa muito alta para setor produtivo.

Pois é observado que todas as amostras com ausência de fusão/penetração também possuem inclusões de soldagem, e em alguns casos até mesmo porosidade. Indicando que o problema raiz está associado a falta de fusão/penetração na região soldada dentro do setor produtivo. Assim atuar para sanar essa descontinuidade

permite verificar se esta é a principal causa para melhoria de qualidade dos quadros de aço de bicicleta.

4.3. Modificações de parâmetros

Como exibido nos tópicos anteriores, as trincas não foram rastreadas e as porosidades não representam defeito de soldagem, sendo descontinuidade não significativa para necessidade de mudança em parâmetros de soldagem. As demais são particularmente graves, porém a inclusão pode ter sido causada por ausência de fusão/penetração. Logo as principais mudanças devem ser executadas para eliminar esse último defeito.

Dentre as causas dessa falta de fusão/penetração na região soldada a velocidade sempre é o principal motivo, exibido em Villani (2016) e Mourad (2012). Assim foi aumentado o tempo de soldagem para que a velocidade seja reduzida. A tabela 19, mostra tempos de soldagem antes e depois de modificação.

Tabela 19 – Tempos de soldagem

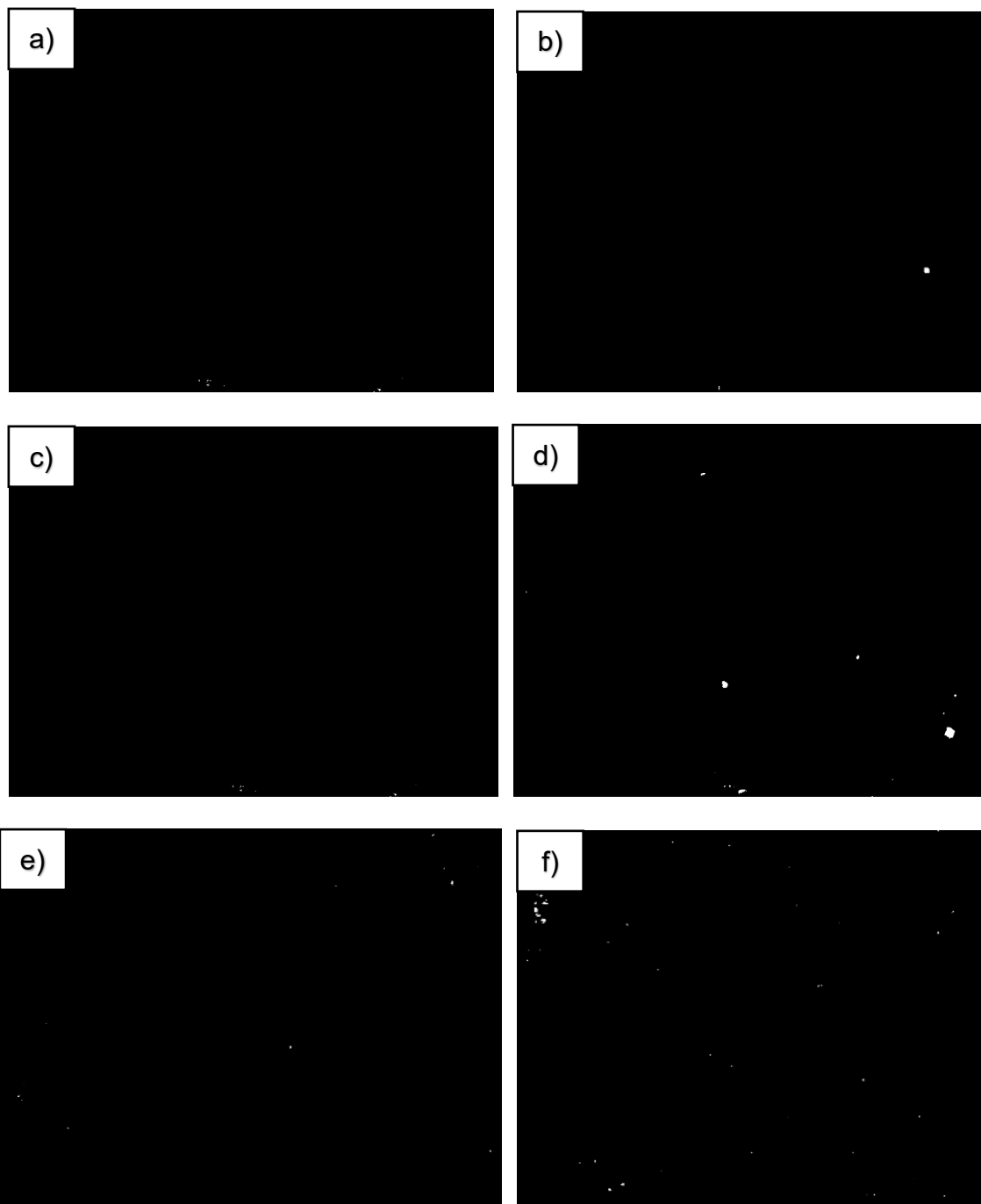
TEMPO DE MÁQUINA (s)	
Antes	Depois
11,56	15,76
11,78	15,51
12,56	14,64
12,22	14,23
12,19	13,45
11,99	14,1
12,45	13,48
11,94	13,55
11,87	13,73
12,13	13,66
12,47	14,08
12,38	13,68

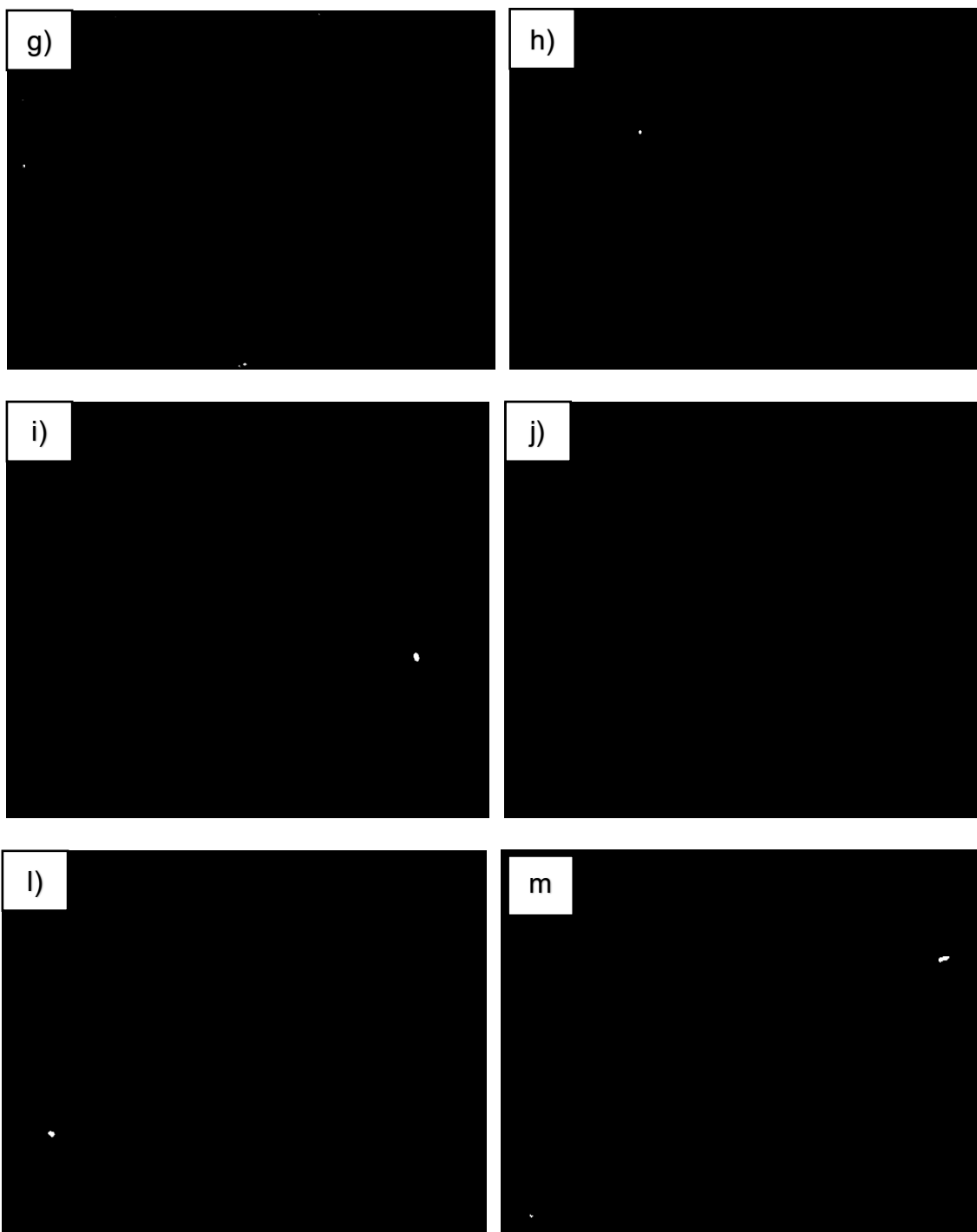
Fonte: Acervo do autor (2020)

Os tempos são referentes a quadros de bicicleta soldados nos equipamentos indicados na figura 18, em que os tempos antes são similares ao das 12 amostras obtidas para análise de descontinuidades. Assim, mais 12 amostras são retiradas para avaliação microscópica do plugin para verificação de persistência de

descontinuidades, exibidas na figura 44.

Figura 44 – Amostras processadas após modificações de parâmetros de soldagem:
a) Amostra 13; b) Amostra 14; c) Amostra 15; d) Amostra 16; e) Amostra 17; f)
Amostra 18; g) Amostra 19; h) Amostra 20 ; i) Amostra 21; j) Amostra 22; l) Amostra
23; m) Amostra 24.





Fonte: Acervo do autor (2020)

Os plugins associados indicaram existência de algum tipo de descontinuidade, revelado na presença de pontos brancos em todas as imagens, porém não identificaram porosidade, inclusão, trinca ou ausência de fusão/penetração. Assim constata-se que nas 12 amostras analisadas (Amostra 12 a 24), após redução de velocidade de soldagem, as descontinuidades foram atenuadas a ponto de não serem identificadas.

Este resultado indica que a implementação de rotinas computacionais por meio de plugins, confere confiabilidade nos resultados, conferindo método de análise de problemas nas microestruturas soldadas, permitindo assim plano de ação para suprimir suas descontinuidades mais graves.

Além disso, os resultados significam sucesso na aplicação de técnicas de processamento computacional, que geraram plugins únicos e patenteáveis, como novo registro de software em extensão de ImageJ.

5. CONCLUSÃO

A investigação de descontinuidades em microestrutura de soldagem, por meio de processamento computacional de imagens, tornou-se um dos métodos mais viáveis financeiramente somados a sua alta eficácia. Implementar uma metodologia única, desenvolvendo plugin para verificar a existência de descontinuidades e identificá-las, contribui para o desenvolvimento de novas tecnologias para a engenharia de materiais e verifica sua aplicabilidade direta em âmbito industrial, além de auxiliar uma indústria em ascensão como a de bicicletas.

O presente estudo padronizou uma metodologia para investigação e análise de descontinuidades na soldagem, por meio de implementação de plugins, identificando a existência de descontinuidades de soldagem e distinguindo quais os tipos de descontinuidades em todas as amostras, ambas as contribuições por meio automatizado o que gerou registro de software (patente) gratuita e acessível, disponível a comunidade científica. Além disso, foi mensurado o grau das descontinuidades, indicando-o ou não como um defeito na microscopia. Contribuindo assim para mudanças nos parâmetros de soldagem, para atenuar a presenças das descontinuidades, caso estas se apresentem como prejudiciais a estrutura soldada.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALBUQUERQUE, V. H. C. DE et al. Ferramenta de análise não destrutiva para obtenção de parâmetros microestruturais baseada em visão computacional. CIBIM 10, 2011.
- ALBUQUERQUE, V. H. C.; FILHO, P. P. R. Medição automática da dureza brinell utilizando técnicas de processamento e análise de imagem. 2006.
- ALTUHAFI, F., O'SULLIVAN, C., & CAVARRETTA, I. Analysis of an Image-Based Method to Quantify the Size and Shape of Sand Particles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(8), 1290–1307. 2013.
- BACKES, ANDRE SÁ JUNIOR, JARBAS JOACI DE MESQUITA, Introdução à Visão Computacional Usando MATLAB, ISSN: 978-85-508-0023-3. 2016
- BAI, R. et al. Local zone-wise elastic-plastic constitutive parameters of Laser-welded aluminium alloy 6061 using digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, v. 101, n. May 2017, p. 28–34, 2018.
- BAGGIO, DANIEL LÉLIS; EMAMI, SHERVIN; ESCRIVÁ, DAVID MILLÁN; LEVGEN, KSHVEDCHENIA; MAHMOODE, NAUREN; SHILKROT, ROY. *Mastering OpenCV with Practical Computer Vision Projects*. Packt Publishing. 2012
- BALOKHONOV, R. R. et al. A computational study of the microstructural effect on the deformation and fracture of friction stir welded aluminum. *Computational Materials Science*, v. 116, p. 2–10, 2016.
- BANDI, B. et al. Effect of weld parameters on porosity formation in electron beam welded Zircaloy-4 joints: X-ray tomography study. *Vacuum*, v. 158, p. 172–179, 2018.
- BARBOSA, L. H. S. et al. Fatigue crack growth rates on the weld metal of high heat input submerged arc welding. *International Journal of Fatigue*, v. 119, p. 43–51, 2019.
- BOARETTO, N.; CENTENO, T. M. Automated detection of welding defects in pipelines from radiographic images DWDI. *NDT and E International*, v. 86, p. 7–13, 2017.
- BRUECKNER, P. et al. High resolution acquisition and processing of fluorescent microscopic images for quality assurance of food. *Measurement: Journal of the*

International Measurement Confederation, v. 61, p. 123–128, 2015.

BUENO, R. DOS S.;. Análise microestrutural de junta soldada de aço baixa liga. p. 77, 2010.

C. B. SCRUBY AND L. E. DRAIN. -Book Reviews Laser ultrasonics , techniques and applications. v. 1990, n. June, p. 1991, 1991.

CALLISTER, W. Jr. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*, 5ª edição, ed LTC, Rio de Janeiro, 2017.

CHEN, G. et al. Effects of the welding inclusion and notch on the fracture behaviors of low-alloy steel. *Journal of Materials Research and Technology*, p. 1–10, 2018.

CHEON, Y. J.; KIM, H. G. An efficient contact algorithm for the interaction of material particles with finite elements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 335, p. 631–659, 2018.

CHOPARD, A. et al. Automated sulfides quantification by multispectral optical microscopy. *Minerals Engineering*, v. 131, n. April 2018, p. 38–50, 2019.

CORASSINI, E. Influência Do Grau De Encruamento E Tratamentos Térmicos De Recozimento Nas Propriedades Mecânicas Do Aço Abnt 1006, 2012.

CROW, FRANKLIN C. (1984). "Summed-area tables for texture mapping".
Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques: 207–212

DA SILVA, C. M.; DA CUNHA, T. V.; MIKOWSKI, A. Mechanical and microstructural analysis of welds produced by submerged arc welding with ultrasonic pulse current | Análise mecânica e microestrutural de soldas produzidas pelo processo de arco submerso com pulsação ultrassônica da corrente. *Revista Materia*, v. 22, n. 4, 2017.

DE ALBUQUERQUE E MARCELO PORTES DE ALBURQUEQUE, m. p.
Processamento De Imagens: Métodos E Análises. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBTF/MCT. (2000)

DECOST, B. L.; HOLM, E. A. Characterizing powder materials using keypoint-based computer vision methods. *Computational Materials Science*, v. 126, p. 438–445, 2017.

DE GIOVANNI, M. et al. 3D imaging and quantification of porosity and intermetallic

particles in strontium modified Al-Si alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 727, p. 353–361, 2017.

DIAS, D. F. Caracterização de Juntas Soldadas por TIG Autógeno Manual com Arco Pulsado e Arco não Pulsado do Aço Inoxidável Hiperduplex SAF 2707 HD. 2012.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade do Estado do Rio de Janeiro). Rio de Janeiro, RJ. 2012.

DIÓGENES, A.N., HOFF, E.A., FERNANDES, C.P. *Grain size measurement by image analysis: An application in the ceramic and in the metallic industries*. 18th International Congress of Mechanical Engineering. Ouro Preto, MG, 2005.

DUDECK, K. J., COUILLARD, M., LAZAR, S., DWYER, C., & BOTTON, G. A. *Quantitative statistical analysis, optimization and noise reduction of atomic resolved electron energy loss spectrum images*. 2012.

DUTTA, S. et al. Automatic characterization of fracture surfaces of AISI 304LN stainless steel using image texture analysis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 45, n. 5, p. 1140–1150, 2012.

DZINDO, E. et al. Crack growth resistance of weldment constituents. *Procedia Structural Integrity*, v. 13, p. 420–423, 2018.

FERREIRA, T., RASBAND, W. *ImageJ User Guide 1.46*. Disponível em:

<<http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide>>. Acessado em 13/11/2012.

GAURAV Y. TAWDE, JAYSHREE KUNDARGI, “An Overview of features Extraction Techniques in OCR for Indian Scripts Focused on Offline Handwriting”, *International journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, Issue 1, pp. 919-926, Jan-Feb 2013.

GAURAV KUMAR, PRADEEP KUMAR BHATIA, “Neural Network based Approach for Recognition of Text Images”, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 62, No. 14, Jan. 2013.

GONZALEZ, R. C. AND WOODS, R. E., *Digital Image Processing*, Addison Wesley, Person, 4th edition, 2018.

GUO, X. et al. Investigation on the resistance to fatigue crack growth for weld metals with different Ti addition in near-threshold regime. *International Journal of Fatigue*, v.

120, p. 1–11, 2019.

ANSHUL GUPTA, MANISHA SRIVASTAVA, “Offline Handwritten Character Recognition”, pp. 1-27, April 2011.

GUYON, I., Neural networks and applications tutorial, physics report, Volume 207, Issues 3–5, September 1991, Pages 215-259.

HAJERI, K.F.A., GARCIA, C.I., HUA, M., DEARDO, A.J., 2016. Particle-stimulated nucleation of ferrite in heavy steel sections. *ISIJ. Int.* 46, 1233–1240.

HAJIHOSSEINI, P.; ANZEHAEE, M. M.; BEHNAM, B. Fault detection and isolation in the challenging Tennessee Eastman process by using image processing techniques. *ISA Transactions*, v. 79, n. May, p. 137–146, 2018.

HONEYCOMBRE, ROBERT; BHADESSHIA, HARSHAD; *Steels, Microstructure and Properties*, ed. Edward Arnold Ltda, 4th edition, 2017.

HUBSCHEN, G. Ultrasonic techniques for materials characterization, 2016 p 177-224.

HUANG, Y. et al. An improved model of porosity formation during pulsed GTA welding of aluminum alloys. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, v. 238–239, n. March, p. 122–129, 2018.

HUANG, Q., WANG, X., JIANG, M., HU, Z., YANG, C., 2015. Effects of Ti-Al complex deoxidation inclusions on nucleation of intragranular acicular ferrite in C-Mn steel. *Steel Res. Int.* 87, 445–455.

IGLESIAS, J. C. Á. et al. Caracterização Automática De Minério De Ferro Por Microscopia Digital E Análise De Imagens. *Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração*, p. 275–285, 2017.

IGNÁCIO, J. DA SILVA. *Processamento e análise digital de imagens em estudos da cinética de recristalização de ligas Al-Mg-X*. 2013.

J. J. WILLIAMS, Z. FLOM, A. A. AMELL, N. CHAWLA, X. XIAO AND F. DE CARLO. Damage Evolution in SiC Particle Reinforced Al Alloy Matrix Composites by X-ray Synchrotron Tomography. *Acta Materialia*. Vol 58. pp 6194-6205. October 2010.

JORGE, J. C. F. et al. Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas pelo processo a arco submerso com elevado aporte térmico. *Soldagem e Inspeção*,

v. 20, n. 3, p. 347–358, 2015.

KARADENIZ, E.; OZSARAC, U.; YILDIZ, C. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. *Materials and Design*, v. 28, n. 2, p. 649–656, 2007.

KASSAVETIS, G. A.; ZENTNER, P. G.; GEIDUSCHEK, E. P. Transcription at bacteriophage T4 variant late promoters. An application of a newly devised promoter-mapping method involving RNA chain retraction. *Journal of Biological Chemistry*, v. 261, n. 30, p. 14256–14265, 1986.

KIEKHAEFER, R. HARDY, S. RICKMAN. Lunar Regolith Particle Shape Analysis From Thin Sections, Clemson University , University of Texas, Marshall Space Flight Center3 Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group (2013)

LASHKIA, V. Defect detection in X-ray images using fuzzy reasoning. *Imavis*, 2001.

LIU, W. K. et al. An introduction to computational nanomechanics and materials. [s.l.: s.n.]. v. 193

LIND, R. Open source software for image processing and analysis: Picture this with ImageJ. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2012.

LUIZA, A.; ARAÚJO, G.; ALMEIDA, J. R. D. Análise da evolução de defeitos em material compósito por microscopia . 2004

MALU, G.; ELIZABETH, S.; MATHEW KOSHY, S. Circular mesh-based shape and margin descriptor for object detection. *Pattern Recognition*, v. 84, p. 97–111, 2018.

MARCOMINI, R. F.; SOUZA, D. M. P. F. DE. Caracterização microestrutural de materiais cerâmicos utilizando o programa de processamento digital de imagens Image J (Microstructural characterization of ceramic materials using the image digital processing software Image J). *Cerâmica*, v. 57, p. 100–105, 2011.

MASSELIN, I. et al. Membrane characterization using microscopic image analysis. *Journal of Membrane Science*, v. 186, n. 1, p. 85–96, 2001.

MATAEI, B., MOGHADAS NEJAD, F., ZAHEDI, M., & ZAKERI, H. (2018). Evaluation of pavement surface drainage using an automated image acquisition and processing system. *Automation in Construction*, 86, 240–255.doi:10.1016/j.autcon.2017.11.010

MCFALLS R. University of Tennessee, Knoxville Trace: Tennessee Research and

Creative Exchange Masters Theses Graduate School 8-2018 The effect of hydrogen on gas porosity in Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Travis A.

MENG, X. et al. Numerical analysis of undercut defect mechanism in high speed gas tungsten arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 236, p. 225–234, 2016.

MIZE, R. R. *Computer Applications in Cell and Neurobiology: A Review*. v. 90, p. 83–124, 1984.

MORGAN, J. M. *Material in the Sport equipamento*, cap 10, 2th edition 2019.

MOURAD, A.-H. I.; Khoureshid, A.; Sharef, T. Gas Tungsten Arc and Laser Beam Welding Processes Effects on Duplex Stainless Steel 2205 Properties. *Mater. Sci. Eng. A* 2012, 549, 105–113.80.

MOHAMAD BAYAT, SANKHYA MOHANTY, JESPER HENRI HATTEL, Multiphysics modelling of lack-of-fusion voids formation and evolution in IN718 made by multi-track/multi-layer L-PBF, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 139, 2019, Pages 95-114.

MUKHERJEE, T.; DEBROY, T. Mitigation of lack of fusion defects in powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 36, n. April, p. 442–449, 2018.

MU, W., JÖNSSON, P.G., NAKAJIMA, K., 2014. Effect of sulfur content on inclusion and microstructure characteristics in steels with Ti₂O₃ and TiO₂ additions. *ISIJ. Int.* 54, 2907–2916.

MUI, J. K. & FU, K. S., *A survey on image segmentation. Pattern Recognition*, 13, 195.

NARCISO, LUCAS DIOVANI LOPES; Desenvolvimento de um plugin de quantificação da função renal para o software livre imagej; Trabalho de Conclusão do Bacharelado em Física Médica, 2014

NISHA SHARMA, TUSHAR PATNAIK, BHUPENDER KUMAR, “Recognition for Handwritten English Letters: A Review”, *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, Vol. 2, Issue 7, pp. 318-321, Jan. 2013.

NIZAM, MOHD SHAH HAIROL; SULAIMAN MARIZAN; SHUKOR AHMAD ZAKI AND AB RASHID MOHD ZAMZURI. Vision based Identification and Classification of Weld

Defects in Welding Environments: A Review, Indian Journals of Science and Technology, Vol 9(20), 2016.

PACIORNIK, S. , VIEIRA, P.R.M.; Uncertainty Evaluation of Metallographic Measurements by Image Analysis and Thermodynamic Modeling. Materials Characterization, v.47, p.219-226, 2010.

PADILHA, A. F. Materiais de engenharia – microestrutura e propriedades, ed Hemus, Curitiba, 2000.

PARK, J. et al. Complex effects of alloy composition and porosity on the phase transformations and mechanical properties of powder metallurgy steels. Powder Technology, v. 284, p. 459–466, 2015.

PASCON, J. P.; CODA, H. B. Finite deformation analysis of visco-hyperelastic materials via solid tetrahedral finite elements. Finite Elements in Analysis and Design, v. 133, n. May, p. 25–41, 2017.

PESSOA, E. Cordão Em Soldas Subaquáticas Molhadas. Praca doktorska, 2007.

PETCHER, P. A.; DIXON, S. NDT & E International Weld defect detection using PPM EMAT generated shear horizontal ultrasound. NDT and E International, v. 74, p. 58–65, 2015.

PETROU, COSTAS; PETROU, MARIA. Image Processing: The Fundamentals Editora Wiley, 2th edition, 2010.

PRIMOŽ ŠTEFANE, SAMEERA NAIB, STIJN HERTELÉ, WIM DE WAELE, NENAD GUBELJAK, Effect of crack length on fracture toughness of welded joints with pronounced strength heterogeneity, Procedia Structural Integrity, Volume 13, 2018, Pages 1895-1900

PUIGDOMENECH; José Pascual; Tratamento Térmico dos Aços; 1962, Editora LEP

RAMAZANI, A. et al. Microstructure evolution simulation in hot rolled DP600 steel during gas metal arc welding. Computational Materials Science, v. 68, p. 107–116, 2013.

ROHDE, REGIS ALMIR. Metalografia Preparação De Amostras. URISAM, Laboratório de ensaio de materiais, 2010.

RUSS, J.C.; *The Image Processing Handbook*. New York : CRC Press, 7th edition, 2016.

- SALTYKOV, S. A. Stereometric Metallograph. 2th ed. Moscow: Metallurgizdat, 1958. 446 p.
- SAUVOLA, J & PIETAKSINEN, M (2000), "Adaptive Document Image Binarization", Pattern Recognition 33(2): 225-236
- SINGH, R. Weld Defects and Inspection. p. 277–295, 2016.
- SILVA. L. F. Influência do Molibdênio em Propriedades do Metal de Solda na Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodos Oxi-Rútilicos. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio. Agosto, 2010.
- SILVA. L.F. Aquisição, Processamento e Análise de Imagens 3D: MicroTC e FIB-SEM na Caracterização de Defeitos em Solda Molhada. Tese de doutorado. Puc Rio, 2014
- SCHNEIDER, R.; SCHULZ, A.; BERTRAND, C.; KULMBURG, A.; OLDEWURTE, A.; UHLENWINKEL, V. The Performance of spray formed tool steels in comparison to conventional route material. In: INTERNATIONAL TOOLING CONFERENCE, 6., 10-13 Sep. 2002, Karlstad. Proceedings... Hagfors: Uddeholms, 2002 v. 2, p. 931-942
- SUMESH, A. et al. Decision tree based weld defect classification using current and voltage signatures in GMAW process. Materials Today: Proceedings, v. 5, n. 2, p. 83 1994.54–8363, 2018.
- S. MARGRET ANOUNCIA, R. SARAVANAN, A knowledge model for gray scale image interpretation with emphasis on welding defect classification-an ontology based approach, Comput. Ind. 61 (8) (2010) 742–749.
- TAYLOR J L. Basic metallurgy for non-destructive testing. 2nd . Northampton, UK: The British Institute of Non-Destructive Testing; 1996.
- VANITA SINGH, BHUPENDRA KUMAR, TUSHAR PATNAIK, "Feature Extraction Technique for handwritten Text in Various Script: a Survey, IJSCE, Vol. 3 , pp. 238-241, March 2013.
- T. CHURCH . Problems Associated with the Use of the Ratio of Martin's Diameter to Feret's Diameter as a Profile Shape Factor*, Illinois Institute of Technology. Chicago. III_~IY_S_A_, 1986.

- VEIGA, E. Processo de soldagem MIG/MAG. São Paulo: Editora Globus, 2011.
- VEL, S. S. et al. Computational homogenization and micromechanical analysis of textured polycrystalline materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 310, p. 749–779, 2016.
- VIEIRA, P. R. M.; PACIORNIK, S. Uncertainty evaluation of metallographic measurements by image analysis and thermodynamic modeling. *Materials Characterization*, v. 47, n. 3–4, p. 219–226, 2001.
- VOORT, G. F. VANDER. *ASM Handbook, Metallography and Microstructures*, volume 9. ASM International, p. 2733, 2014.
- WAYNE, Randy; Chapter 6 - Methods of Generating Contrast; *Light and Video Microscopy (Third Edition)* 2019, Pages 133-149
- WEI, E. et al. Detection of weld surface porosity by statistical analysis of arc current in gas metal arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 3, n. 1, p. 50–59, 2001.
- WEISS, A. *Processos de fabricação mecânica*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- WEMAN K. *Welding processes handbook*. Cambridge, UK: Wood head Publishing; 2013.
- XU, G. et al. Modelling of fluid flow phenomenon in laser+GMAW hybrid welding of aluminum alloy considering three phase coupling and arc plasma shear stress. *Optics and Laser Technology*, v. 100, p. 244–255, 2018.
- YANG, X. et al. MatCloud: A high-throughput computational infrastructure for integrated management of materials simulation, data and resources. *Computational Materials Science*, v. 146, p. 319–333, 2018.
- YANG, R.; BUENFELD, N.R. *Binary Segmentation of Aggregate in SEM Image Analysis of Concrete*. *Cement and Concrete Research*, v.31, p.437-441, 2011.
- YUSOF, F.; JAMALUDDIN, M. F. *Welding Defects and Implications on Welded Assemblies*. [s.l.] Elsevier, 2014. v. 6
- ZAMMARCHI, M. et al. High order boundary and finite elements for 3D fracture propagation in brittle materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 315, p. 550–583, 2017.
- ZHANG, T. et al. Thermomechanical analysis for Laser + GMAW-P hybrid welding

process. Computational Materials Science, v. 47, n. 3, p. 848–856, 2010.

ZHANG, Y. et al. Experimental study of hot cracking at circular welding joints of 42CrMo steel. Optics and Laser Technology, v. 97, p. 327–334, 2017.

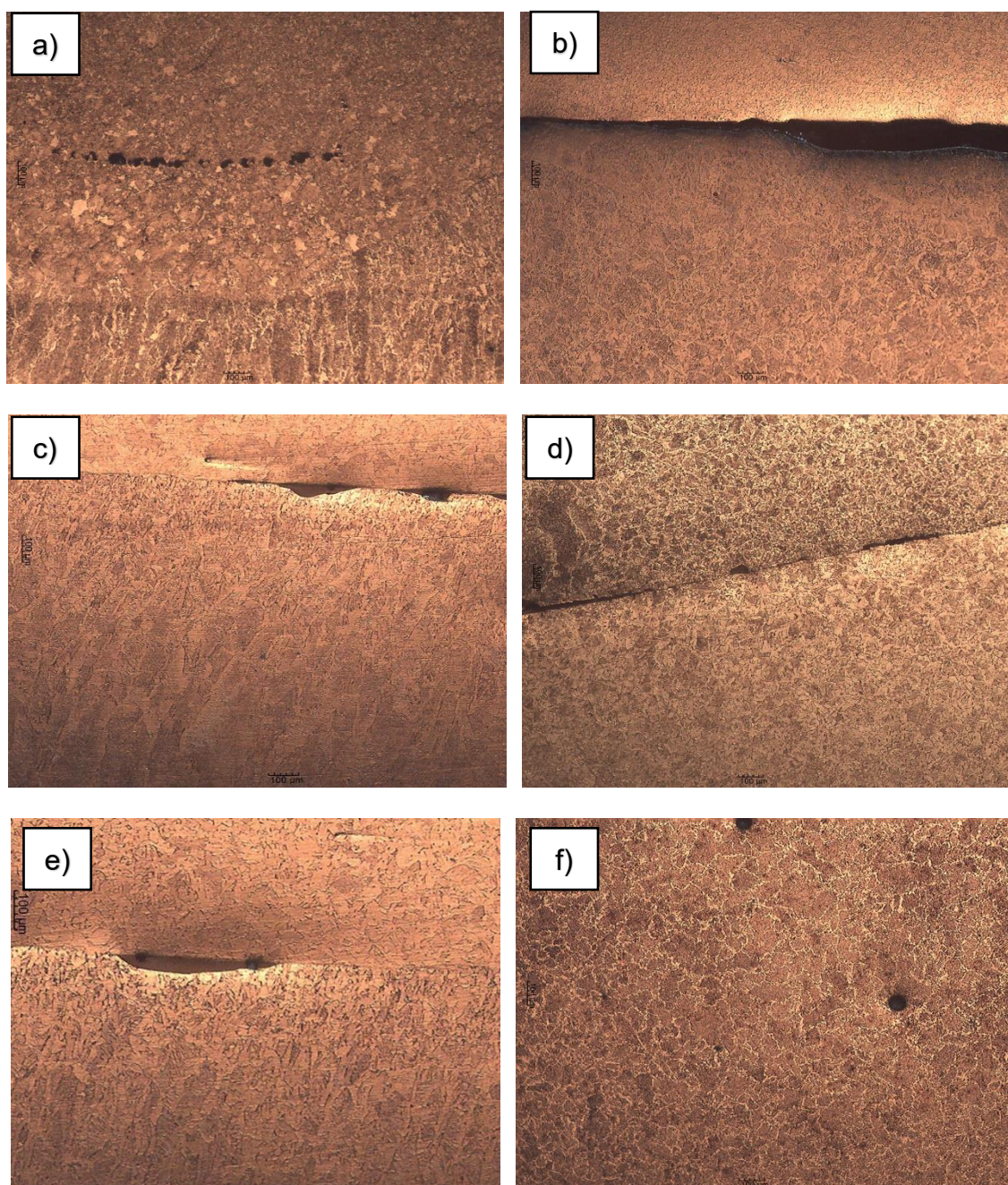
Zhang, T., Li, Z., Kou, S., Jing, H., Li, G., Li, H., Kim, H.J., 2015. Effect of inclusions on microstructure and toughness of deposited metals of self-shielded flux cored wires. Mater. Sci. Eng. A 628, 332–339.

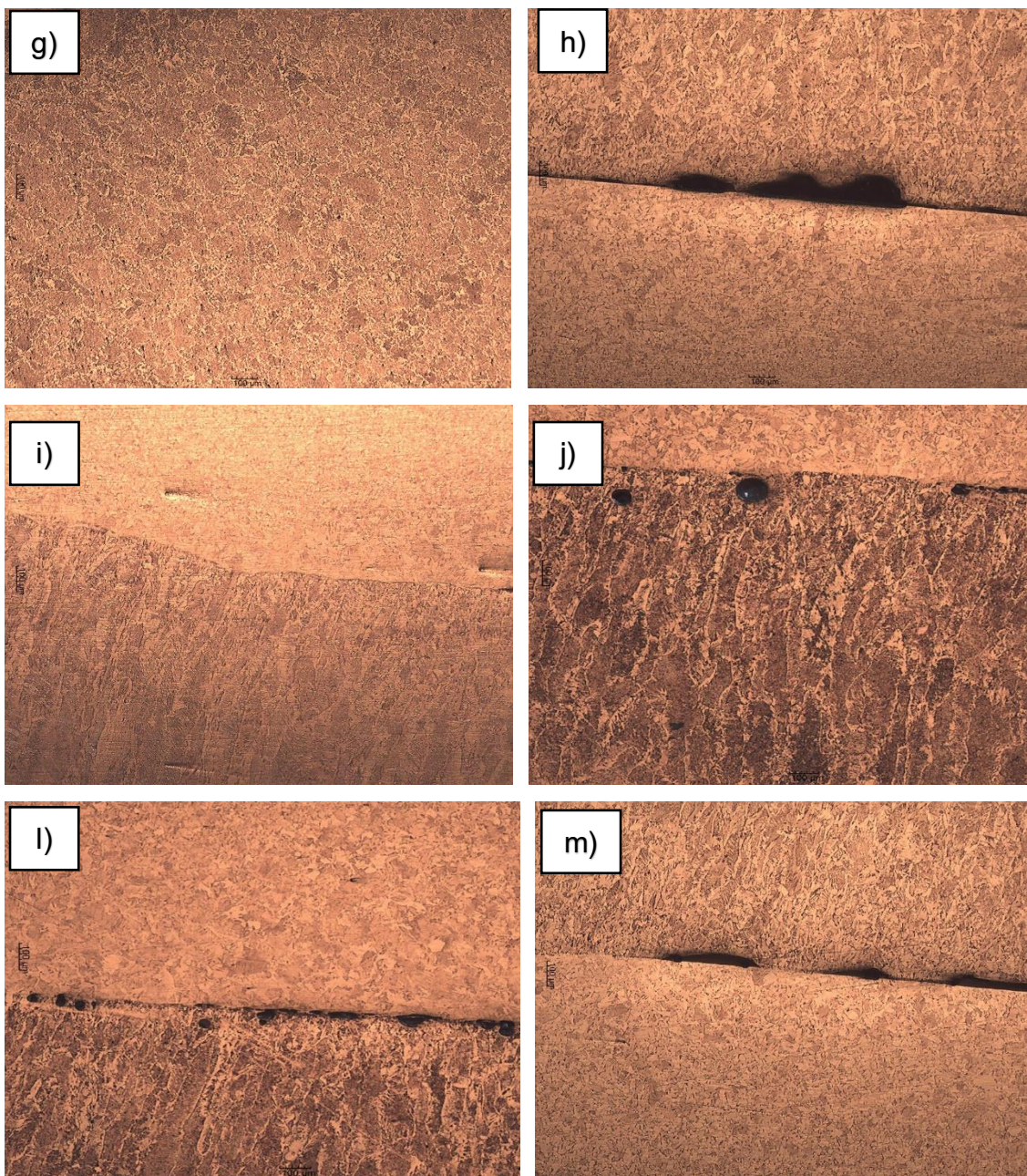
ZHOU, Y.; NOMURA, T.; SAITOU, K. Multi-component topology and material orientation design of composite structures (MTO-C). Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 342, p. 438–457, 2018.

7. APÊNDICE

7.1. Amostras antes de modificação (diretamente de setor produtivo)

Figura 45 – Microscopias de soldagem: a) Amostra 01; b) Amostra 02; c) Amostra 03; d) Amostra 04; e) Amostra 05; f) Amostra 06; g) Amostra 07; h) Amostra 08 ; i) Amostra 09; j) Amostra 10; l) Amostra 11; m) Amostra 12.

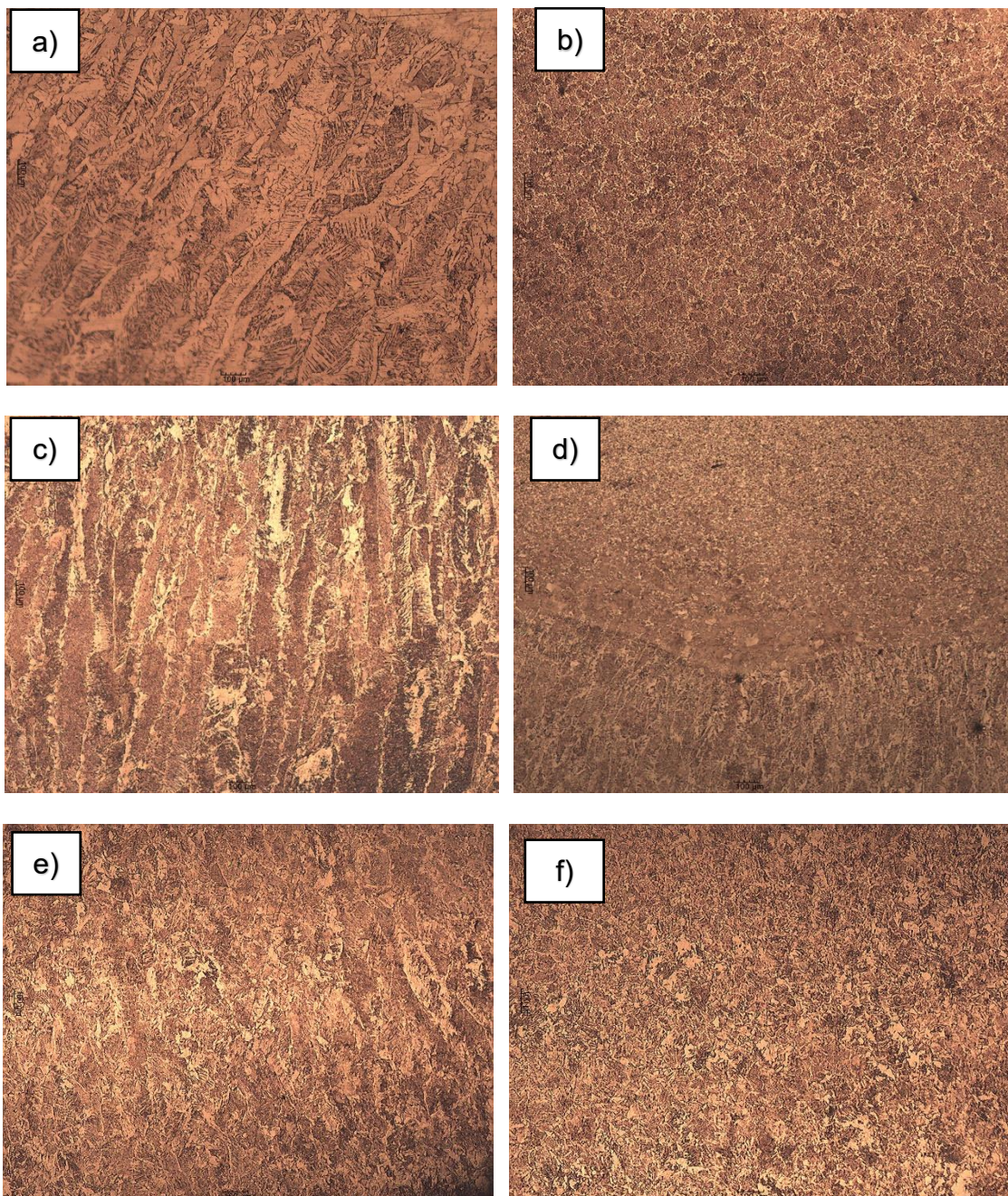


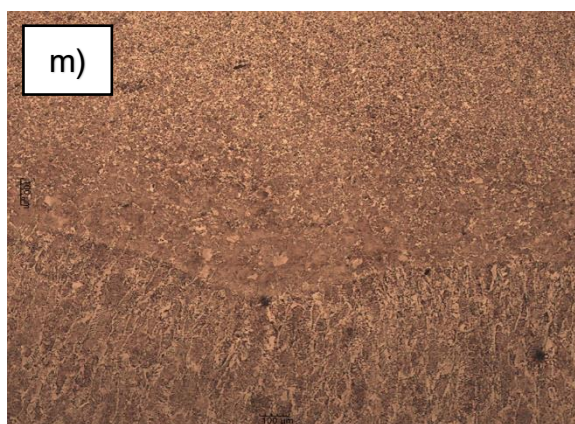
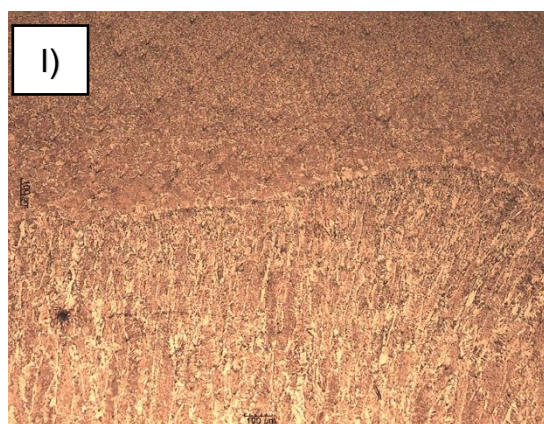
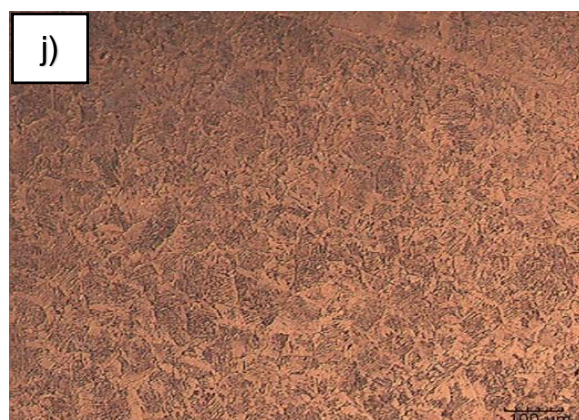
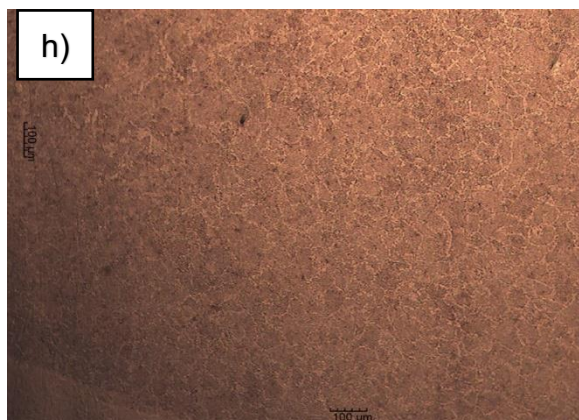
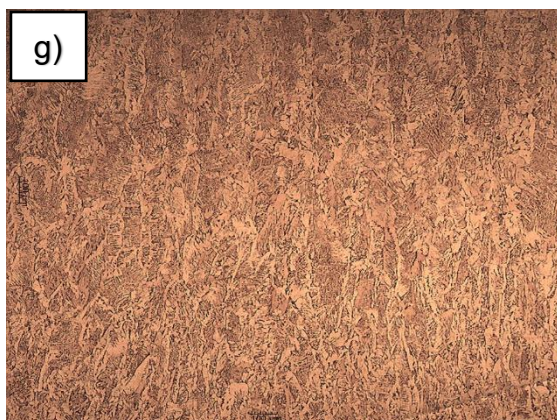


Fonte: Acervo do autor (2020)

7.2. Amostras depois de modificação (diretamente de setor produtivo)

Figura 46 - Microscopias de soldagem: a) Amostra 13; b) Amostra 14; c) Amostra 15; d) Amostra 16; e) Amostra 17; f) Amostra 18; g) Amostra 19; h) Amostra 20 ; i) Amostra 21; j) Amostra 22; l) Amostra 23; m) Amostra 24.





Fonte: Acervo do autor (2020)

7.3. Links para Plugins

- <https://drive.google.com/file/d/1YOjUp7eUnOJdb1Xw0ugVh4z2odJ0qEf/view?usp=sharing>
- <https://drive.google.com/file/d/1tblfPxKVIYCEJdOre-ULIPoQ6etcg8/view?usp=sharing>
- <https://drive.google.com/file/d/1IYJAm5LiKHKYVLI1sqvi7MdY2E6UfBTv/view?usp=sharing>