

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DOUGLAS CZAPLICKI DE CAMPOS

**MEDIÇÃO E MAPEAMENTO AUTOMÁTICO DE MICRODUREZA UTILIZANDO
TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM PYTHON**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RIO GRANDE, RS

2025

DOUGLAS CZAPLICKI DE CAMPOS

**MEDIÇÃO E MAPEAMENTO AUTOMÁTICO DE MICRODUREZA UTILIZANDO
TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM PYTHON**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Alano

RIO GRANDE, RS

2025

Ficha Catalográfica

C198m Campos, Douglas Czaplicki de.

Medição e mapeamento automático de microdureza utilizando técnicas de processamento de imagens em *Python* / Douglas Czaplicki de Campos. – 2025.

82 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2025.

Orientador: Dr. José Henrique Alano.

1. Microdureza 2. Mapeamento de dureza 3. Processamento de imagens 4. Automação laboratorial 5. Análise de materiais 6. Detecção automática I. Alano, José Henrique II. Título.

CDU 621

Catlogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



Ata nº **08/2025** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e oito dias do mês de agosto de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às dez horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **DOUGLAS CZAPLICKI DE CAMPOS**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a linha de pesquisa de Engenharia de Soldagem e Materiais, com o seguinte título: **MEDIÇÃO E MAPEAMENTO AUTOMÁTICO DE MICRODUREZA UTILIZANDO TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS EM PYTHON**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: José Henrique Alano, Kleber Eduardo Bianchi e o convidado Renato Luiz Siqueira sob a presidência do Professor José Henrique Alano. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. José Henrique Alano: APROVADO _____
2. Kleber Eduardo Bianchi: APROVADO _____
3. Renato Luiz Siqueira: APROVADO _____

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE HENRIQUE ALANO
Data: 28/08/2025 22:04:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1. _____
CPF: 036.950.749-57

Documento assinado digitalmente
gov.br KLEBER EDUARDO BIANCHI
Data: 29/08/2025 08:25:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2. _____
CPF: 440.783.230-49

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATO LUIZ SIQUEIRA
Data: 28/08/2025 22:21:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3. _____
CPF: 054.257.036-00

Documento assinado digitalmente
gov.br DOUGLAS CZAPLICKI DE CAMPOS
Data: 29/08/2025 11:45:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Douglas Czaplicki de Campos: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, Pedro Ademir Duarte de Campos, Jane Terezinha Czaplicki de Campos, e a minha filha, Maria Luiza de Campos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me auxiliaram no desenvolvimento deste estudo. Destaco meus pais, Pedro Campos e Jane Campos, e minha filha Maria Luiza de Campos, pelo apoio constante durante todo o período. Agradeço também ao professor Dr. José Henrique Alano, pelo comprometimento e atenção dedicada à definição e orientação acadêmica deste artigo, e ao Engenheiro Otavio Real Cappellaro, que contribuiu diretamente na etapa laboratorial, apoiando o preparo e a manipulação das amostras.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e à Universidade Federal do Rio Grande – FURG, pelo conhecimento adquirido e por fornecerem a realização deste Mestrado em Engenharia Mecânica.

RESUMO

Considerando a necessidade por métodos de medição ágeis e precisos em ambientes de pesquisa e busca por soluções tecnológicas e sustentáveis. Aplicou-se e validou-se um método automático para medição e análise de microdureza em materiais metálicos, por meio de algoritmos de processamento digital de imagens implementados em Python. O sistema utiliza as bibliotecas OpenCV, NumPy, Pillow, Matplotlib e SciPy, oferecendo tanto a detecção automática quanto ajustes manuais, o que facilita o uso em diferentes condições experimentais. O fluxo do método compreende desde a aquisição e preparação das imagens, calibração e detecção das impressões Vickers, até o cálculo e mapeamento espacial dos valores de dureza. A análise estatística dos resultados revelou consistência na ferramenta desenvolvida, assegurando reprodutibilidade dos resultados, confiabilidade nos parâmetros padronizados e redução do tempo de análise, o que beneficia tanto a pesquisa quanto aplicações industriais.

Palavras Chaves: Microdureza, mapeamento de dureza, processamento de imagens, automação laboratorial, análise de materiais, detecção automática.

ABSTRACT

Considering the need for agile and accurate measurement methods in research environments and the search for technological and sustainable solutions, an automatic method for measuring and analyzing microhardness in metallic materials was developed and validated using digital image processing algorithms implemented in Python. The system uses the OpenCV, NumPy, Pillow, Matplotlib, and SciPy libraries, offering both automatic detection and manual adjustments, facilitating use in different experimental conditions. The method flow includes everything from image acquisition and preparation, calibration and indentation detection, to the calculation and spatial mapping of hardness values. Statistical analysis of the results indicated consistency in the developed tool, ensuring reproducibility of results, reliability of standardized parameters, and reduced analysis time, benefiting both research and industrial applications.

Keywords: Micro hardness, hardness mapping, image processing, laboratory automation, materials analysis, automatic detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema do ensaio de microdureza Vickers.....	19
Figura 2- Relações geométricas de uma pirâmide de base quadrada com um triângulo retângulo.	20
Figura 3 - Relações geométricas de uma pirâmide de base quadrada com um triângulo retângulo.	20
Figura 4 - Impressão e medida dos diagonais em microscópio de dureza Vickers...21	
Figura 5 - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.	23
Figura 6 - Distâncias mínimas entre os pontos das impressões Vickers.....	24
Figura 7 - Regiões formadas durante o processo de soldagem.....	26
Figura 8 - Exemplo de mapeamento de dureza.	28
Figura 9 - Método de Otsu - Exemplo.	30
Figura 10 - Gráfico de Dispersão.	38
Figura 11 - Gráfico de Bland-Altman.....	39
Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental.....	40
Figura 13 - Amostra detalhada do aço ASTM A242.....	42
Figura 14 - Detalhe da amostra após preparação.....	42
Figura 15 - Detalhe dos 95 pontos de impressões Vickers e suas 15 imagens.	43
Figura 16 - Amostra detalhada do aço ASTM A242.....	44
Figura 17 - Menus detalhados do Software: (a) Abertura e criação de projeto (b) Abertura de imagem e calibração da escala (c) Detecção automática com calibração de imagem (d) Cálculo de Microdureza e Mapas (e) Posições e navegações na imagem.....	45
Figura 18 - Detalhe do Software - Abrindo Imagem.	46
Figura 19 - Detalhe do Software - Calibração da escala.	47
Figura 20 - Detalhe do Software - Conversão da imagem em pixel pretos e brancos para leitura e processamento dos dados.	48
Figura 21 - Detalhe do Software - Ajuste e parâmetros da imagem.....	48
Figura 22 - Detalhe do Software - (a) Aplicação da carga e resultados de microdureza; (b) Representação dos resultados das impressões Vickers conforme carga aplicada.	50
Figura 23 - Detalhe Software - Posicionamento.....	51

Figura 24 - Detalhe Software - Exemplo de Mapa de Calor com 8 pontos gerado pelo software.....	52
Figura 25 - Gráfico Geral de Dispersão - Usuário x Software.	54
Figura 26 - Gráfico Geral de Bland Altman - Usuário x Software.	55
Figura 27 - Amostra Ampliada com Zonas de Amostragem.....	56
Figura 28 - Gráfico Zona 1 - Dispersão - Usuário x Software.....	57
Figura 29 - Gráfico Zona 1 - Bland Altman - Usuário x Software.....	58
Figura 30 - Gráfico Zona 2 - Dispersão - Usuário x Software.....	59
Figura 31 - Gráfico Zona 2 - Bland Altman - Usuário x Software.....	59
Figura 32 - Gráfico Zona 3 - Dispersão - Usuário x Software.....	61
Figura 33 - Gráfico Zona 3 - Bland Altman - Usuário x Software.....	61
Figura 34 - Zona de Amostragem com Mapa e Interpolação.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dureza Vickers para diferentes materiais, valores no SI.....	22
Tabela 2 - Composição química nominal do aço ASTM A242.	41
Tabela 3 - Resumo da estatística descritiva global (n=95).....	53
Tabela 4 - Resumo estatístico da Zona 1 (n=35).	56
Tabela 5 - Resumo estatístico da Zona 2 (n=40).	58
Tabela 6 - Resumo estatístico da Zona 3 (n=20).	60
Tabela 7 - Estatística Global (n=95).....	74
Tabela 8 - Estatística Detalhada - Dados Zona 1 (n=35).	77
Tabela 9 - Estatística Detalhada - Dados Zona 2 (n=40).	79
Tabela 10 - Estatística Detalhada - Dados Zona 3 (n=20).	81

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM - American Society for Testing and Materials
ISO - International Organization for Standardization
SAE - SAE International
HV - Dureza Vickers
MB - Metal de Base
ZAC - Zona Termicamente Afetada
ZF - Zona Fundida
SZ - Stir Zone (zona de mistura)
DRX - Difração de Raios X
EBSD - Electron Backscatter Diffraction (difração de elétrons retrodifratados)
KAM - Kernel Average Misorientation (desorientação média por núcleo)
ROI - Region of Interest (região de interesse)
GUI - Graphical User Interface (interface gráfica do usuário)
CNC - Computer Numerical Control
CPU - Central Processing Unit
ML - Machine Learning (aprendizado de máquina)
OpenCV - Open Source Computer Vision Library
NumPy - Numerical Python
SciPy - Scientific Python
Pillow - Python Imaging Library (fork)
Matplotlib - Biblioteca de gráficos 2D em Python
Tkinter - Toolkit de interface gráfica do Python
LoA - Limits of Agreement (limites de concordância)
MAE - Mean Absolute Error (erro absoluto médio)
RMSE - Root Mean Square Error (raiz do erro quadrático médio)
 R^2 - Coeficiente de determinação
MPa - Megapascal
GPa - Gigapascal
N - Newton
gf - grama-força
kgf - quilograma-força
 μm - micrômetro

LISTA DE SÍMBOLOS

- F - Força aplicada no ensaio; unidades: N (ou kgf, conforme especificado no texto)
- A - Área projetada da impressão Vickers; unidade: mm²
- d - Diagonal média da impressão Vickers; unidade: mm
- d1, d2 - diagonais da impressão Vickers; unidade: mm
- HV - Dureza Vickers; número Vickers (kgf/mm²)
- θ - Ângulo entre faces do indentador Vickers (valor nominal 136°); unidade: °
- I(x,y) - Intensidade do pixel na posição (x,y); escala 0-255 (8 bits)
- T - Limiar (threshold) de binarização; escala 0-255 (8 bits)
- μ - Média (estatística) da grandeza analisada (ex.: HV)
- σ - Desvio-padrão (estatístico) da grandeza analisada (ex.: HV)
- r - Coeficiente de correlação de Pearson; adimensional
- a, b - Coeficientes de regressão linear em $y = a x + b$;
- LoA - Limites de concordância (Bland-Altman); unidade: HV
- Δ - Diferença entre métodos (Usuário – Software); unidade: HV
- s_px - Escala espacial (tamanho do pixel); unidade: $\mu\text{m}/\text{pixel}$
- n - Tamanho da amostra; adimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	OBJETIVOS GERAIS	17
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	FUNDAMENTOS DA MICRODUREZA VICKERS	19
2.1.1	PRINCIPIO DE TESTE	19
2.2	FATORES QUE INFLUENCIAM OS RESULTADOS	22
2.2.1	Qualidade da Superfície e Preparação da Amostra.....	23
2.2.2	Carga Aplicada e Parâmetros do Ensaio	24
2.2.3	Influência microestrutural na microdureza Vickers	25
2.2.4	Variabilidade Operacional e Fatores Humanos	27
2.2.5	Fatores Instrumentais e Ambientais	27
2.3	IMPORTANCIA DOS MAPAS E PERFIS DE DUREZA	28
2.4	PROCESSAMENTO DE IMAGENS NA ENGENHARIA	29
2.4.1	Conceitos Básicos de Processamento de Imagens.....	29
2.4.2	Exemplos de Aplicação em Micrografias	30
2.4.3	Uso em Análises de Dureza e Microestrutura.....	31
2.4.4	Comparação entre Métodos Manuais e Automatizados	31
2.4.5	Desafios Técnicos	32
2.5	AUTOMAÇÃO E FERRAMENTAS MANUAIS	33
2.5.1	Comparação entre abordagens comerciais e acadêmicas.....	33
2.5.2	Tendências em automação na análise de materiais.....	34
2.5.3	Integração de sistemas de medição automatizados	35

2.5.4	Ausência de soluções acessíveis e otimizadas para laboratórios com equipamentos antigos	36
2.6	Validação Experimental e Tratamento Estatístico	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Material	40
3.2	Método	41
3.3	Aquisição e preparação de imagens	41
3.4	Ambiente de Software	44
3.5	Detecção Automática de impressão Vickers	46
3.6	Cálculo de dureza	49
3.7	Mapeamento de Dureza	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Análise estatística descritiva global e concordância	53
4.2	Análise Detalhada por zonas de amostragem	55
4.2.1	Análise detalhada Zona 1	56
4.2.2	Análise detalhada Zona 2	58
4.2.3	Análise detalhada Zona 3	60
4.3	ANÁLISE DO MAPA DE CALOR	62
5	CONCLUSÕES	64
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
7	REFERÊNCIAS	67
7.1	REFERÊNCIAS POR ESTRATO	72
7.2	REFERÊNCIAS POR QUALIS	72
7.3	REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS	73
8	APÊNDICE A	74

1 INTRODUÇÃO

A busca por eficiência energética e pelo desenvolvimento de novos materiais tem acelerado as pesquisas de caracterização de materiais, visando melhores condições de aplicação, redução de custos e, sobretudo, soluções mais sustentáveis. Em estudos recentes, podemos verificar que, com a aplicação de materiais mais resistentes, é possível reduzir a espessura das peças e o peso do veículo, pois menos massa significa menor consumo de combustível e menores emissões (CORTOPASSI et al., 2025). Neste contexto, a indústria, juntamente com a comunidade científica, tem investido em estudos voltados ao desenvolvimento e à caracterização de materiais com alta resistência e boa tenacidade. O mapeamento de heterogeneidades microestruturais não apenas melhora o desempenho de peças e orienta a substituição de materiais, como também acelera o projeto de novos materiais e componentes com maior eficiência tecnológica, menor impacto ambiental e aplicações na área da saúde. Esses avanços sustentam análises mais profundas — a previsão de fadiga em trilhos (SYSYN et al., 2019) e a distinção de resistência entre resina e dente (JEONG et al., 2019), e impulsionam soluções que reduzem o consumo de recursos, prolongam a vida útil dos sistemas e permitem o desenvolvimento de dispositivos mais protegidos e seguros.

Esse equilíbrio, no entanto, pode ser comprometido em componentes soldados, uma vez que os ciclos térmicos promovem alterações microestruturais capazes de gerar fases frágeis ou promover precipitações indesejadas. Diante disso, é fundamental que, durante o desenvolvimento de novos materiais ou processos de soldagem, sejam realizados perfis ou mapas de microdureza nas regiões de interesse. Esses mapas fornecem uma representação espacial da distribuição de dureza no material e são obtidos por meio da interpolação de várias medições realizadas em pontos distintos (BRAYSHAW et al., 2017; ZHANG et al., 2024).

A caracterização da microdureza Vickers é indispensável para a investigação de propriedades mecânicas localizadas em ligas metálicas, sobretudo em áreas modificadas por tratamentos térmicos, soldas ou processos de revestimento. Apesar de ser um ensaio relativamente simples, sua execução manual torna os resultados passíveis de variação, já que dependem do critério adotado por quem conduz a medição. Além disso, por exigir repetição contínua e demandar muito tempo, a prática

tende a se tornar cansativa e pouco eficiente. Nesse cenário, tornaram-se atraentes iniciativas que exploram processamento de imagens aliado a técnicas recentes de aprendizado de máquina. Polanco et al. (2023) apresentaram um método de análise digital de imagens capaz de reconhecer e medir automaticamente as diagonais das impressões Vickers, substituindo etapas manuais e reduzindo a interferência do operador. De modo próximo, Li e Yin (2021) recorreram a redes neurais para detecção automática e constataram desempenho superior ao dos métodos tradicionais, sobretudo em superfícies com geometrias mais complexas.

A compreensão das propriedades dos materiais é decisiva para antecipar seu desempenho em usos específicos. Ensaaios laboratoriais permitem caracterizar parâmetros como dureza, ductilidade e rigidez, fornecendo elementos para escolher o material mais indicado. Entre essas propriedades, a dureza se destaca: ela expressa a capacidade de um material resistir à deformação quando pressionado por outro mais rígido, conforme ressaltam Cortopassi (2025) e Brayshaw et al. (2017).

Esse tipo de ensaio também expõe descontinuidades microestruturais e variações acentuadas no comportamento mecânico, funcionando como ferramenta útil tanto para interpretar resultados quanto para aperfeiçoar rotinas de fabricação. Ainda que existam equipamentos comerciais capazes de mapear automaticamente a microdureza, o alto custo continua sendo um entrave para diversos laboratórios. Soma-se a isso a carência de soluções adaptáveis a instrumentos mais antigos, em especial microscópios ópticos sem recursos de automação de foco ou captura digital.

Além disso, a execução manual de um mapa pode exigir centenas ou até milhares de medições, tornando-se um processo altamente moroso, aproximadamente vinte vezes mais lento do que métodos automatizados (ZHAO, Y. J., et al., 2021). A existência de uma ferramenta gratuita, capaz de detectar e medir automaticamente as impressões Vickers a partir de imagens de microscopia óptica, pode representar um avanço relevante para a comunidade científica.

O uso de bibliotecas Python aplicadas ao processamento de imagens tem apresentado bons resultados em aplicações de visão computacional. A biblioteca scikit-image, por exemplo, disponibiliza diversos algoritmos para manipulação e análise de imagens 2D e 3D e mantém forte integração com o sistema científico do

Python (GOUILLART; NUNEZ-IGLESIAS; VAN DER WALT, 2016). Zhao et al. (2021) desenvolveram um método totalmente automatizado para análise de perfis de microdureza. A validação experimental demonstrou que o sistema oferece resultados mais confiáveis que os obtidos por métodos manuais. Já Joopally, Kaundinya e Rao (2023) compararam as bibliotecas OpenCV e Pillow, destacando as vantagens de cada uma de acordo com o tipo e a resolução das imagens.

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é a aplicação de um método automático de detecção de impressões Vickers, visando facilitar o registro e a elaboração de mapas de microdureza em materiais heterogêneos. Para isso, foi desenvolvido um sistema em Python utilizando as bibliotecas OpenCV, NumPy, Pillow e Matplotlib para o processamento e visualização das imagens, além de SciPy para a interpolação dos dados. O sistema permite tanto a medição interativa quanto o mapeamento sequencial automatizado. Os resultados obtidos foram validados a partir de perfis experimentais gerados com um microdurômetro Vickers, garantindo a confiabilidade do método proposto.

1.1 JUSTIFICATIVA

A automação da análise de microdureza Vickers é essencial para garantir precisão, reprodutibilidade e confiabilidade nos ensaios de materiais. O método manual, ainda amplamente utilizado, está sujeito a erros de operador, fadiga visual e limitações na padronização dos resultados, especialmente em análises que exigem grande volume de dados ou perfis detalhados de dureza. A utilização de algoritmos de processamento de imagens e automação computacional permite padronizar etapas críticas, reduzindo a influência de fatores humanos e minimizando erros sistemáticos. Além disso, a automação possibilita a análise de um número muito maior de impressões Vickers em menor tempo, ampliando a análise estatística dos resultados e facilitando a geração de mapas e perfis de dureza com alta resolução.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

A principal proposta é aplicar e validar um software em Python para automatizar a análise de imagens de impressões Vickers.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver rotinas computacionais em Python para o carregamento e pré-processamento de imagens, incluindo a remoção de artefatos, ajuste de contraste e calibração espacial, de modo a garantir a qualidade das imagens utilizadas na análise das impressões Vickers.
- Implementar algoritmos de detecção automática das impressões Vickers, empregando técnicas de processamento de imagens, visando identificar com precisão as diagonais das impressões e minimizar a interferência de ruídos e variações de iluminação.
- Desenvolver funcionalidades para calibração automática e manual do sistema, estabelecendo a correlação entre pixels e unidades de comprimento ($\mu\text{m}/\text{pixel}$), bem como rotinas para exclusão de barras de escala e outros elementos não pertinentes à análise.
- Criar métodos para medição automática das diagonais e rotulagem das impressões Vickers, permitindo a inserção de informações relevantes, como números identificadores e valores das diagonais, de forma a facilitar a rastreabilidade dos dados e a organização dos resultados.
- Implementar ferramentas para a geração de perfis e mapas de microdureza, utilizando bibliotecas gráficas como Matplotlib, de modo a possibilitar a visualização espacial da distribuição de dureza em amostras submetidas a diferentes tratamentos ou condições de processamento.
- Validar o desempenho do software desenvolvido por meio de comparações com medições manuais realizadas em um microdurômetro Vickers, aplicando métodos estatísticos para avaliação da precisão, reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados obtidos de forma automatizada.

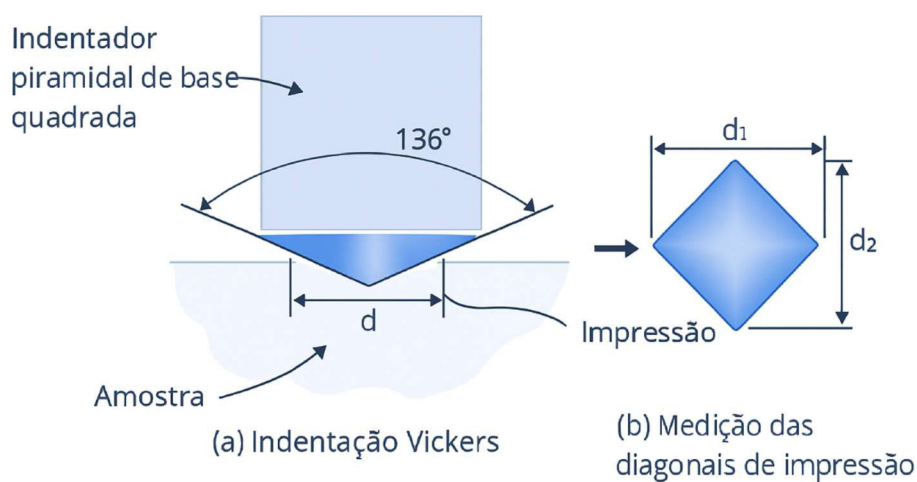
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta tópicos essenciais para a elaboração do trabalho, apresentando o desenvolvimento e a validação de um software para análise automatizada de imagens geradas pelo ensaio Vickers no contexto atual. Por meio de revisão da literatura, são abordados os fundamentos do ensaio Vickers, os desafios associados à análise manual por microscopia óptica e as principais soluções computacionais aplicadas à automação desse processo, de modo a fundamentar a metodologia adotada, a aplicação do sistema proposto e a interpretação dos resultados.

2.1 FUNDAMENTOS DA MICRODUREZA VICKERS

A microdureza Vickers é um método de ensaio de dureza que se baseia na impressão de um material com uma pirâmide de diamante de base quadrada, sendo um dos testes amplamente utilizados em materiais metálicos, cerâmicos e outros. A ilustração do ensaio pode ser entendida pela Figura 1.

Figura 1- Esquema do ensaio de microdureza Vickers.



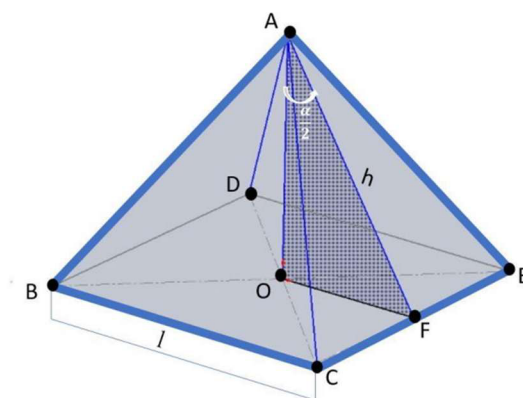
Fonte: Próprio Autor.

2.1.1 PRINCIPIO DE TESTE

O teste de microdureza Vickers é realizado com a aplicação de uma carga controlada (geralmente variando de 1 gf a 1000 gf) sobre uma superfície de um

material, utilizando um indentador com forma piramidal com ponteira de diamante em ângulos de 136° entre as faces, conforme representação pela Figura 2, podemos verificar a geometria do indentador ISO 6507-1 (2018).

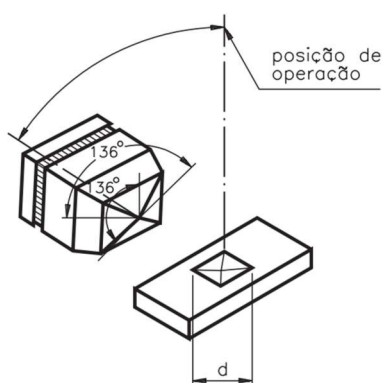
Figura 2- Relações geométricas de uma pirâmide de base quadrada com um triângulo retângulo.



Fonte: Próprio Autor.

A geometria do indentador é fundamental para a precisão do teste. O indentador piramidal de diamante tem faces inclinadas em ângulo de 136° , como pode ser visto na Figura 3, o que cria uma impressão com formato de pirâmide invertida.

Figura 3 - Relações geométricas de uma pirâmide de base quadrada com um triângulo retângulo.



Fonte: Adaptado de Rohde (2010).

Um fator importante antes do início do ensaio é a preparação das amostras. Esta etapa exige preparação minuciosa para garantir a confiabilidade do ensaio, uma vez que rugosidades, sujeiras ou até mesmo riscos distorcem os resultados das

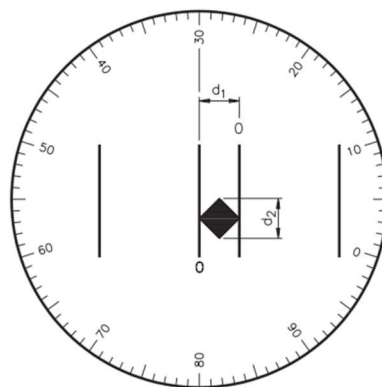
diagonais obtidas pelo operador (ZHAO et al., 2021; POLANCO et al., 2023). A dureza Vickers é dada pela relação entre a carga aplicada e a área da impressão deixada pelo indentador. Quando a carga é aplicada, a ponta de diamante penetra na superfície do material e gera uma impressão cuja diagonal é medida para o cálculo de dureza. Para garantir a exatidão dos resultados, as medições precisam ser feitas com precisão e conferência, utilizando microscópios ou sistemas automatizados. Como a dureza é inversamente proporcional ao quadrado da média das diagonais, impressões maiores correspondem a valores de dureza menores (ASTM E407; ROHDE, 2010).

O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) deixada no corpo de prova, conforme expresso na Equação 1.

$$HV = \frac{F}{A_i} \quad (1)$$

O equipamento de ensaio Vickers manual não fornece diretamente o valor da área de impressão, mas permite obter, por meio de um microscópio acoplado, as medidas das diagonais (d_1 e d_2) formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide. O método de aquisição e análise das imagens influencia diretamente no cálculo de dureza, segundo Dominguez Nicolas e Wiederhold (2018), a qualidade da imagem captada pelo microscópio pode ser melhorada com intervenções de software com um pré-processamento alterando brilho e bordas, que permitem refinar a definição das diagonais. A Figura 4 ilustra a impressão característica do ensaio de dureza Vickers e destaca a precisão das diagonais (d_1 e d_2) para o cálculo da dureza.

Figura 4 - Impressão e medida dos diagonais em microscópio de dureza Vickers.



Fonte: Adaptado de Rohde (2010).

Com as medidas das diagonais obtidas por meio do microscópio, é possível calcular a área da pirâmide de base quadrada (A), utilizando a Equação 2:

$$HA = \frac{d^2}{2 \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)} \quad (2)$$

Como mencionado anteriormente, o valor de dureza Vickers depende da força aplicada (F) e do dimensional da diagonal da impressão (d) gerada na peça, sendo definido pela Equação 3:

$$HV = 1,8544 \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

Interpreta-se a equação no Sistema Internacional (SI), sendo HV a dureza Vickers em Pascal [Pa], F a carga de ensaio em Newtons [N], d representa a média do comprimento das diagonais da impressão gerada na peça (amostra ou corpo de prova), em metros [m], e o valor 1,8544 é descrito como uma constante relacionada à geometria do indentador. Como exemplo, a fim de especificar a magnitude, a Tabela 1 descreve a dureza Vickers para materiais de diferentes classes, conforme ISO 6507-1 (2018) e ASTM E384 (2017).

Tabela 1 - Dureza Vickers para diferentes materiais, valores no SI.

Classe	Material	Dureza (Vickers)
Cerâmica	Vidro comercial	5,7 GPa
	alcalino	
Metal	SAE 1020	1,7 Gpa
Polímero	ABS	0,1 Gpa

Fonte: Próprio Autor.

2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM OS RESULTADOS

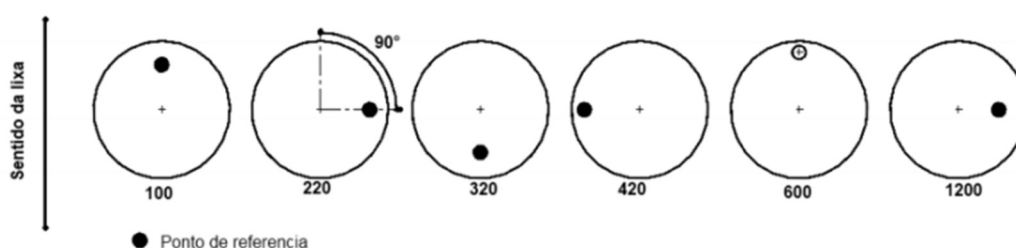
Para obter resultados mais confiáveis nos ensaios de microdureza Vickers, é fundamental considerar os fatores que influenciam diretamente a precisão e a reprodutibilidade das medições. A seguir, são destacados e discutidos os principais aspectos.

2.2.1 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A preparação adequada da superfície é um dos fatores mais críticos para garantir a precisão e a reprodutibilidade dos ensaios de microdureza Vickers. Superfícies rugosas, mal polidas ou com imperfeições podem distorcer a geometria da impressão, dificultando a medição correta das diagonais e, conseqüentemente, afetando o valor final da dureza. Além disso, parâmetros como o tempo de aplicação da carga, a calibração do equipamento e a qualidade do penetrador podem introduzir variações nos resultados (ASTM E407; Rohde, 2010). Segundo estudos, a preparação metalográfica deve seguir etapas rigorosas de lixamento e polimento, conforme normas como a ASTM E407, para assegurar uma superfície lisa e livre de deformações.

A técnica de lixamento manual consiste em lixar a amostra de forma progressiva, utilizando lixas de granulometria decrescente e alterando a direção em 90° a cada etapa, até que desapareçam os traços da lixa anterior, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Representação esquemática do método de lixamento com trabalho em sentidos alternados.



Fonte: Adaptado de Rohde (2010).

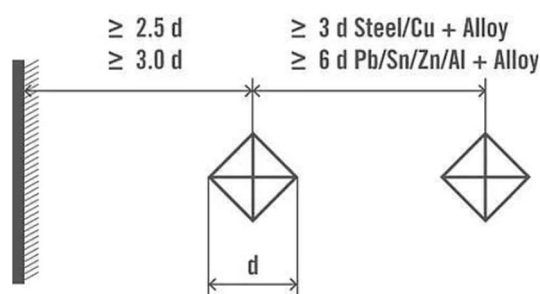
Para se conseguir um lixamento eficaz, é necessário o uso adequado da técnica de lixamento, pois, de acordo com a natureza da amostra, a pressão de trabalho e a velocidade de lixamento, surgem deformações plásticas em toda a superfície por amassamento e aumento de temperatura (ASTM E407; Rohde, 2010). Antes de as amostras sofrerem o ataque químico do polimento, elas devem estar perfeitamente limpas e secas. Para isso, utilizam-se líquidos de baixo ponto de

ebulição, como álcool e éter, que são posteriormente eliminados rapidamente por meio de um jato de ar quente fornecido por um secador. A limpeza da peça visa remover eventuais partículas que possam estar aderidas à superfície recém-lixada ou ao embutimento, uma vez que essas partículas podem comprometer o resultado da próxima etapa de preparação, o polimento. Após o lixamento, portanto, realiza-se uma limpeza por banho ultrassônico, seguida de secagem e armazenamento adequados. Em seguida, é realizado o processo mecânico de polimento, utilizando uma politriz ou de forma manual, com polimento de diamante, em razão de suas características de granulometria, dureza, forma dos grãos e poder de desbaste. A etapa de preparação da imagem é muito importante, pois evita erros de leitura do operador e também reduz as variáveis de análise via software, diminuindo o ruído e garantindo uma boa leitura da imagem (Rohde, 2010; Zhao et al., 2021; Polanco et al., 2023).

2.2.2 CARGA APLICADA E PARÂMETROS DO ENSAIO

A escolha da carga de ensaio adequada é essencial para garantir resultados confiáveis. Cargas inadequadas podem gerar impressões muito pequenas (difíceis de medir) ou muito grandes, suscetíveis a variações microestruturais e a deformações permanentes. A ASTM E384 recomenda aplicar a carga por 10 a 15 s (± 2 s), a fim de reduzir variações. Ensaios com diferentes cargas mostram que a dispersão dos valores de dureza aumenta quando a carga não é adequada ao material. As distâncias podem ser verificadas na norma ISO 6507, que as define para o método de ensaio Vickers. Essas distâncias mínimas correspondem ao espaçamento entre as impressões Vickers e a aresta da amostra. Uma tabela adaptada de distâncias mínimas pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Distâncias mínimas entre os pontos das impressões Vickers.



Fonte: Adaptado de ISO 6507.

2.2.3 INFLUÊNCIA MICROESTRUTURAL NA MICRODUREZA VICKERS

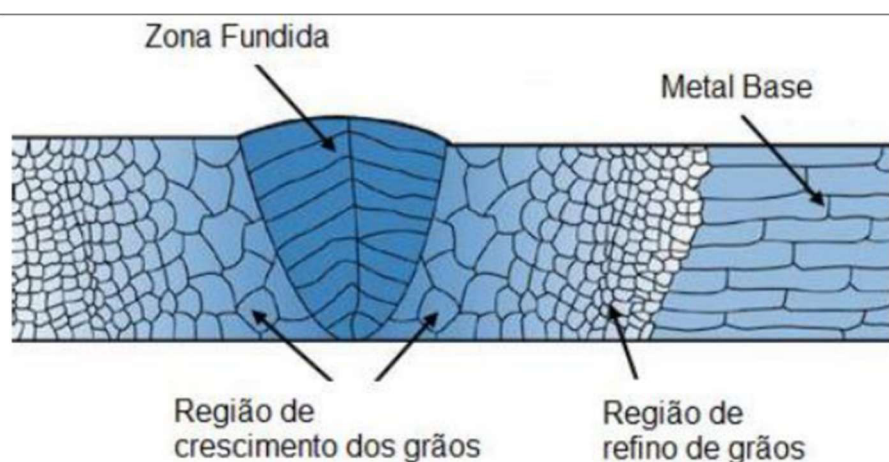
A microestrutura do material exerce influência direta sobre os resultados do ensaio de microdureza. Materiais com múltiplas fases, precipitados ou variações no tamanho de grão tendem a apresentar dispersão maior nos valores de dureza, pois cada região pode responder de maneira diferente à indentação. Em estudos com diferentes tipos de aços e ferros fundidos, observou-se que a presença de partículas de grafita, carbonetos ou outros constituintes microestruturais pode alterar localmente a resistência à deformação plástica, refletindo-se em variações nos valores de HV. Em processos de laminação e tratamentos termomecânicos o refinamento do grão e encruamento tendem a elevar a microdureza, recristalização e crescimento de grão podem reduzi-la. Este tipo de processamento termomecânico controlado, especialmente em aços micro ligados, controlam a temperatura (aquecimento, recristalização controlada, resfriamento acelerado), tais medidas auxiliam no controle e precipitação da textura, refinando o grão e ajustando o equilíbrio entre resistência e tenacidade sem depender apenas de ligas ou tratamentos térmicos posteriores. (CORTOPASSI et al., 2025).

A influência microestrutural na microdureza é particularmente evidente em juntas soldadas. O ciclo térmico da soldagem gera um gradiente de microestruturas entre o metal de solda, a ZAC (com subzonas grosseira, refinada, Inter crítica e subcrítica) e o metal de base. Como cada subzona pode conter fases e tamanhos de grão distintos, é comum observar perfis de dureza com picos e vales ao longo de uma linha de medições perpendicular à linha de fusão. Em aços carbono/baixa liga, por exemplo, a ZAC grosseira pode endurecer (martensita/bainita) se o resfriamento for rápido, enquanto a ZAC Inter crítica/subcrítica pode amolecer por revenimento. Em ferros fundidos, a presença e a morfologia da grafita, bem como a formação local de martensita branca próxima à linha de fusão, também alteram a resistência à deformação e ampliam a dispersão dos valores de HV. Por isso, a seleção adequada da carga e o respeito às distâncias mínimas (ISO 6507) são essenciais para que cada impressão represente uma única subzona, evitando influências de borda ou interação entre Impressões Vickers. De acordo com Marques, Modenesi e Bracarense (2009), na Figura 7 está presente o ciclo térmico, e nela é possível se identificar as seguintes regiões: a) Zona Fundida (ZF): nesta região é onde o material fundiu-se e solidificou-

se durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico nesta região, são superiores as temperaturas de fusão (T_f) do metal de base; b) Zona Afetada pelo Calor (ZAC): nesta região o metal de base não é fundido, porém há grandes alterações microestruturais e de propriedades mecânicas, devido a todo ciclo térmico presente na soldagem. A temperatura de pico nesta região é superior à temperatura crítica do material em questão e inferior à temperatura de fusão; c) Metal de Base (MB): é a região que se encontra mais distante do cordão de solda e não é afetada pelo ciclo térmico da soldagem. As temperaturas de pico são inferiores à temperatura crítica do material.

Devido a toda variação térmica presente no processo de soldagem por fusão, a microestrutura do metal de base sofre modificações. A Figura 7 apresenta a formação de diferentes zonas em torno do cordão de solda, que por sua vez altera a microestrutura inicial do metal de base.

Figura 7 - Regiões formadas durante o processo de soldagem.



Fonte: Adaptado de Marques (2009).

Por outro lado, em testes com revestimentos e materiais que receberam tratamento superficial com camadas finas, a escolha errada de parâmetros de teste, como carga e tempo, pode distorcer o resultado de microdureza, devido a dureza se concentrar em sua superfície. É indispensável ajustar a carga para que a impressão permaneça contida na camada (sem alcançar o substrato), garantindo que o indentador avalie apenas o revestimento (ISO 6507-1, 2018; ASTM E384, 2017). Os materiais biológicos, como tecido dentário, trazem desafios próprios para o ensaio

Vickers. Em comparações entre dente e resina composta, a resposta do indentador varia conforme o substrato e o preparo, evidenciando sensibilidade a microestrutura e ao condicionamento (JEONG et al., 2019). Os materiais aplicados, esmalte altamente mineralizado e anisotrópico e a dentina com materiais com grande variação de compósitos que alteram o diâmetro e densidade do grão, fazem a dureza oscilar pela região, dificultando a análise do teste.

2.2.4 VARIABILIDADE OPERACIONAL E FATORES HUMANOS

Diversos fatores influenciam os resultados de microdureza Vickers. Entre eles destacam-se: a expertise do operador, incluindo o conhecimento dos procedimentos e a padronização das práticas; a escolha adequada da amostra; e a preparação correta, desde o corte até o polimento final, fatores que determinam a nitidez da impressão e a reprodutibilidade. O ataque químico utilizado após o processo de lixamento deve servir apenas para revelar a microestrutura, pois a medição idealmente é feita em superfície polida não atacada. Quando necessário mapear regiões (por exemplo, a ZAC), todas as subzonas devem ser identificadas, marcadas e posteriormente levemente polidas antes das medições. Além disso, a consistência no tempo de aplicação da carga, a verificação e calibração do equipamento, bem como o estado do indentador (geometria e integridade do diamante), impactam diretamente a variabilidade dos resultados, de acordo com as normas ISO 6507-1/-2/-3 e ASTM E384.

2.2.5 FATORES INSTRUMENTAIS E AMBIENTAIS

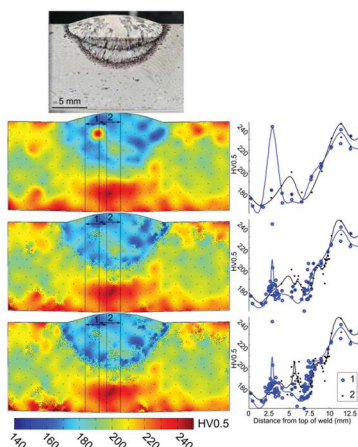
A calibração do equipamento, a qualidade óptica do sistema de medição e as condições ambientais também impactam os resultados do ensaio. O indentador deve estar devidamente revisado e em perfeitas condições, mantendo ângulo de 136° entre as faces, enquanto o sistema óptico deve garantir ampliação e resolução adequadas para proporcionar medições precisas. Vibrações, variações de temperatura e iluminação inadequada podem introduzir erros adicionais, sendo, portanto, recomendada a execução dos ensaios em ambiente controlado.

2.3 IMPORTANCIA DOS MAPAS E PERFIS DE DUREZA

Mapas e perfis de dureza são ferramentas importantes para a caracterização da heterogeneidade dos materiais, permitindo avaliar transições microestruturais em zonas unidas por soldagem, revestimentos ou tratamentos térmicos. Os mapas quantificam e visualizam a distribuição espacial da dureza em uma amostra, permitindo correlacionar propriedades mecânicas locais com características microestruturais. Essa abordagem é especialmente útil em peças tratadas termicamente, revestidas ou soldadas, onde há variação de propriedades mecânicas ao longo da zona fundida, zona termicamente afetada (ZAC) e metal de base. A construção de tais mapas possibilita a análise dos gradientes de dureza, permitindo inferências sobre processos metalúrgicos locais e possíveis regiões de falha (AKINLABI et al., 2020; CÁCERES et al., 2005).

A automação do mapeamento por processamento de imagens em Python tem ampliado a viabilidade prática dessas análises. Rotinas que detectam e medem automaticamente as diagonais das impressões aceleram a coleta, aumentam a reprodutibilidade e reduzem a subjetividade do operador, beneficiando a construção de perfis longos e mapas densos em tempos compatíveis com rotinas de laboratório (POLANCO et al., 2023; ZHAO et al., 2021; VIRTANEN et al., 2020; BRADSKI, 2000). No estudo de Brayshaw (2017), foi apresentado um mapeamento completo, contendo microdureza, interpolação e profundidade, resultando em uma representação visual adequada para a análise da dureza.

Figura 8 - Exemplo de mapeamento de dureza.



Fonte: Adaptado de Brayshaw (2017).

Com este tipo de mapeamento podemos ver com facilidade os pontos onde possuem mais dureza, possíveis outliers ou até mesmo erros do usuário. Além disso, estratégias de malha adaptativa otimizam a distribuição de impressões Vickers, concentrando pontos em regiões de maior variação e garantindo economia de tempo sem perda de informação crítica (BRAYSHAW et al., 2017).

2.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS NA ENGENHARIA

O processamento de imagens é uma etapa fundamental na análise automatizada de características microestruturais e mecânicas de materiais, especialmente quando se trata da medição de microdureza. Entre os conceitos básicos mais relevantes estão a detecção de bordas, segmentação, thresholding (limiarização) e operações morfológicas. A detecção de bordas, por exemplo, permite identificar os limites das impressões sem uma amostra, sendo essencial para o cálculo automático da dureza. Já a limiarização transforma imagens em escala de cinza em binárias, facilitando a segmentação de áreas de interesse (VIRTANEN et al., 2020).

2.4.1 CONCEITOS BÁSICOS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O processamento de imagens é um pilar fundamental na caracterização de materiais, permitindo transformar dados visuais brutos em informações quantitativas precisas (KUMAR et al., 2023; ROHDE, 2010; BRADSKI, 2000; VAN DER WALT et al., 2014). Este processamento de forma automática busca padronizar o método de análise na busca por resultados mais confiáveis e padronizados. O sistema necessita de bibliotecas para reconhecimento, calibração e detecção da imagem, simplificando e convertendo para a linguagem do software. A detecção de bordas, por exemplo, utiliza-se a biblioteca python com OpenCV para identificar transições abruptas de intensidade em micrografias, essenciais para filtrar contornos de grãos ou impressões de microdureza (BRADSKI, 2000; VAN DER WALT et al., 2014; POLANCO et al., 2023). O operador Canny, em particular, destaca-se por sua capacidade de suprimir ruídos e detectar bordas finas, mas sua eficácia depende criticamente da escolha adequada dos limiares de histerese, que variam conforme a iluminação e o contraste da imagem (BRADSKI, 2000; VAN DER WALT et al., 2014). Já o thresholding (limiarização) atua como uma etapa decisiva para isolar regiões de interesse, como impressões de dureza ou fases secundárias (BRADSKI, 2000; VAN DER WALT et al.,

2014). O método de Otsu, amplamente adotado em metalografia, calcula automaticamente um limiar ótimo para binarização, separando eficientemente pixels claros e escuros em imagens com histogramas bimodais, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Método de Otsu - Exemplo.



Fonte: Próprio Autor.

No entanto, em materiais com iluminação irregular ou baixo contraste entre fases, como em cerâmicas não condutoras, o método de Otsu pode produzir segmentações falhas, exigindo o uso de técnicas híbridas que combinem limiarização adaptativa e correção de fundo (Van der Walt et al., 2014; Bradski, 2000; Polanco et al., 2023; Güder et al., 2011).

Por fim, a análise de conectividade quantifica e classifica objetos segmentados, fornecendo dados estatísticos sobre tamanho e forma. Nesse processo, as bordas obtidas após a limiarização — com a conversão da imagem em preto e branco — são transformadas em contornos ou retângulos de referência, possibilitando converter pixels em medidas reais. Em ensaios de microdureza, por exemplo, algoritmos de rotulagem permitem contar e medir automaticamente centenas de impressões em um mapa de dureza, calculando médias e desvios-padrão.

2.4.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO EM MICROGRAFIAS

O processamento de imagens tem se mostrado útil em diversas tarefas, como contar grãos, identificar fases e medir impressões Vickers. Em ensaios com aço D2 — nas condições tratado, não tratado e revestido com TiNbN — a medição automática

das diagonais apresentou tempo médio de ≈ 2 s por imagem e erro máximo de 4,5% em comparação à leitura manual. O método utilizou limiarização guiada por histograma, três estratégias de detecção de cantos e seleção automática pelo melhor índice geométrico (Polanco et al., 2023). Também é possível prever valores de dureza sem medir diagonais. Modelos de aprendizado de máquina treinados com imagens em escala de cinza e metadados experimentais (carga, escala, presença de revestimento) alcançaram coeficiente de determinação $R^2 \approx 1$, com erros variando de 0,43% a 6,88%, em $\approx 0,14$ s por imagem (Mambuscay et al., 2024). Na soldagem por ponto de atrito do AA5083-H116, perfis de microdureza obtidos por zonas (MB, ZAC, TMAZ, SZ) demonstram como a microestrutura local altera a dureza e servem de base para validar fluxos de processamento (pipelines) de medição ou predição (Akinlabi et al., 2020).

2.4.3 USO EM ANÁLISES DE DUREZA E MICROESTRUTURA

A automação da análise de dureza por imagens representa um avanço evidente em relação aos métodos manuais. Estudos comparativos indicam que fluxos de processamento (pipelines) com detecção de bordas e segmentação morfológica alcançam maior precisão e reprodutibilidade, reduzindo a subjetividade do operador (Polanco et al., 2023). Em microestruturas complexas, o processamento digital — com perfis de microdureza e DRX — apoia a identificação e quantificação de fases, além da correlação entre microestrutura e propriedades. Quando as diagonais são difíceis de medir, modelos de aprendizado de máquina podem prever a dureza diretamente a partir das imagens (Mambuscay et al., 2024).

2.4.4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS MANUAIS E AUTOMATIZADOS

A análise manual, ainda comum em muitos laboratórios, está sujeita a falhas como a fadiga do operador e a interpretação ambígua de bordas e trincas em imagens 2D, o que pode dificultar a leitura das diagonais em materiais frágeis ou ultraduros (Stus et al., 2004). Métodos automatizados por imagem elevam o throughput e a consistência: leituras típicas via software levam cerca de 2 s por impressão, com precisão média de 98,3% e erro máximo em torno de 4,5%, em comparação aos aproximadamente 4 min por amostra no procedimento manual. Em rotinas com muitos pontos de medição — por exemplo, em perfis de microdureza de juntas FSSW de

AA5083-H116 — a automação e a integração com bases de dados ou planilhas eletrônicas facilitam a organização, a rastreabilidade e a geração de relatórios (Akinlabi et al., 2020).

2.4.5 DESAFIOS TÉCNICOS

Mesmo com bons algoritmos, o resultado ainda depende fortemente da forma como a imagem é adquirida e do material ensaiado. Em materiais muito duros, as impressões tendem a ser pequenas; sem alta ampliação e calibração de escala ($\mu\text{m}/\text{pixel}$), as bordas das diagonais perdem nitidez e a dureza pode ser enviesada (Dominguez Nicolas; Wiederhold, 2018). Em rotinas bem-sucedidas, a qualidade começa na aquisição e prossegue com um pré-processamento simples e controlado, incluindo correção de iluminação, limiarização guiada por histograma e limpeza morfológica, antes da detecção dos cantos. Ainda assim, foco deficiente, sombras ou uma ROI muito pequena comprometem a segmentação; nesses casos, a seleção automática da “melhor” solução entre múltiplas detecções ajuda a evitar erros sistemáticos (Polanco et al., 2023). Ruídos e artefatos também confundem os detectores. Vibrações, iluminação irregular ou poeira pode gerar bordas falsas; embora filtros e operações morfológicas auxiliem na correção, o uso excessivo pode suavizar detalhes importantes da impressão. Em superfícies muito reflexivas, recomenda-se ajustar a iluminação (difusa/polarizada) e reduzir o ganho da câmera para evitar saturação local. Já em materiais frágeis ou ultraduros, trincas e lascamentos próximos à impressão podem ser interpretados como “bordas” em imagens 2D. Nesses casos, a inspeção óptica 3D das Impressões Vickers é útil para distinguir o contorno real de trincas paralelas e evitar leituras sub ou superestimadas (Liu et al., 2017). Quando as diagonais estão pouco definidas, uma alternativa é estimar a dureza diretamente a partir da imagem. Modelos de aprendizado de máquina não profundos demonstraram bom desempenho com imagens em escala de cinza, redimensionadas, associadas a metadados simples (carga, escala, presença de revestimento), desde que a base de treino seja suficientemente diversa e a escala esteja normalizada (Mambuscay et al., 2024).

Na prática, a combinação de etapas clássicas (preparação e aquisição cuidadosa, correção de iluminação, operações morfológicas) com validações pontuais

(como inspeção 3D quando houver trincas) e, quando necessário, predição via ML, confere maior confiabilidade ao fluxo. Tornar explícitos os parâmetros-chave (limiares, área mínima/máxima da impressão, tolerância angular) e registrar a incerteza da escala complementam o controle de qualidade. Esses desafios evidenciam a necessidade de soluções adaptativas que integrem técnicas tradicionais de processamento de imagens a métodos modernos de inteligência artificial, garantindo confiança frente à variabilidade inerente aos ensaios de microdureza em condições laboratoriais reais.

2.5 AUTOMAÇÃO E FERRAMENTAS MANUAIS

A automação busca superar as limitações do método manual. A medição das diagonais depende do olhar do operador, o que gera variações entre avaliadores e compromete a repetibilidade. Sistemas comerciais oferecem alta precisão e módulos integrados, mas apresentam custo elevado e demandam infraestrutura específica, o que restringe seu uso em laboratórios acadêmicos e de pequeno porte. No campo da pesquisa, ganham espaço soluções de baixo custo e softwares livres, desenvolvidos para microscópios convencionais. O principal desafio é manter bom desempenho em diferentes equipamentos e sob condições de aquisição variadas.

Este tópico apresenta o cenário atual: produtos comerciais, alternativas abertas e propostas híbridas que associam hardware acessível a algoritmos de aprendizado de máquina.

2.5.1 COMPARAÇÃO ENTRE ABORDAGENS COMERCIAIS E ACADÊMICAS.

Em muitos laboratórios e linhas de pesquisa, limitações orçamentárias e de infraestrutura mantêm fluxos de trabalho manuais ou semiautomatizados, nos quais a decisão e a experiência do operador impactam diretamente nos resultados. Nesse contexto, bibliotecas abertas em Python têm sido amplamente adotadas para desenvolver rotinas de processamento e medição com registro transparente de parâmetros e etapas. O uso de pacotes como OpenCV e scikit-image tornou viável implementar desde o pré-processamento até a segmentação e a metrologia em pipelines reprodutíveis e portáteis, possibilitando análises mais detalhadas dos resultados (Bradski, 2000; Van der Walt et al., 2014).

Soluções comerciais fornecem pacotes integrados, com suporte a câmeras industriais, interfaces para CLPs e módulos prontos de inspeção. Em geral, oferecem boa velocidade e suporte técnico, mas exigem licenças pagas e hardware compatível. Na pesquisa acadêmica, plataformas comunitárias de automação demonstram que é possível alcançar análises consistentes sem custos de licença. O CellProfiler, por exemplo, organiza fluxos de processamento em etapas claras, facilita a reprodução de resultados e integra-se a bibliotecas Python para tarefas de classificação e contagem, sendo amplamente empregado em triagem de alto conteúdo (McQuin et al., 2018). Para inspeções que requerem métodos modernos de detecção e segmentação, toolkits como o MMDetection reúnem modelos de ponta, benchmarks e código aberto, servindo de base para comparações diretas com módulos proprietários (Chen et al., 2019; Bergmann et al., 2019).

De modo geral, a escolha entre plataformas comerciais e acadêmicas depende dos objetivos do projeto: quando velocidade de implantação e suporte formal são críticos, os pacotes proprietários tendem a prevalecer; quando orçamento, transparência, adaptabilidade e reprodutibilidade têm maior peso, bibliotecas abertas em Python oferecem um caminho sólido para a automação de imagens (Zhao et al., 2021; Van der Walt et al., 2014; Bradski, 2000).

2.5.2 TENDÊNCIAS EM AUTOMAÇÃO NA ANÁLISE DE MATERIAIS

A automação na caracterização mecânica tem avançado com forte suporte de processamento de imagens e pipelines em Python devido a facilidade de utilização e popularidade da ferramenta. Na microdureza, métodos totalmente automáticos já realizam, “em um clique”, a colagem de micrografias, o reconhecimento das diagonais e a geração do perfil dureza-profundidade, com acurácia próxima à medição manual e maior confiabilidade que instrumentos comerciais em cenários com riscos, ruído de textura e iluminação inconsistente. Em testes com alumínio, latão e cobre, o método apresentou diferença média de 1,1% (DP 7,1%) em relação ao manual na dureza e erro máximo de 3,2% na profundidade, além de produzir mosaicos sem emendas visuais em segundos (ZHAO et al., 2021).

No planejamento das impressões Vickers, estratégias adaptativas reduzem custo e tempo ao concentrar pontos onde o gradiente de dureza é mais elevado. Em

mapeamentos de soldas (FSW, SMW e DMW), uma malha iterativa baseada em elementos triangulares posicionou novas impressões Vickers apenas onde necessário, respeitando ISO 6507/ASTM E384 quanto a espaçamentos ($2,5\text{--}7\times$ a diagonal), e recuperou detalhes de regiões de transição com menos pontos que grades retangulares uniformes (BRAYSHAW et al., 2017). Em mais detalhes, o mapeamento rápido por nanoindentação tem permitido avaliar a dureza e módulo em alta densidade e integrar esses mapas a EBSD. Em IF steel, 10.000 impressões em $200\times 200\text{ }\mu\text{m}$ revelaram durezas entre 1,25 e 2,57 GPa e módulos entre 122 e 227 GPa; o plano (111) apresentou maior dureza média ($\sim 1,84\text{ GPa}$) e os mapas concordaram com KAM, indicando maior misorientação e resistência à deformação nas regiões mais duras. A análise das curvas carga-profundidade evidenciou “pop-in” associado a distorção de rede, reforçando o potencial de fluxos dados-dirigidos para inferir mecanismos locais sem simulação demorada (ZHANG et al., 2024).

Esses avanços se apoiam em ecossistemas abertos e reprodutíveis. Bibliotecas como scikit-image, NumPy e dask viabilizam o desenvolvimento do software, medidas morfológicas 2D/3D e paralelização leve em workstations, integrando-se a scikit-learn e a ferramentas de visualização para compor pipelines escaláveis do laboratório à linha de produção (GOUILLART et al., 2016). Ao mesmo tempo, a escolha criteriosa de formatos e de bibliotecas afeta a confiabilidade das medições: diferenças no tratamento de canais (p.ex., alfa) entre OpenCV e Pillow podem alterar resultados em comparações e pré-processamentos, ponto crucial para estudos metrológicos baseados em imagem (JOOPALLY; KAUNDINYA; RAO, 2023).

Em conjunto, mapeamento adaptativo, reconhecimento de imagens e nanoindentação rápida, apoiados por ferramentas abertas em Python, sinalizam uma automação mais acessível, reprodutível e integrável a análises microestruturais (p.ex., EBSD), reduzindo o número de impressões e o tempo de análise sem sacrificar a resolução ou a confiabilidade (ZHANG et al., 2024).

2.5.3 INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO AUTOMATIZADOS

A integração entre captura, segmentação e quantificação tem se consolidado como referência na análise de materiais. Plataformas integradas permitem ir da imagem bruta à propriedade medida e até simulações no mesmo ambiente

computacional, acrescentando plug-ins no software e equipamentos de automação para entregar uma análise muito mais rápida e completa. Na microdureza, já há pipelines “fim a fim” que, a partir de sequências de micrografias, realizam colagem e detecção automática após a coleta das imagens, com reconhecimento das diagonais, estimativa de profundidade relativa à superfície e geração do perfil dureza-profundidade. Esses sistemas mostraram concordância estreita com a medição manual (diferença média $\sim 1,1\%$ na dureza; erro $< 3,2\%$ na posição) e maior precisão que rotinas embarcadas de instrumentos diante de riscos, ruído de textura e variações de iluminação, além de elevada eficiência (Zhao et al., 2021).

No planejamento e execução das medições, a integração com hardware é crítica. Em mapeamentos de soldas, um arranjo com testador automático (CNC) foi acoplado a código de malha adaptativa para posicionar impressões adicionais nos maiores gradientes de dureza, respeitando os espaçamentos conforme as normas ISO 6507/ASTM E384. O resultado foi maior resolução nas regiões de interesse com menos pontos do que grades regulares, demonstrando como software e controle de estágio podem operar de forma coordenada (Brayshaw et al., 2017).

Aplicadas a rotinas repetitivas (perfis de dureza em revestimentos, avaliações pós-tratamento térmico), essas arquiteturas — sensores ópticos, controle automatizado, processamento e IA — formam um ecossistema único de medição, entregando velocidade, reprodutibilidade e confiabilidade com mínima intervenção humana (Zhao et al., 2021; Brayshaw et al., 2017; Zhang et al., 2024; Gouillart; Nunez-Iglesias; Van der Walt, 2016).

2.5.4 AUSÊNCIA DE SOLUÇÕES ACESSÍVEIS E OTIMIZADAS PARA LABORATÓRIOS COM EQUIPAMENTOS ANTIGOS

Boa parte das soluções para análise automatizada de imagens parte do pressuposto de que o laboratório dispõe de câmeras científicas de alta resolução, estágios motorizados e iluminação controlada. Em muitos ambientes acadêmicos, contudo, a realidade é outra: microscópios ópticos sem automação, saídas analógicas improvisadas, computadores sem GPU dedicada, iluminação de ambiente inadequada, falta de ferramentas para preparação da amostra e, de modo geral, ausência de manutenção dos equipamentos. O resultado é dificuldade na atualização

(revamps e upgrades) dos equipamentos em comparação ao que o mercado tem a oferecer.

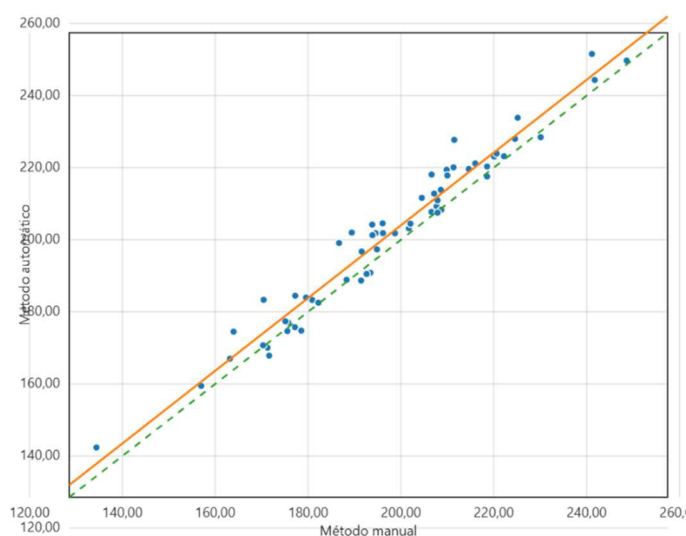
Uma alternativa viável é adotar uma forma semiautomática, priorizando a aquisição de câmeras e melhorias pontuais para a implementação de um software de apoio, uma vez que rotinas simples em Python (OpenCV) já permitem uma captura reprodutível. No processamento, é possível alcançar desempenho adequado apenas com CPU, utilizando scikit-image e OpenCV. Segmentadores resistentes a ruído e baixo contraste, somados à colagem (stitching) com mistura de bordas, permitem reconstruir perfis dureza-profundidade e medir as diagonais das impressões com concordância estreita em relação à leitura manual, mesmo em micrografias com riscos e textura (Zhao et al., 2021). Como muitos microscópios não dispõem de foco automático, a alternativa semiautomática com software de apoio pode compensar imagens de baixa qualidade com um ajustador de nitidez via software. Se houver margem financeira, o retrofit de um único eixo (foco) com motor de passo e microcontrolador acoplado ao botão de macro/micro, ou o uso de estágios de flexão impressos em 3D, introduz automação incremental por fração do custo de um sistema novo (Sharkey et al., 2016). Esses incrementos produzem ganhos expressivos em repetibilidade sem exigir a troca de todo o conjunto óptico. Em síntese, mesmo com microscópios convencionais e notebooks sem aceleração gráfica, é possível montar um fluxo confiável utilizando um software externo como ferramenta de apoio. O software proposto insere-se nesse sistema: prioriza formatos abertos, opera em hardware separado e oferece mecanismos de auditoria e validação, sem abrir mão da exatidão das medições em conjunto com o operador.

2.6 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO ESTATÍSTICO

A validação experimental é um processo crucial em diversos segmentos, tanto na indústria quanto na área científica, pois é por meio dela que se pode elaborar uma análise complexa para sustentar a técnica aplicada na estatística. Segundo Zhao, a melhoria em processos automáticos parte inicialmente de uma coleta manual de dados, na qual o operador, em seu processo tedioso e repetitivo, pode cometer erros que são facilmente detectados quando se realiza a comparação estatística. Essa validação garante e confirma se o método, produto ou sistema funciona como

esperado e atende aos requisitos estabelecidos. Na validação experimental entre uma análise manual e outra automática, podem ser empregados gráficos de dispersão para avaliar a linearidade e o método de Bland-Altman para identificar vieses, outliers e proporção. Essa comparação pode ser conduzida com amostras-padrão ou com amostras reais analisadas em condições controladas. Os gráficos de dispersão e Bland-Altman podem ser observados nas Figuras 10 e 11.

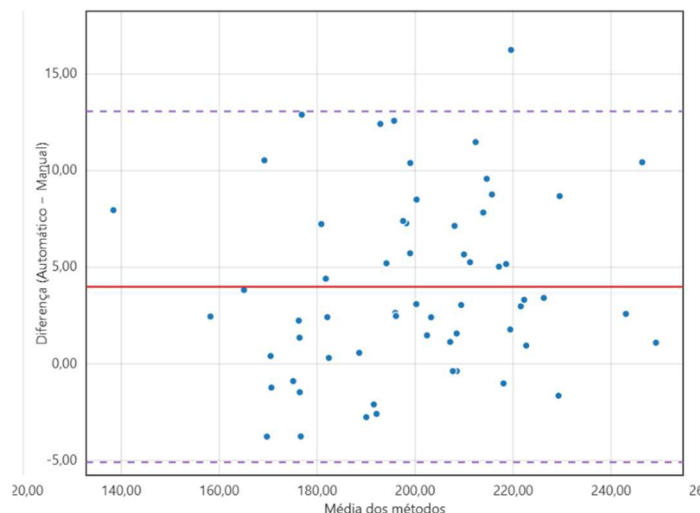
Figura 10 - Gráfico de Dispersão.



Fonte: Próprio Autor.

A análise gráfica de dispersão com regressão apropriada (Deming ou Passing-Bablok) é importante para detectar viés constante e proporcional.

Figura 11 - Gráfico de Bland-Altman.



Fonte: Próprio Autor.

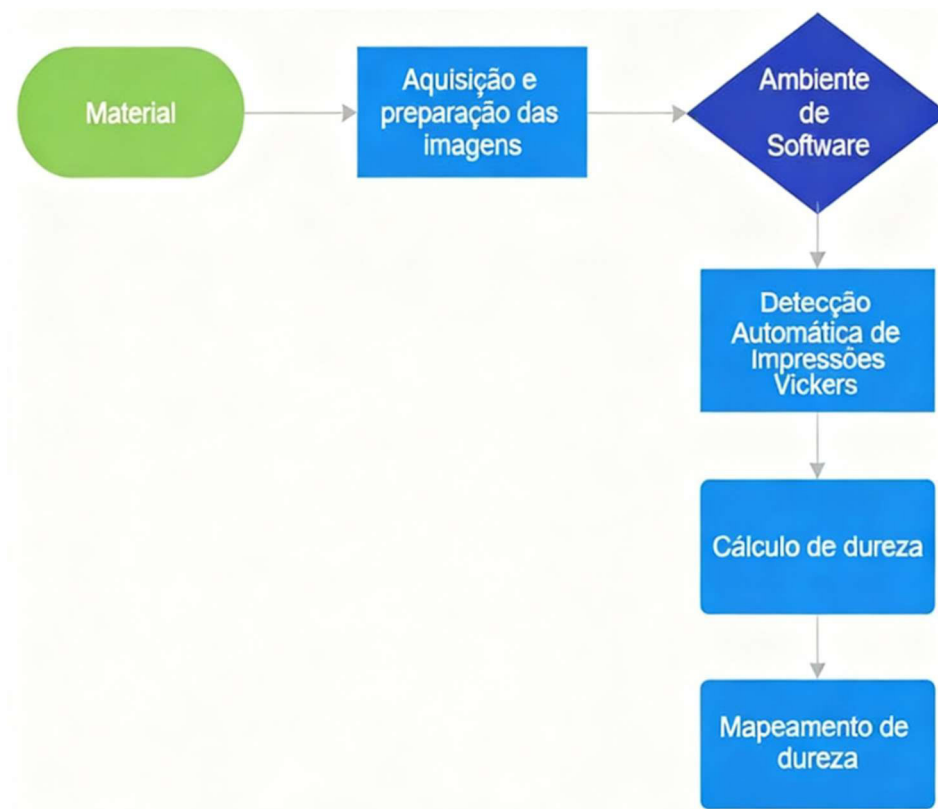
A análise do Gráfico de Bland-Altman é importante para avaliar viés, outliers e limites de concordância; gráfico visual e de fácil leitura, importante para avaliar duas análises sobre o mesmo.

Em síntese, o referencial indicou pontos importantes para o desenvolvimento do software para mapeamento de dureza, sendo necessário pontos de atenção e seguir um fluxo padronizado com pontos de atenção: seleção de carga e tempo de aplicação compatíveis com o material, preparo adequado da superfície e respeito aos espaçamentos mínimos. Também se evidenciou que a metalurgia do material influencia diretamente a leitura das diagonais, podendo ampliar a dispersão dos resultados. Considerando esses pontos, o próximo capítulo apresenta os materiais, as condições de ensaio e o passo a passo adotado (ajuste de carga/tempo, preparação, espaçamento entre impressões e estratégia de mapeamento), de modo a garantir resultados rastreáveis e comparáveis às diretrizes normativas e à literatura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos a sequência da metodologia do estudo foi organizada pelo fluxograma apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: O próprio autor.

Este fluxograma apresenta, de forma objetiva e visual, as principais etapas envolvidas na aplicação do software desenvolvido.

3.1 MATERIAL

Para o experimento foi utilizado o aço ASTM A242, um aço estrutural de alta resistência e baixa liga com propriedades aprimoradas de resistência à corrosão atmosférica, foi analisado na Tabela 2 quanto à sua composição química.

Tabela 2 - Composição química nominal do aço ASTM A242.

C	Mn	P	S	Si	Al	Ti+Nb+V	Cr+Mo
≤0,15	≤1,00	≤0,15	≤0,05	0,30-0,65	-	-	Cr: 0,40-065 Mo: -

Fonte: Adaptado SAE J 403 (2023).

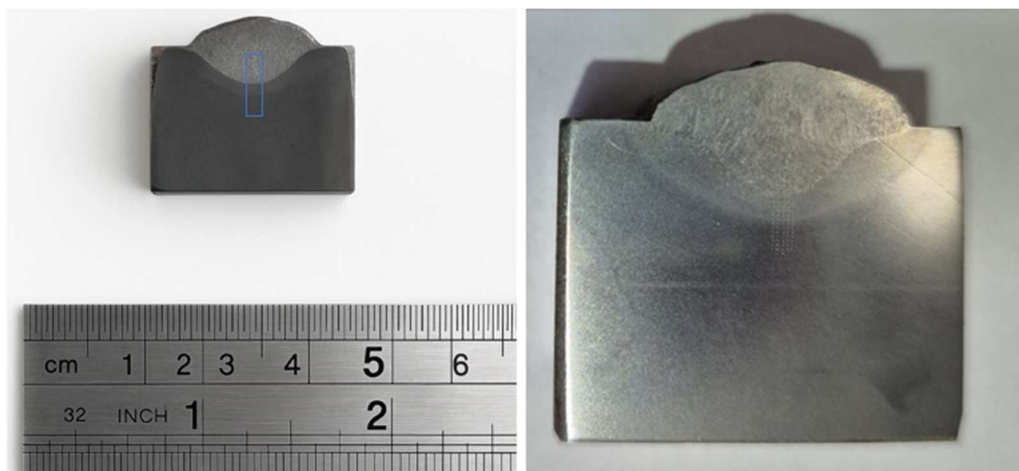
3.2 MÉTODO

A metodologia utilizada para análise das imagens de microdureza foi organizada em etapas sequenciais, com o objetivo de automatizar a detecção das impressões Vickers e facilitar a análise dos resultados. O processo foi realizado pelo método tradicional manual para captura das imagens e cálculo da microdureza e foi implementado em um sistema computacional, permitindo tanto o processamento automático quanto a interação manual quando necessário, sendo as principais etapas: Aquisição e preparação de imagens; Ambiente de Software; Detecção Automática de impressões Vickers; Cálculo de Dureza e Mapeamento de Dureza.

3.3 AQUISIÇÃO E PREPARAÇÃO DE IMAGENS

A amostra representada na Figura 13, possui material de aço ASTM A242 e dimensional de 3,3 x 2,8cm. Este material foi escolhido devido à ampla utilização industrial, no qual destaca-se por possuir alta resistência a esforços mecânicos e boa resistência à corrosão atmosférica. Após Seleção a amostra foi identificada para garantir rastreabilidade dos resultados ao longo de todo o processo experimental.

Figura 13 - Amostra detalhada do aço ASTM A242.



Fonte: O próprio autor.

Na sequência, a amostra foi submetida a um cuidadoso processo de preparação da superfície, como pode ser visto na Figura 14, que envolveu a remoção de sujeira, óleo, óxidos e demais impurezas capazes de comprometer a precisão dos resultados. Foi realizada uma limpeza minuciosa com lixamento, polimento e ataque químico. Esses procedimentos garantem maior qualidade na captura das imagens pelo microscópio

Figura 14 - Detalhe da amostra após preparação.



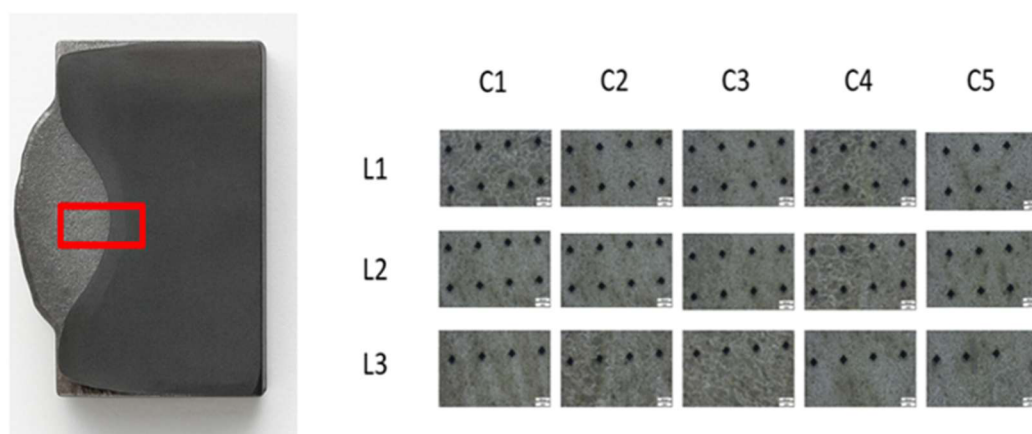
Fonte: O próprio autor.

Após a preparação da superfície, as imagens utilizadas para o mapeamento de dureza foram obtidas a partir do microscópio óptico, com impressões Vickers realizadas na amostra soldada de aço ASTM A242, sob carga de 0,3 kgf e tempo de

permanência de 10 s. Os recuos foram alinhados em uma grade regular ao longo de perfis ou regiões de interesse predefinidos. Todas as imagens foram capturadas sob condições controladas de iluminação e ampliação para garantir contraste e nitidez adequados à análise digital, utilizando o equipamento da marca Shimadzu, modelo HMV-2T.

Ao todo, foram realizados 95 pontos de impressões Vickers na amostra soldada, que abrangeram as zonas de metal de base, zona afetada pelo calor e zona fundida. Esses pontos geraram 15 imagens, que foram codificadas para garantir a rastreabilidade dos resultados ao longo de todo o processo experimental. A Figura 15 ilustra as imagens obtidas e suas codificações.

Figura 15 - Detalhe dos 95 pontos de impressões Vickers e suas 15 imagens.



Fonte: O próprio autor.

A Figura 15 apresenta as imagens geradas a partir dos pontos de impressão, com cada ponto separado por um espaçamento de 0,25 mm e distribuídos ao longo de um comprimento de 5 mm na região soldada. As imagens foram convertidas para tons de cinza e, opcionalmente, cortadas ou redimensionadas usando ferramentas padrão de edição de imagem, dependendo da resolução e do enquadramento.

A Figura 16 ilustra uma imagem detalhada obtida pelo microscópio no qual pode ser verificado as tonalidades de cinza e preto.

Figura 16 - Amostra detalhada do aço ASTM A242.



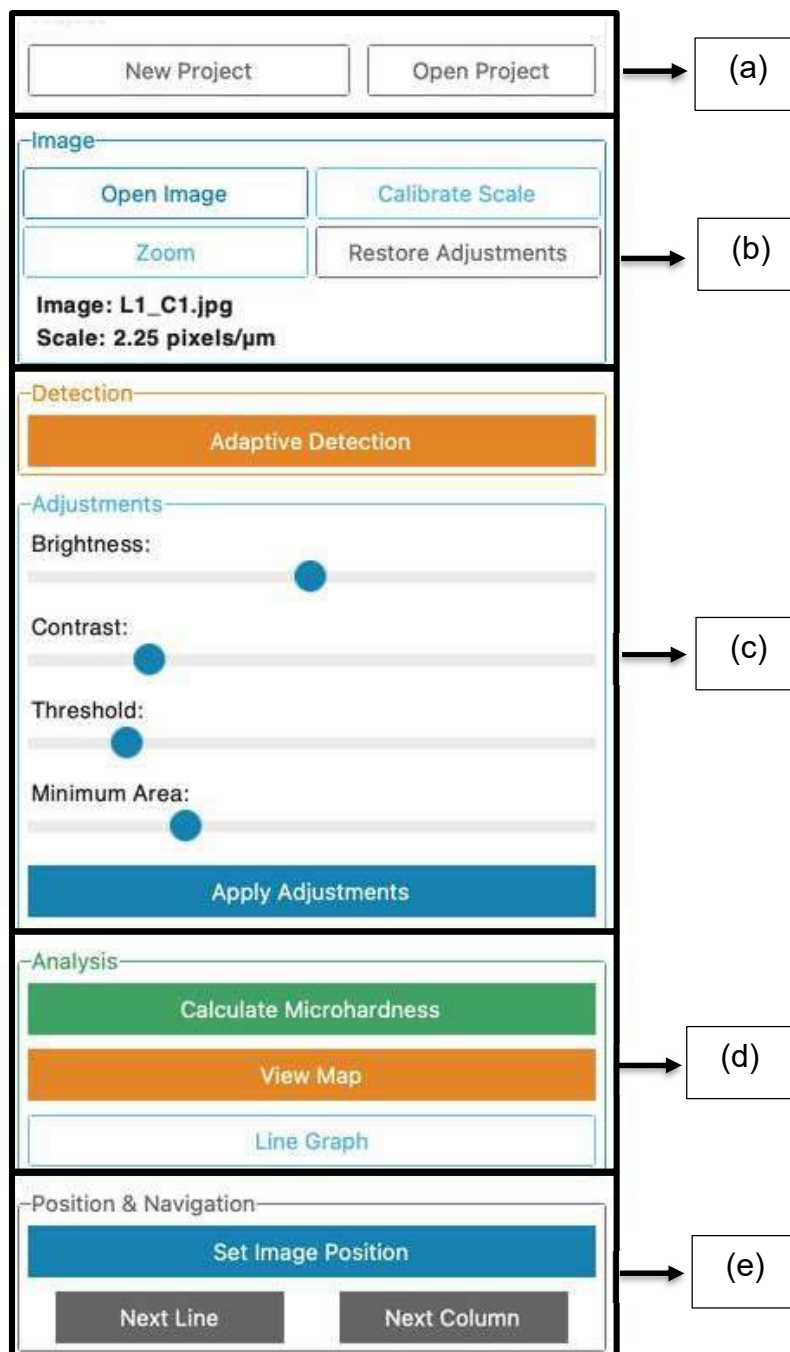
Fonte: O próprio autor.

3.4 AMBIENTE DE SOFTWARE

A análise de imagens e o mapeamento de dureza foram realizados utilizando um software baseado em Python desenvolvido especificamente para esse fim. O sistema foi implementado utilizando as seguintes bibliotecas: OpenCV (filtragem de imagens e detecção de contornos); Pillow (conversão de imagens e operações de sobreposição); NumPy (operações de matrizes e conversões em escala de pixels); Matplotlib (geração e saída de gráficos) e SciPy.interpolate (interpolação espacial para mapeamento de dureza). Estudos recentes confirmam que o ambiente Python somados com bibliotecas NumPy e scikit-image, permitem um desenvolvimento de soluções consistentes e flexíveis para análise microestrutural (KUMAR et al., 2023; HARRIS et al., 2020).

Para tornar o software intuitivo e de fácil utilização a interface gráfica do usuário (GUI) foi construída usando o pacote Tkinter, fornecendo uma plataforma interativa para criação de novo projeto, carregamento de imagens, seleção adaptativa de impressões e controle de mapeamento. Conforme pode-se verificar os menus do software na Figura 17.

Figura 17 - Menus detalhados do Software: (a) Abertura e criação de projeto (b) Abertura de imagem e calibração da escala (c) Detecção automática com calibração de imagem (d) Cálculo de Microdureza e Mapas (e) Posições e navegações na imagem.



Fonte: O próprio autor.

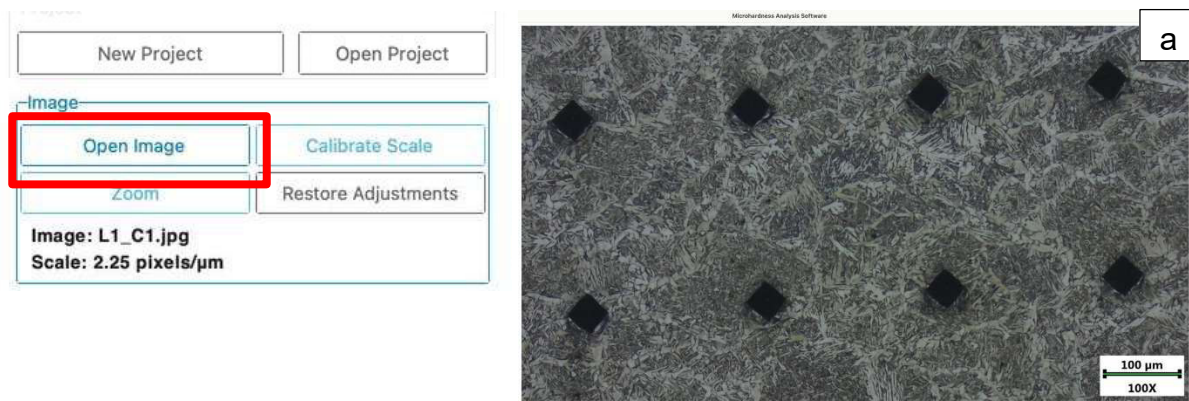
A interface gráfica, desenvolvida com Tkinter, já consolidado e aplicável em diversos campos de pesquisa e engenharia, a interface foi projetada para ser intuitiva

e fácil de usar. O design inclui os campos de entrada para dados de engenharia e análise. A abordagem de ambientes de software visa proporcionar uma ferramenta prática e interativa que apoia engenheiros e estudantes na realização de análises de forma acessível e compreensível (HOLZ; PEDROZO; ÉDER, 2024).

3.5 DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE IMPRESSÃO VICKERS

O ambiente de software é de fácil entendimento, como abertura do projeto para garantir rastreabilidade e a calibração da imagem para garantir confiabilidade e suportar as equações e validações do software. Para iniciarmos a detecção de impressões Vickers automáticas é necessário abrir as imagens no software e realizar a calibração da imagem, ilustrado nas Figuras 18 e 19.

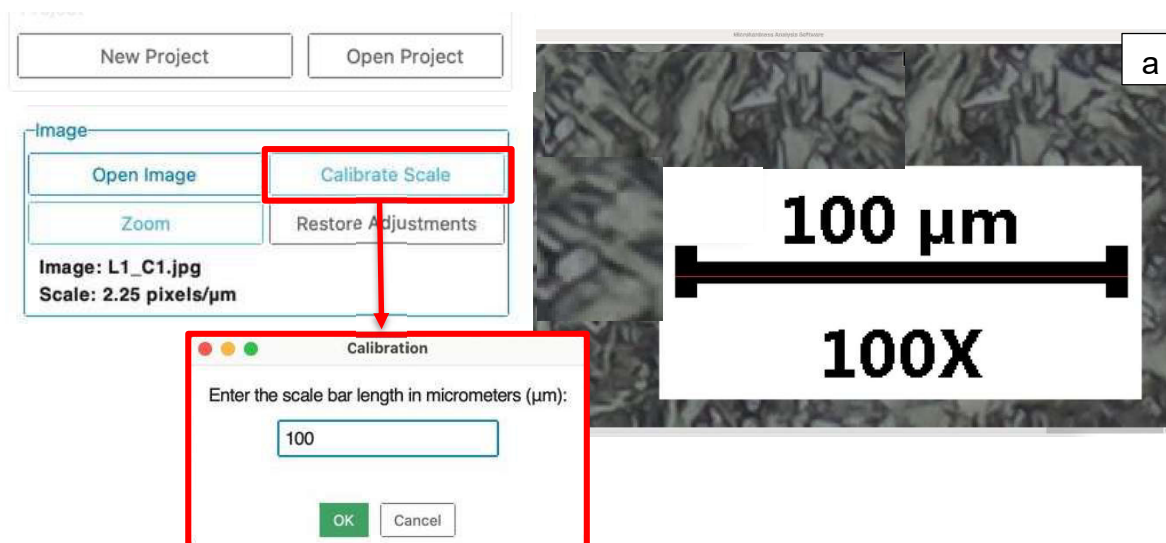
Figura 18 - Detalhe do Software - Abrindo Imagem.



Fonte: O próprio autor.

Após abertura da imagem é necessário realizar a calibração. Este procedimento converte as dimensões da imagem em pixels em medidas reais, possibilitando uma análise precisa e confiável do software. A calibração é necessária somente na primeira imagem do estudo.

Figura 19 - Detalhe do Software - Calibração da escala.



Fonte: O próprio autor.

A partir da calibração o software se torna intuitivo, gerando repetitividade, portanto é necessário abrir todas as imagens e manter organização na compilação das imagens com codificações. Cada imagem é processada por meio de uma sequência de operações para detectar os contornos, sendo as principais: Redução de ruído e detecção de bordas usando desfoque gaussiano e filtro Canny; Extração de contornos para identificar características em forma de diamante; Critérios de filtragem baseados em razão de aspecto, tamanho e simetria angular para isolar as impressões Vickers válidas e Rotulagem automática e registro de coordenadas de cada impressão válida.

As principais bibliotecas para a detecção das imagens foram OpenCV e Pillow, conforme mencionadas anteriormente. Estas bibliotecas são utilizadas para avaliar via software o formato e as quantidades das marcas de impressões, sendo necessário converter de pixels para unidades de medidas as imagens, obtendo as bordas (HOLZ; PEDROZO; ÉDER, 2024). Para isso, são empregadas técnicas de morfologia matemática, que consistem em realizar a diferença entre a imagem filtrada por área e a mesma imagem erodida em um pixel, conforme ilustrado na Figura 20. Essa abordagem possibilita o realce e a segmentação precisa das características de interesse na imagem, facilitando a análise subsequente. A marca de impressão pode assumir diferentes formatos dependendo do tipo de material e da força exercida sobre

ela pelo indentador. Devido a isso, em muitos casos, não é possível aproximar o formato da impressão a um quadrado, sendo utilizados formatos de retângulo e convertidos em uma média para aplicação do cálculo de dureza.

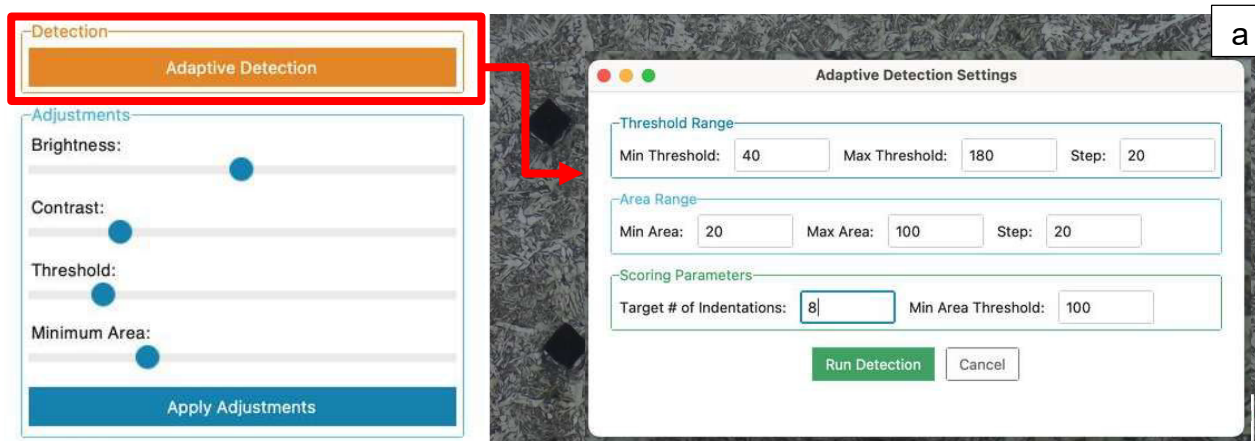
Figura 20 - Detalhe do Software - Conversão da imagem em pixel pretos e brancos para leitura e processamento dos dados.



Fonte: O próprio autor.

Para detecção automática das imagens o software converte automaticamente a imagem para tons de preto e branco devido à melhor conversão dos pixels para medidas. O sistema devido a primeira calibração se mantém padronizado para todas as outras imagens, porem caso necessário, permite ao usuário ajustar os parâmetros de detecção adaptativa, como ilustrado na Figura 21, facilitando a identificação precisa das impressões mesmo em imagens com ruído ou contraste variável.

Figura 21 - Detalhe do Software - Ajuste e parâmetros da imagem.



Fonte: O próprio autor.

Os ajustes podem ser alterados conforme: brilho destacando as áreas escuras e claras; contraste tornando as bordas mais nítidas; Limiar (Threshold) para segmentar a imagem, separando as marcas de impressão do fundo e área mínima eliminando pequenos ruídos e objetos. O modo interativo, é um ajuste caso necessário para melhorar a qualidade das bordas. Esses ajustes, caso necessários, melhoram a qualidade e precisão da detecção automática de marcas de impressão, impactando diretamente nos tons de preto e branco com ajustes mais precisos, tornando as bordas mais evidentes, eliminando ruídos e melhorando a qualidade da imagem para a melhor leitura do software.

3.6 CÁLCULO DE DUREZA

Para cada impressão válida, as duas diagonais são calculadas a partir do contorno detectado. O número de dureza Vickers (HV) é calculado usando a Equação 4:

$$HV = \frac{1.854}{d^2} \cdot F \quad (4)$$

Onde:

- F é a carga aplicada em quilograma-força (kgf)
- d é o comprimento diagonal médio em milímetros

O software suporta processamento em lote e registra automaticamente os valores de HV junto com dados posicionais. Como ilustrado na Figura 22, o usuário aplica a carga e pode visualizar os valores de dureza calculados automaticamente.

Figura 22 - Detalhe do Software - (a) Aplicação da carga e resultados de microdureza; (b) Representação dos resultados das impressões Vickers conforme carga aplicada.



Fonte: O próprio autor.

A partir da aplicação automática da carga se tem os resultados de todas as impressões e posições, garantindo rastreabilidade e facilidade de análise dos resultados.

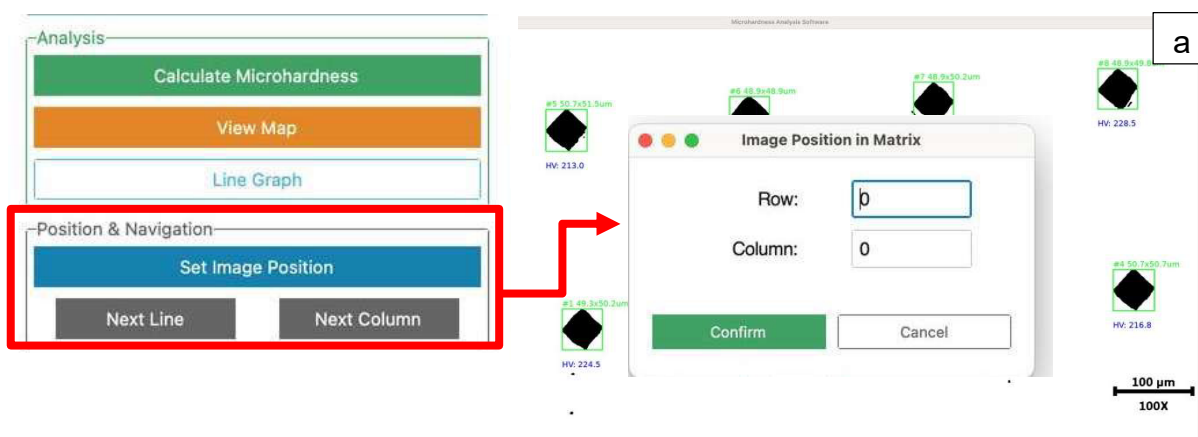
3.7 MAPEAMENTO DE DUREZA

O sistema suporta duas estratégias de mapeamento:

- Aquisição baseada em grade, onde o usuário especifica o número de linhas e colunas e o espaçamento em pixels.
 - Mapeamento manual, onde as impressões são medidas uma a uma com controle posicional.

Os pontos de dados coletados foram interpolados por meio da função `scipy.interpolate.griddata`, com o objetivo de gerar um mapa colorido da distribuição de dureza. Os mapas obtidos destacam os gradientes espaciais e permitem a identificação de heterogeneidades microestruturais. A Figura 23 ilustra o posicionamento dos pontos medidos.

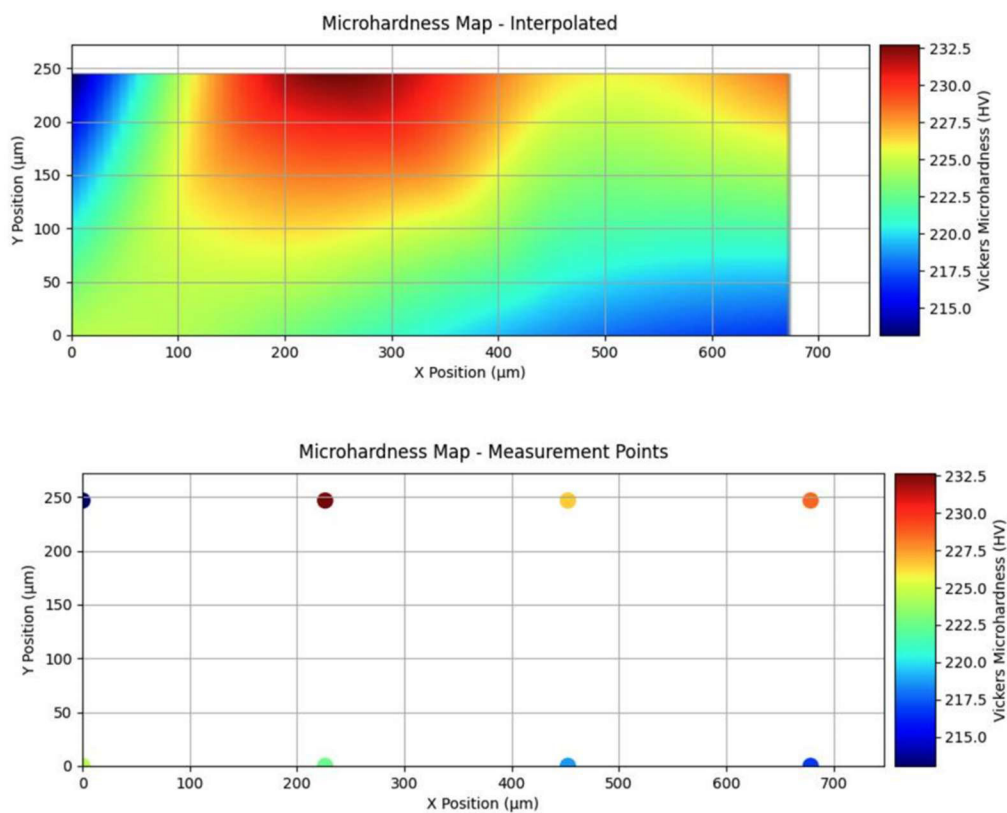
Figura 23 - Detalhe Software - Posicionamento.



Fonte: O próprio autor.

Após o posicionamento de pontos e interpolação pode ser gerado um mapa de calor. A Figura 24 apresenta um exemplo de mapa de calor gerado, evidenciando a capacidade do sistema em identificar gradientes e heterogeneidades microestruturais.

Figura 24 - Detalhe Software - Exemplo de Mapa de Calor com 8 pontos gerado pelo software.



Fonte: O próprio autor.

Aplicações destas técnicas de interpolação com a visualização de mapas de calor auxiliam nas análises em materiais heterogêneos, principalmente em zonas de soldagem com variações sutis que poderiam ser negligenciadas por análises de tabelas (VIRTANEN et al., 2020; HUNTER, 2007).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação da concordância entre os valores de microdureza obtidos manualmente e pelo software desenvolvido foi realizada por meio de abordagens estatísticas complementares: análise de dispersão, gráfico de Bland-Altman e mapa de calor, sendo avaliadas separadamente em Análise Estatística Descritiva Completa e Concordância, Análise Estatística Detalhada por Zonas da amostragem e Análise do Mapa de calor.

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA GLOBAL E CONCORDÂNCIA

Para a análise estatística completa, foram contabilizados os 95 pontos de impressões Vickers, distribuídos na amostra. Esses pontos foram coletados manualmente pelo usuário e processados no software, gerando os resultados de microdureza. A tabela com todos os pontos coletados pode ser consultada no Apêndice A, e o resultado consolidado encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo da estatística descritiva global (n=95).

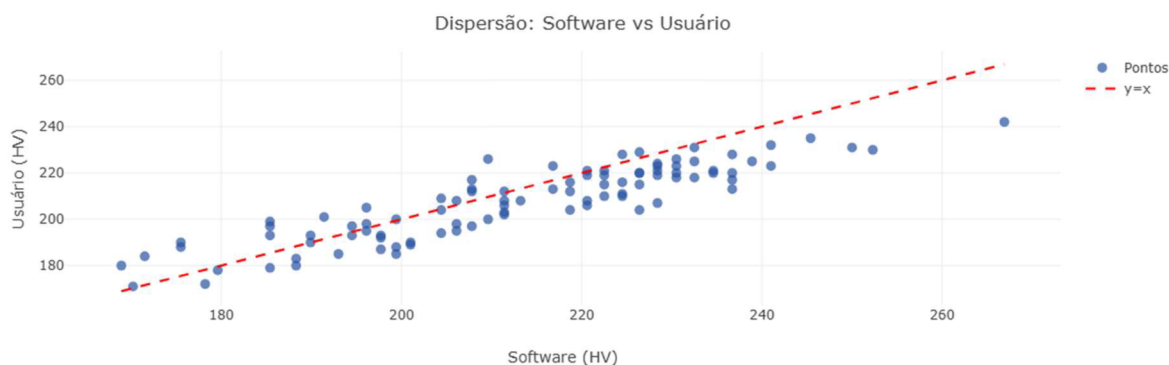
Métrica	Valor
Média HV (Usuário) $\pm$ DP	207,6 $\pm$ 15,8
Média HV (Software) $\pm$ DP	212,9 $\pm$ 20,2
Diferença média (U-S) $\pm$ DP	-5,37 $\pm$ 9,2 HV
MAE RMSE	8,9 10,6 HV
Correlação de Pearson (r)	0,899
Regressão (U vs S)	$y = 0,703 x + 57,79$
Limites de concordância (LoA)	-23,4 a 12,6 HV
% dentro dos LoA	94.7%

Fonte: O próprio autor.

Podemos observar um desvio-padrão de 9,2 HV, valor dentro do limite aceitável para ensaios de microdureza, que toleram ± 10 HV. Identificou-se também uma diferença média de -5,37 HV, indicando que as medições do usuário foram ligeiramente menores que as obtidas pelo software. Essa diferença de viés representa aproximadamente 2,5% de erro, considerado tolerável para ensaios de microdureza.

O erro médio absoluto (MAE) e o erro quadrático médio (RMSE) corresponderam a 4–5% do valor médio. A correlação de Pearson (r) evidenciou comportamento consistente entre os métodos (valores superiores a 0,85 já são considerados fortemente correlacionados). O coeficiente de regressão de 0,703 (< 1) indica leve tendência de subestimação nas medidas manuais de dureza mais elevadas. Os limites de concordância foram de 94,7%, valor muito próximo ao 95% tolerado em análises estatísticas, evidenciando pouca variação, embora com a presença de alguns outliers. A relação entre os métodos pode ainda ser analisada visualmente no gráfico de dispersão apresentado na Figura 25.

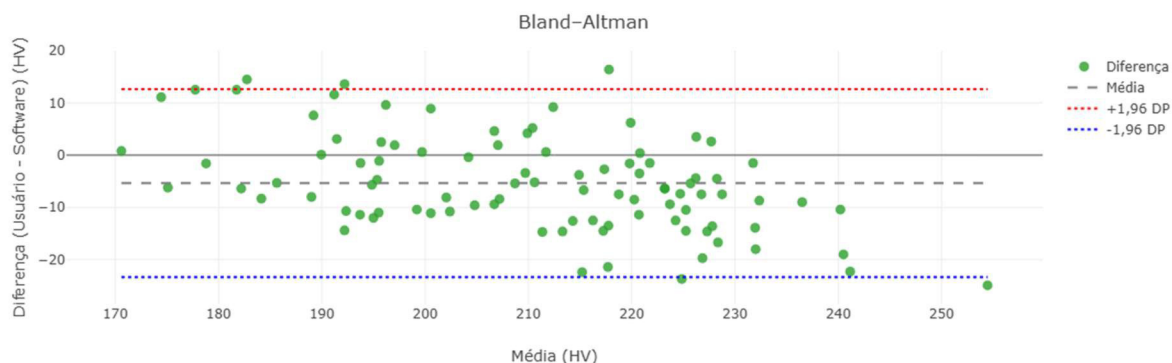
Figura 25 - Gráfico Geral de Dispersão - Usuário x Software.



Fonte: O próprio autor.

O gráfico de dispersão demonstra a forte relação linear entre os valores medidos manualmente e os obtidos automaticamente pelo software, próximos da linha de identidade ($y = x$). Pequenas dispersões observadas ao longo da linha de tendência podem ser atribuídas a variações inerentes ao processo manual de leitura, reforçando o potencial do software para padronização de resultados. Para complementar o estudo, foi realizada a avaliação da concordância entre os métodos pelo gráfico de Bland-Altman, conforme Figura 26.

Figura 26 - Gráfico Geral de Bland Altman - Usuário x Software.



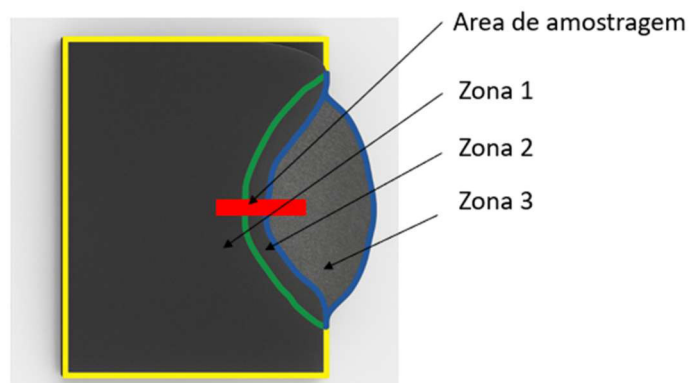
Fonte: O próprio autor.

Esse tipo de gráfico permite visualizar a diferença entre dois métodos em função da média entre eles, além de indicar possíveis tendências sistemáticas ou variações inconsistentes. A diferença média (viés) entre os métodos foi de $-5,37$ HV, o que mostra que, em média, o software tende a registrar valores ligeiramente mais altos que o operador humano. Esse viés é reduzido quando comparado aos valores típicos de dureza medidos (faixa de 170 a 250 HV), representando um erro sistemático inferior a 3%. Os limites de concordância ($\pm 1,96 \times$ desvio-padrão) foram estimados em $+12,51$ HV e $-23,26$ HV, abrangendo a maior parte das medições. Os poucos pontos foram desses limites, visíveis no gráfico de Bland-Altman, podem ser considerados outliers e requerem análise mais detalhada.

4.2 ANÁLISE DETALHADA POR ZONAS DE AMOSTRAGEM

Para aprofundar a análise, devido aos cinco pontos de outliers identificados na análise geral, os dados foram segmentados conforme as três zonas metalográficas da amostra: Zona 1 (metal de base), Zona 2 (zona afetada pelo calor) e Zona 3 (zona fundida). As representações das zonas podem ser verificadas na Figura 27.

Figura 27 - Amostra Ampliada com Zonas de Amostragem.



Fonte: O próprio autor.

Detalhe da amostra, com a área da amostragem e seus 95 pontos de impressões distribuídos em Zonas.

4.2.1 ANÁLISE DETALHADA ZONA 1

A Zona 1 corresponde a 35 dos 95 pontos de impressões analisados, sendo identificada como metal de base. Nessa região, espera-se uma microestrutura mais homogênea e impressões regulares, o que favorece a concordância. A tabela com os pontos coletados pode ser consultada no Apêndice A, e o resultado completo encontra-se na Tabela 4

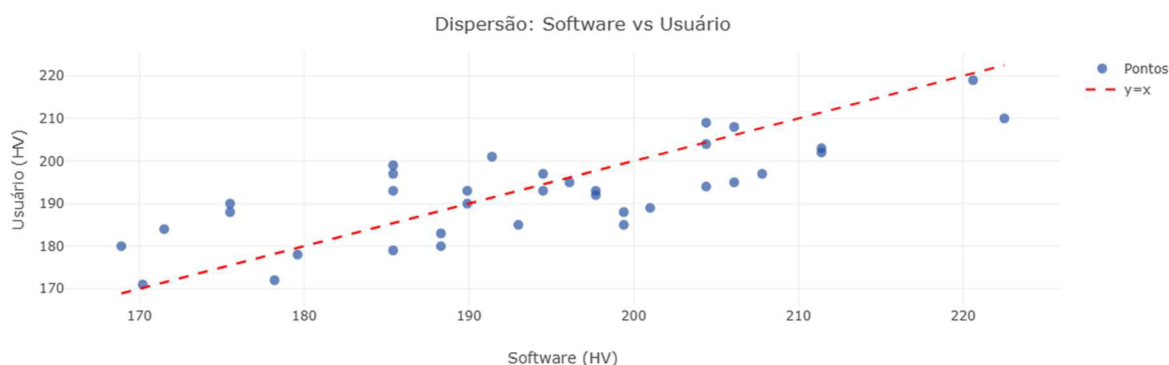
Tabela 4 - Resumo estatístico da Zona 1 (n=35).

Métrica	Valor
Média HV (Usuário) $\pm$ DP	192,5 $\pm$ 10,8 HV
Média HV (Software) $\pm$ DP	193,7 $\pm$ 13,6 AT
Diferença média (EUA) $\pm$ DP	-1,29 $\pm$ 8,6 HV
MAE RMSE	7,3 HV 8,6 HV
Correlação de Pearson (r)	0,773
Regressão (U vs S)	$y = 0,613 x + 73,71$
Métrica	Valor
Limites de concordância (LoA)	-18,3 a 15,7 HV
% dentro dos LoA	100%

Fonte: O próprio autor.

Podemos verificar um desvio-padrão de 8,6 HV, valor considerado aceitável. Identificou-se também uma diferença média de $-1,29$ HV, indicando excelente concordância, com um viés correspondente a aproximadamente 1% de erro. O erro médio absoluto (MAE) e o erro quadrático médio (RMSE) corresponderam a 4–5% do valor médio. A correlação de Pearson mostrou-se forte entre os métodos, embora não tão elevada quanto na análise geral, mas ainda suficiente para garantir confiabilidade e reprodutibilidade. O coeficiente de regressão (0,613) sugere uma leve tendência do usuário a subestimar os valores em relação ao software nos extremos mais altos; entretanto, o impacto prático dessa diferença é reduzido. Os limites de concordância atingiram 100%, porém com intervalo relativamente amplo ($-18,3$ a $15,7$ HV) e sem ocorrência de outliers. A análise pode ser complementada por inspeção visual do gráfico de dispersão apresentado na Figura 28

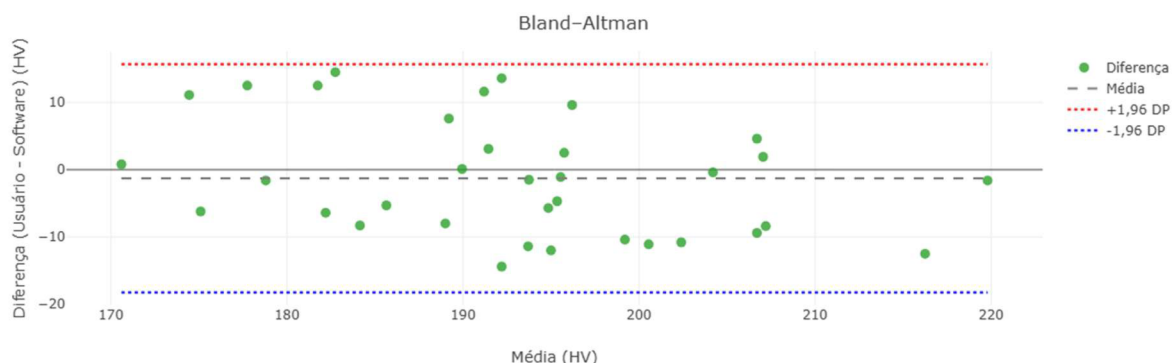
Figura 28 - Gráfico Zona 1 - Dispersão - Usuário x Software.



Fonte: O próprio autor.

Como podemos verificar no gráfico, não foram encontrados pontos de dispersão. A avaliação da concordância entre os métodos, específica para a Zona 1, vai ser avaliada pelo gráfico de Bland-Altman, conforme Figura 29.

Figura 29 - Gráfico Zona 1 - Bland Altman - Usuário x Software.



Fonte: O próprio autor.

Não foram identificados outliers, ou seja, nenhuma medição excedeu os limites de concordância estabelecidos em $\pm 1,96$ vezes o desvio-padrão.

4.2.2 ANÁLISE DETALHADA ZONA 2

A Zona 2 corresponde a 40 dos 95 pontos de impressões Vickers analisados na amostragem, sendo identificada como zona afetada pelo calor (ZAC). Nessa região, os gradientes e a heterogeneidade de fases aumentam levemente a variabilidade das medições e a probabilidade de ocorrência de outliers. A tabela com os pontos coletados pode ser consultada no Apêndice A, e o resultado completo encontra-se na Tabela 5.

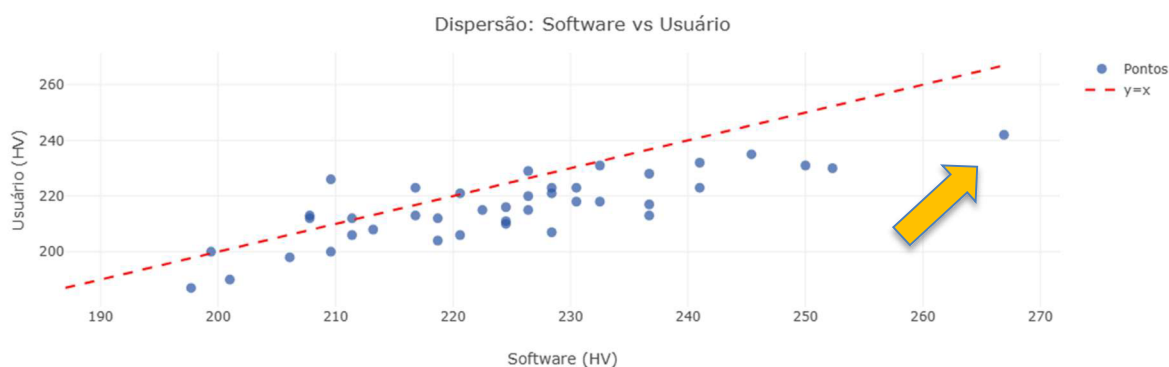
Tabela 5 - Resumo estatístico da Zona 2 (n=40).

Métrica	Valor
Média HV (Usuário) $\pm$ DP	216,0 $\pm$ 12,0 HV
Média HV (Software) $\pm$ DP	224,5 $\pm$ 15,1 HV
Diferença média (EUA) $\pm$ DP	-8,53 $\pm$ 8,86 HV
MAE RMSE	10,3 HV 12,2 HV
Correlação de Pearson (r)	0,809
Regressão (U vs S)	$y = 0,644x + 71,44$
Limites de concordância (LoA)	-25,9 a 8,8 HV
% dentro dos LoA	97,5%

Fonte: O próprio autor.

Foi observado um desvio-padrão de 8,86 HV, valor dentro do limite tolerável. Identificou-se também uma diferença média de $-8,86$ HV, indicando que o usuário tende a registrar valores inferiores aos do software, correspondendo a um erro relativo inferior a 5%. O erro médio absoluto (MAE) e o erro quadrático médio (RMSE) corresponderam a cerca de 5% do valor médio. A correlação de Pearson evidenciou forte associação linear entre os métodos. Os limites de concordância foram estimados em 97,5%, porém com intervalo relativamente amplo ($-25,9$ a $8,8$ HV), no qual foi identificado um outlier. A relação pode ainda ser analisada visualmente no gráfico de dispersão apresentado na Figura 30.

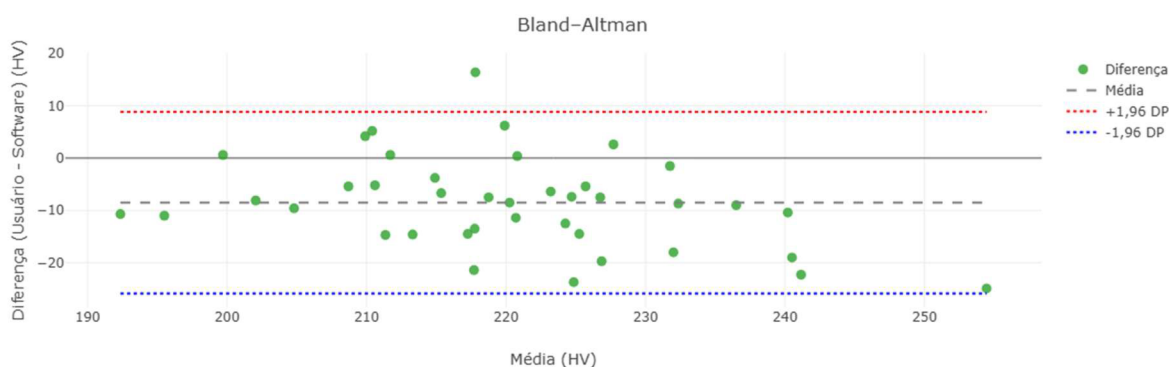
Figura 30 - Gráfico Zona 2 - Dispersão - Usuário x Software.



Fonte: O próprio autor.

Podemos verificar no gráfico no canto inferior a direita, um ponto de dispersão. A avaliação da concordância entre os métodos, específica para a Zona 2, vai ser avaliada pelo gráfico de Bland-Altman, conforme Figura 31.

Figura 31 - Gráfico Zona 2 - Bland Altman - Usuário x Software.



Fonte: O próprio autor.

A Zona 2, que representa a maior parte dos pontos de impressões 40 dos 95, apresentou um ponto de outlier. Esta zona termicamente afetada é uma zona de transição entre metal de base e a zona fundida, tendo maior incidência de outlier, portanto, está única outlier está associada a fatores específicos, como irregularidades locais na amostra devido a particularidades desta região ou até mesmo erro do usuário.

4.2.3 ANÁLISE DETALHADA ZONA 3

A Zona 3 corresponde a 20 dos 95 pontos de impressões analisados na amostragem, sendo identificada como zona fundida. Nessa região, a heterogeneidade é máxima, e discrepâncias localizadas tendem a ocorrer nas fronteiras de solidificação. A tabela com os pontos coletados pode ser consultada no Apêndice A, e o resultado completo encontra-se na Tabela 6.

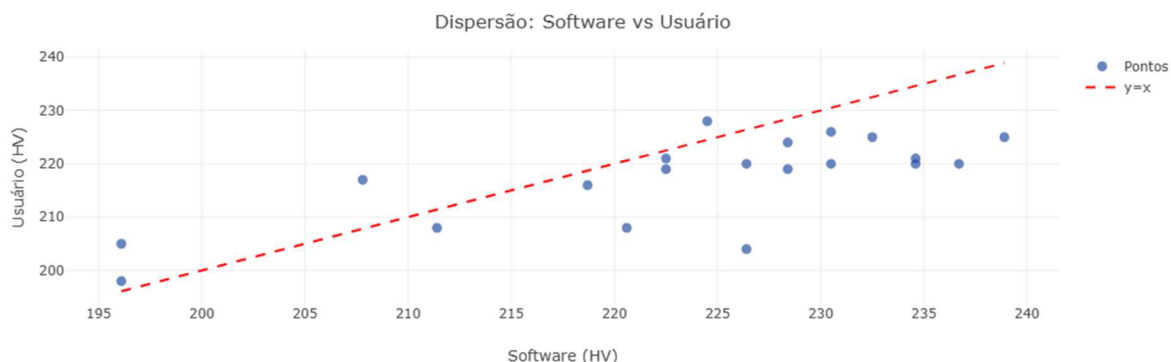
Tabela 6 - Resumo estatístico da Zona 3 (n=20).

Métrica	Valor
Média HV (Usuário) $\pm$ DP	217,2 $\pm$ 8,2 HV
Média HV (Software) $\pm$ DP	223,4 $\pm$ 12,2 HV
Diferença média (EUA) $\pm$ DP	-6,21 $\pm$ 9,42 HV
MAE RMSE	8,6 HV 10,2 HV
Correlação de Pearson (r)	74%
Regressão (U vs S)	$y = 0,497 x + 106,21$
Limites de concordância (LoA)	-22,5 a 10,1 HV
% dentro dos LoA	100%

Fonte: O próprio autor.

Podemos verificar um desvio padrão de 9,42 HV dentro do tolerável, também podemos verificar uma diferença média de -6,21 HV que demonstra que o usuário mede menos que o software, menos de 4% de erro. O erro médio absoluto (MAE) e erro quadrático médio (RMSE) representam 4% do valor médio. Correlação de Pearson forte associação linear. Os limites de concordância 100%, estão excelentes, sem identificação de outliers. Podemos analisar visualmente o gráfico de dispersão, conforme Figura 32.

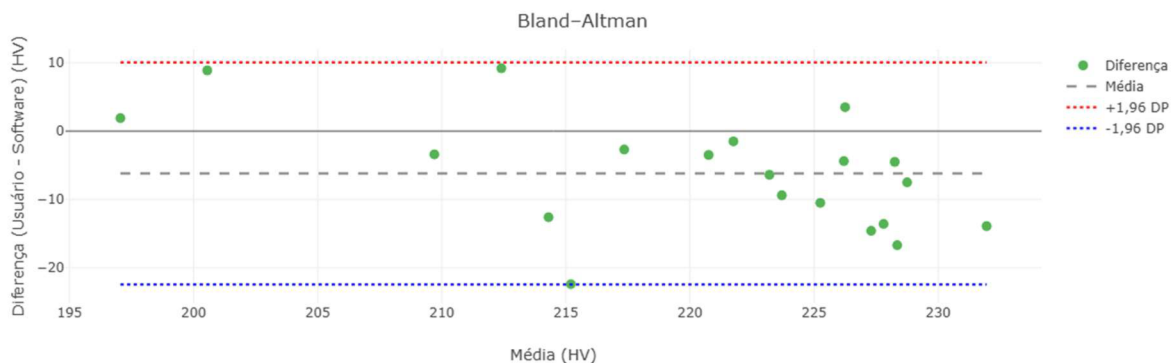
Figura 32 - Gráfico Zona 3 - Dispersão - Usuário x Software.



Fonte: O próprio autor.

Como podemos verificar no gráfico de dispersão da Figura 32, não foram encontrados pontos de dispersão. A avaliação da concordância entre os métodos, especifica para a Zona 1, vai ser avaliada pelo gráfico de Bland-Altman, conforme Figura 33.

Figura 33 - Gráfico Zona 3 - Bland Altman - Usuário x Software.



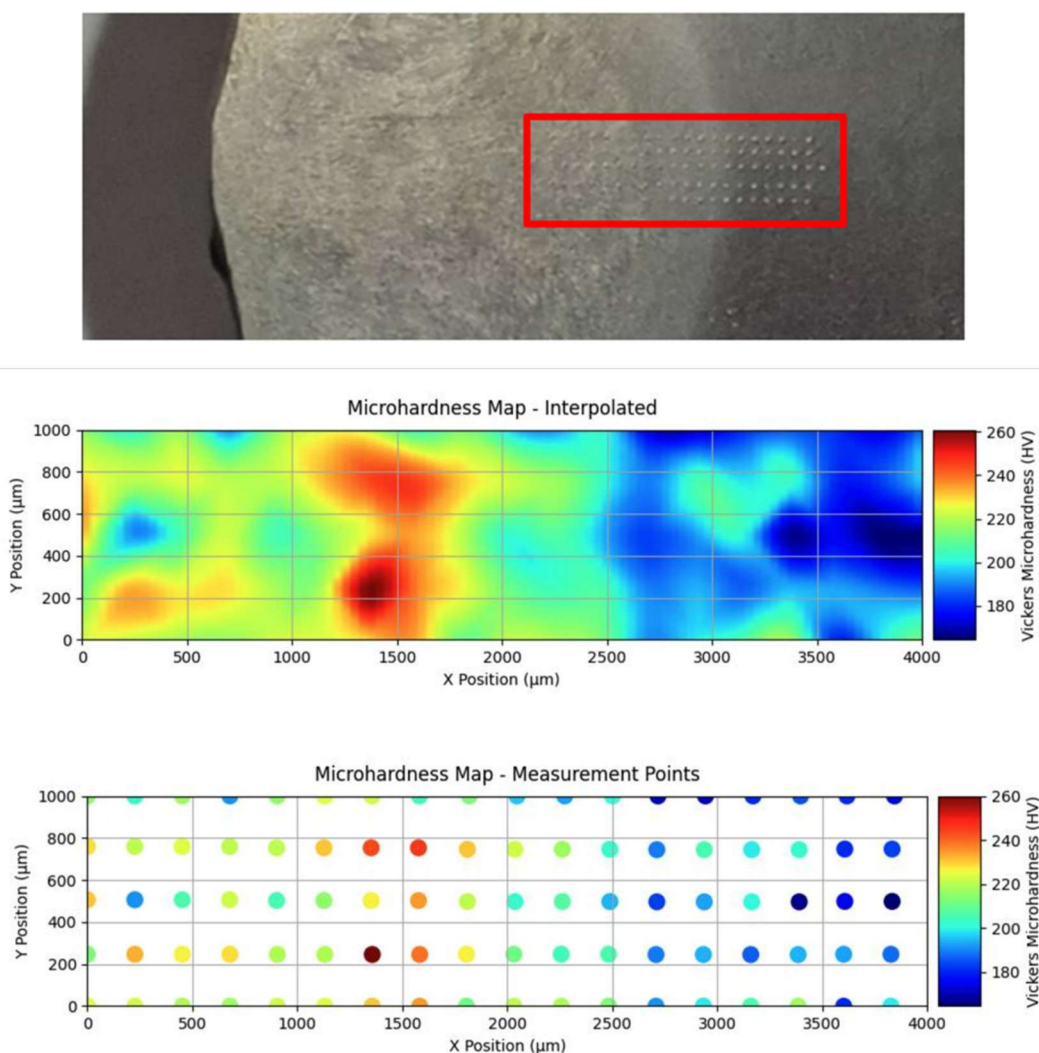
Fonte: O próprio autor.

A Zona 3 corresponde à menor fração dos pontos de impressões Vickers, totalizando 20 dos 95 analisados, e não apresentou outliers, mantendo-se dentro dos limites de concordância estabelecidos.

4.3 ANALISE DO MAPA DE CALOR

O mapa de calor é gerado pelo software e apresenta a amostragem completa, com as coordenadas e a distribuição de microdureza na amostra, considerando todas as zonas. Os resultados são produzidos a partir dos valores compilados pelo usuário no sistema. A Figura 34 ilustra a zona de amostragem com o mapa de calor e a interpolação obtidos automaticamente pelo software.

Figura 34 - Zona de Amostragem com Mapa e Interpolação.



Fonte: O próprio autor.

Nas regiões correspondentes ao metal de base e a zona fundida, a microdureza manteve-se dentro dos padrões esperados para esse material, devido à menor incidência de alterações microestruturais decorrentes do processo de soldagem.

A zona termicamente afetada, destacada em vermelho, apresentou os maiores valores de dureza, em especial um ponto com resultados elevados que destoou do conjunto representado no mapa de calor. A análise da interpolação indica que esse ponto funcionou como um “hotspot”, ou seja, pode estar potencialmente associado a erro de medição ou de posicionamento, condição superficial local, inclusão ou diferença de fase pontual, ou ainda à leitura do operador.

De modo geral, o uso do mapa de calor em conjunto com a interpolação evidencia a capacidade do software em captar nuances locais e padrões espaciais, algo difícil de visualizar apenas por meio de tabelas ou gráficos isolados.

5 CONCLUSÕES

A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir das análises realizadas:

- O software apresenta um ambiente intuitivo e de fácil manuseio, seguindo uma ordem padronizada para obtenção da microdureza.
- As rotinas de pré-processamento (remoção de artefatos, ajuste de contraste e calibração espacial) mostraram-se eficazes, garantindo imagens adequadas à detecção das impressões Vickers.
- As funcionalidades de calibração automática e manual asseguraram a correlação confiável entre pixel e micrômetro, incluindo a exclusão de barras de escala e elementos não pertinentes
- Os algoritmos de detecção automática identificaram com precisão as diagonais das impressões Vickers, reduzindo a interferência de ruído e variações de iluminação; a simplificação das bordas e o enquadramento retangular contribuíram para medições mais estáveis.
- A medição automática das diagonais e a rotulagem das impressões permitiram rastreabilidade completa (IDs, valores das diagonais e HV), facilitando a organização e auditoria dos resultados.
- Os perfis e mapas de microdureza gerados (Matplotlib) evidenciaram a distribuição espacial da dureza e destacaram variações associadas a regiões de transição (ZAC), sem indicar heterocedasticidade nos resíduos.
- Na validação frente às medições manuais realizadas pelo operador no microscópio Vickers, o software apresentou precisão e reprodutibilidade compatíveis com a prática laboratorial. Os cinco outliers identificados permaneceram dentro de limites estatisticamente aceitáveis e concentraram-se, em sua maioria, na ZAC, região caracterizada por maior heterogeneidade microestrutural.
- A documentação do código, do procedimento de uso e dos resultados garante reprodutibilidade e fornece base para melhorias futuras e adaptação a novos contextos laboratoriais.

Esses resultados reforçam que o software desenvolvido apresenta desempenho rápido, confiável e padronizado para o mapeamento automatizado de microdureza. Os outliers que foram localizados nas amostras, em ambas as análises das zonas, podem ser descartados conforme dados estatísticos, pois não impactaram na confiabilidade do software na detecção das impressões Vickers obtidas pelas imagens do microscópio do ensaio de dureza. Além disso, demonstram que a dispersão das diferenças estatísticas analisadas manteve-se dentro de uma faixa considerada aceitável para medições experimentais de microdureza Vickers, em que variações da ordem de 10–20 HV são comuns, mesmo entre leituras manuais realizadas por diferentes operadores. Dessa forma, a integração dos métodos de processamento de imagens ao ambiente Python possibilitou o desenvolvimento de uma ferramenta acessível, intuitiva e precisa para a análise de microdureza.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprimorar software para utilização em outros métodos de análise de dureza e realizar estudo comparativo com outros métodos de medição de bordas;
- Ampliar a realização de testes comparativos entre o software desenvolvido e ferramentas comerciais disponíveis no mercado.
- Desenvolver métodos de aprendizado de máquina (Machine learning) para aprimorar a calibração e a detecção de impressões Vickers das imagens com base nos históricos de projetos.
- Adicionar validações estatísticas automatizadas, acompanhadas de relatórios com os respectivos dados e indicadores.
- Estender a aplicação do software para outros métodos de análise de dureza, realizando estudos comparativos com técnicas alternativas de medição de bordas.

7 REFERÊNCIAS

- [1] AKINLABI, E. T.; OSINUBI, A. S.; MADUSHELE, N.; AKINLABI, S. A.; IKUMAPAYI, O. M. **Data on microhardness and structural analysis of friction stir spot welded lap joints of AA5083 H116**. Data in Brief, v. 33, p. 106585, 2020. Qualis: B2. Percentil Scopus: 97%.
- [2] AL GHWAINEM, A. **Impact of various remineralizing agents on artificial white spot lesion on primary teeth-A comparative study**. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, v. 15, n. S1, p. S426-S429, 2023. Qualis: B1. Percentil Scopus: -.
- [3] ASTM INTERNATIONAL. ASTM E384-17: **Standard test method for microindentation hardness of materials**. West Conshohocken: ASTM, 2017. Qualis: não se aplica. Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em: -. Acesso em: 15 ago. 2025.
- [4] ASTM INTERNATIONAL. ASTM E407: **Standard practice for microetching metals and alloys**. West Conshohocken: ASTM, [s.d.]. Qualis: não se aplica. Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em: -. Acesso em: 15 ago. 2025.
- [5] BERGMANN, P.; BATZNER, K.; FAUSER, M.; SATTLEGER, D.; STEGER, C. **MVTec AD: A comprehensive real-world dataset for unsupervised anomaly detection**. In: IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019. p. 9592-9600. Qualis: A1 (evento). Percentil Scopus: não se aplica.
- [6] BRADSKI, G. **The OpenCV library**. Dr. Dobb's Journal, 2000. Qualis: -. Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1692176>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- [7] BRAYSHAW, W. J.; ROY, M. J.; SUN, T.; AKRIVOS, V.; SHERRY, A. H. **Iterative mesh-based hardness mapping**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 22, p. 404-411, 2017. Qualis: A4. Percentil Scopus: 77%.
- [8] CÁCERES, C. H.; GRIFFITHS, J. R.; PAKDEL, A. R.; DAVIDSON, C. J. **Microhardness mapping and the hardness-yield strength relationship in high-**

pressure diecast magnesium alloy AZ91. Materials Science and Engineering: A, v. 402, p. 258-268, 2005. Qualis: A1. Percentil Scopus: 95%.

[9] CHEN, K.; WANG, J.; PANG, J.; et al. MMDetection: **Open MMLab detection toolbox and benchmark**. arXiv, 2019. Qualis: -. Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1906.07155>. Acesso em: 15 ago. 2025.

[10] CORTOPASSI, C. E. G.; CUNHA, M. L. A.; BARBOSA, V. S.; LEIVAS, M. M.; ALANO, J. H.; BIANCHI, K. E.; COSTA, H. L. **Effect of microalloying and thermomechanical treatment on the low-temperature fracture toughness of a high-strength weathering steel**. Journal of Materials Research and Technology, v. 36, p. 2033-2041, 2025. Qualis: A1. Percentil Scopus: 88%.

[11] DOMINGUEZ NICOLAS, S. M.; WIEDERHOLD, P. **Indentation image analysis for Vickers hardness testing**. In: International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2018. Qualis: A1 (evento). Percentil Scopus: não se aplica.

[12] GOUILLART, E.; NUNEZ IGLESIAS, J.; VAN DER WALT, S. **Analyzing microtomography data with Python and the scikit-image library**. Advanced Structural and Chemical Imaging, v. 2, p. 18, 2016. Qualis: B2. Percentil Scopus: 88%.

[13] GÜDER, H. S.; ŞAHİN, E.; ŞAHİN, O.; GÖÇMEZ, H.; DURAN, C.; ÇETINKARA, H. A. **Vickers and Knoop indentation microhardness study of β -SiAlON ceramic**. Acta Physica Polonica A, v. 120, n. 6, p. 1026-1033, 2011. Qualis: -. Percentil Scopus: 49%.

[14] HARRIS, C. R.; MILLMAN, K. J.; VAN DER WALT, S. J.; et al. **Array programming with NumPy**. Nature, v. 585, p. 357-362, 2020. Qualis: A1. Percentil Scopus: 98%.

[15] HOLZ, D.; PEDROZO, C.; ÉDER, C. **Utilização da biblioteca Tkinter na linguagem de programação Python para análise de vigas biapoiadas utilizando o método dos trabalhos virtuais**. Salão do Conhecimento, v. 10, n. 10, 2024. Qualis: -. Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em:

<https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/26185/24755>. Acesso em: 15 ago. 2025.

[16] HUNTER, J. D. **Matplotlib: A 2D graphics environment**. Computing in Science & Engineering, v. 9, n. 3, p. 90-95, 2007. Qualis: A1. Percentil Scopus: 60%.

[17] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 6507-1:2018 - Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method**.

Geneva: ISO, 2018. Qualis: não se aplica. Percentil Scopus: não se aplica.

Disponível em: -. Acesso em: 15 ago. 2025.

[18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 6507-2:2018 - Metallic materials - Vickers hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines**.

Geneva: ISO, 2018. Qualis: não se aplica.

Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em: -. Acesso em: 15 ago. 2025.

[19] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 6507-3:2018 - Metallic materials - Vickers hardness test - Part 3: Calibration of reference blocks**.

Geneva: ISO, 2018. Qualis: não se aplica. Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em: -. Acesso em: 15 ago. 2025.

[20] JEONG, T.-S.; PARK, J.-K.; KO, C.-C.; GARCIA-GODOY, F.; KWON, Y. H.

Difference assessment of composite resins and sound tooth applicable in the resin-imbedded tooth for resin repair using fluorescence, microhardness,

DIAGNOdent, and X-ray image. Clinical Oral Investigations, v. 23, n. 1, p. 293-301, 2019. Qualis: A1. Percentil Scopus: 80%.

[21] JOOPALLY, V.; KAUNDINYA, A.; RAO, A. **Image processing: Comparison and analysis of image formats**.

International Journal of Research in Applied Science and Engineering Technology, v. 11, p. 1379-1384, 2023. Qualis: -. Percentil Scopus: -. Disponível em: <https://www.ijraset.com/research-paper/image-processing-comparison-and-analysis-of-image-formats>. Acesso em: 15 ago. 2025.

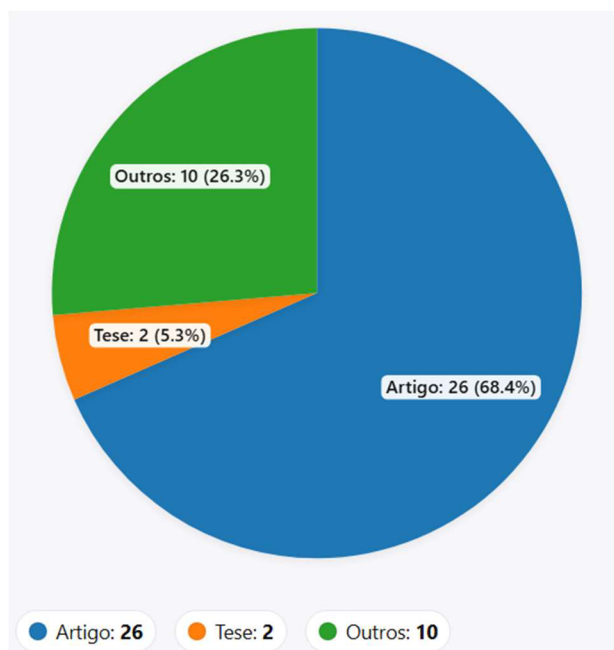
[22] LI, Z.; YIN, F. **Automated measurement of Vickers hardness using image segmentation with neural networks**. Measurement, v. 186, p. 110200, 2021.

Qualis: A1. Percentil Scopus: 82%.

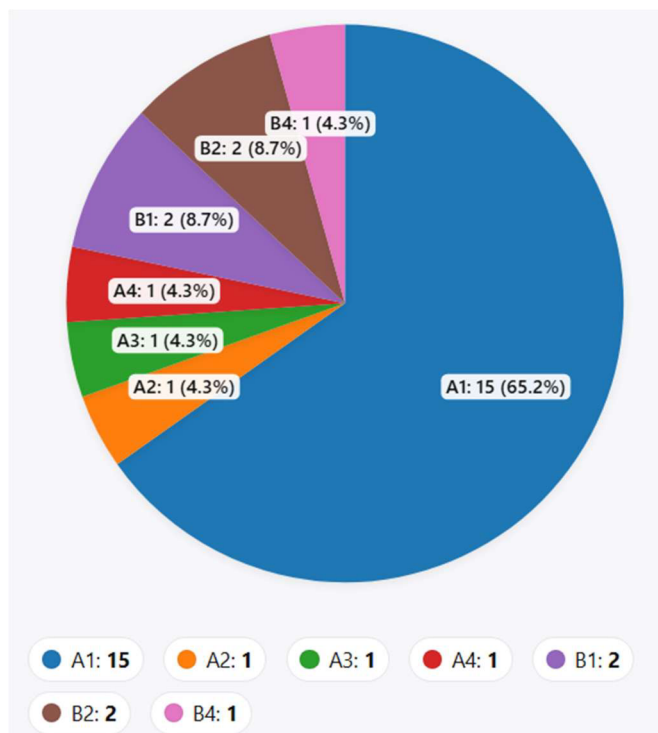
- [23] LIU, X.; CHANG, Y.-Y.; TKACHEV, S. N.; BINA, C. R.; JACOBSEN, S. D. **Elastic and mechanical softening in boron-doped diamond**. Scientific Reports, v. 7, p. 42921, 2017. Qualis: A1. Percentil Scopus: 67%.
- [24] MAMBUSCAY, C. L.; ORTEGA-PORTILLA, C.; PIAMBA, J. F.; FORERO, M. G. **Predictive modeling of Vickers hardness using machine learning techniques on D2 steel with various treatments**. Materials, v. 17, n. 10, p. 2235, 2024. Qualis: A1. Percentil Scopus: 91%.
- [25] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009. Qualis: não se aplica. Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em: -. Acesso em: 15 ago. 2025.
- [26] MCQUIN, C.; GOODMAN, A.; CHERNYSHEV, V.; et al. CellProfiler 3.0: **Next-generation image processing for biology**. PLOS Biology, v. 16, n. 7, p. e2005970, 2018. Qualis: A1. Percentil Scopus: -.
- [27] POLANCO, J. D.; JACANAMEJOY-JAMIOY, C.; MAMBUSCAY, C. L.; PIAMBA, J. F.; FORERO, M. G. **Automatic method for Vickers hardness estimation by image processing**. Journal of Imaging, v. 9, n. 1, p. 8, 2023. Qualis: A1. Percentil Scopus: -.
- [28] ROHDE, R. A. **Metalografia: preparação de amostras - uma abordagem prática**. Belo Horizonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais (LEMM/URI), 2010. Qualis: não se aplica. Percentil Scopus: não se aplica. Disponível em: <http://www.urisan.tche.br/~lemm>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- [29] SAE INTERNATIONAL. **SAE J403: Chemical compositions of SAE carbon steels**. Warrendale: SAE International, 2023. Qualis: não se aplica. Percentil Scopus: não se aplica.
- [30] SHARKEY, J. P.; FOO, D. C. W.; KABLA, A.; BAUMBERG, J. J.; BOWMAN, R. W. **A one-piece printable flexure translation stage for open-source microscopy**. PLoS ONE, v. 11, n. 5, p. e0154399, 2016. Qualis: A3. Percentil Scopus: 79%.

- [31] STUS, N. V.; DUB, S. N.; STRATIYCHUK, D. A.; LISNYAK, V. V. **The mechanical properties of KTiOPO₄ single crystals**. Journal of Alloys and Compounds, v. 366, p. L13-L15, 2004. Qualis: B1. Percentil Scopus: -.
- [32] SYSYN, M.; GERBER, U.; NABOCHENKO, O.; GRUEN, D.; KLUGE, F. **Prediction of rail contact fatigue on crossings using image processing and machine learning methods**. Urban Rail Transit, v. 5, n. 2, p. 123-132, 2019. Qualis: -. Percentil Scopus: 78%.
- [33] VAN DER WALT, S.; SCHÖNBERGER, J. L.; NUNEZ IGLESIAS, J.; et al. **scikit-image: Image processing in Python**. PeerJ, v. 2, p. e453, 2014. Qualis: A2. Percentil Scopus: -.
- [34] VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; et al. **SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python**. Nature Methods, v. 17, p. 261-272, 2020. Qualis: A1. Percentil Scopus: 71%.
- [35] YOU, D.; GAO, X.; KATAYAMA, S. **Monitoring of high-power laser welding using high-speed photographing and image processing**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 49, n. 1-2, p. 39-52, 2014. Qualis: -. Percentil Scopus: -.
- [36] ZHANG, X.; ZHANG, C.; LI, Y.; WU, Z.; LI, J.; GE, Q. **Research on fast nanoindentation technology to analyze the non-homogeneity of IF steel**. Metals, v. 14, p. 1429, 2024. Qualis: B4. Percentil Scopus: 93%.
- [37] LI, Z.; YAN, Y.; WANG, X.; GE, Y.; MENG, L. **A survey of deep learning-based industrial defect detection**. Artificial Intelligence Review, v. 58, art. 279, 2024. Qualis: A1. Percentil Scopus: 89%.
- [38] ZHAO, Y. J.; XU, W. H.; XI, C. Z.; LIANG, D. T.; LI, H. N. **Automatic and accurate measurement of microhardness profile based on image processing**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 70, p. 1-9, 2021. Qualis: A1. Percentil Scopus: -.

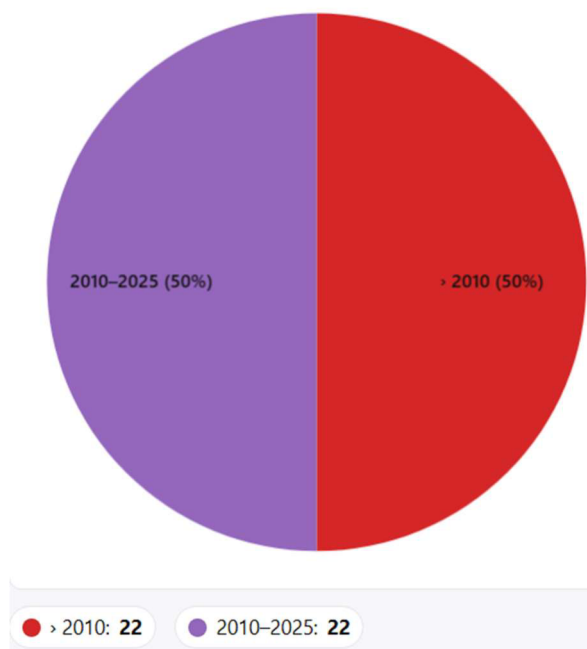
7.1 REFERÊNCIAS POR ESTRATO



7.2 REFERÊNCIAS POR QUALIS



7.3 REFERÊNCIAS POR DATA DOS ARTIGOS



8 APÊNDICE A

Tabela 7 - Estatística Global (n=95).

(Continua)

Ponto	Usuário	Software	Média	Diferença (Usuário - Software)	Outliers
1	216,0	218,7	217,35	-2,70	
2	225,0	238,9	231,95	-13,90	
3	225,0	232,5	228,75	-7,50	
4	220,0	234,6	227,30	-14,60	
5	220,0	230,5	225,25	-10,50	
6	224,0	228,4	226,20	-4,40	
7	228,0	224,5	226,25	3,50	
8	221,0	222,5	221,75	-1,50	
9	210,0	224,5	217,25	-14,50	
10	211,0	224,5	217,75	-13,50	
11	242,0	266,9	254,45	-24,90	Sim
12	235,0	245,4	240,20	-10,40	
13	207,0	228,4	217,70	-21,40	
14	218,0	230,5	224,25	-12,50	
15	228,0	236,7	232,35	-8,70	
16	223,0	241,0	232,00	-18,00	
17	231,0	232,5	231,75	-1,50	
18	213,0	216,8	214,90	-3,80	
19	200,0	209,6	204,80	-9,60	
20	206,0	211,4	208,70	-5,40	
21	223,0	216,8	219,90	6,20	
22	220,0	226,4	223,20	-6,40	
23	216,0	224,5	220,25	-8,50	
24	212,0	218,7	215,35	-6,70	
25	197,0	194,5	195,75	2,50	
26	188,0	199,4	193,70	-11,40	
27	201,0	191,4	196,20	9,60	
28	185,0	199,4	192,20	-14,40	
29	195,0	196,1	195,55	-1,10	
30	204,0	204,4	204,20	-0,40	
31	203,0	211,4	207,20	-8,40	

(Continua)

Ponto	Usuário	Software	Média	Diferença (Usuário - Software)	Ponto
32	210,0	222,5	216,25	-12,50	
33	192,0	197,7	194,85	-5,70	
34	185,0	193,0	189,00	-8,00	
35	190,0	189,9	189,95	0,10	
36	197,0	185,4	191,20	11,60	
37	194,0	204,4	199,20	-10,40	
38	219,0	220,6	219,80	-1,60	
39	221,0	234,6	227,80	-13,60	
40	220,0	226,4	223,20	-6,40	
41	226,0	230,5	228,25	-4,50	
42	204,0	226,4	215,20	-22,40	
43	220,0	236,7	228,35	-16,70	
44	198,0	196,1	197,05	1,90	
45	208,0	211,4	209,70	-3,40	
46	219,0	228,4	223,70	-9,40	
47	215,0	226,4	220,70	-11,40	
48	213,0	236,7	224,85	-23,70	Sim
49	231,0	250,0	240,50	-19,00	
50	230,0	252,3	241,15	-22,30	
51	212,0	211,4	211,70	0,60	
52	221,0	220,6	220,80	0,40	
53	218,0	232,5	225,25	-14,50	
54	232,0	241,0	236,50	-9,00	
55	217,0	236,7	226,85	-19,70	
56	223,0	228,4	225,70	-5,40	
57	215,0	222,5	218,75	-7,50	
58	213,0	207,8	210,40	5,20	
59	229,0	226,4	227,70	2,60	
60	212,0	207,8	209,90	4,20	
61	208,0	213,2	210,60	-5,20	
62	200,0	199,4	199,70	0,60	
63	193,0	194,5	193,75	-1,50	
64	202,0	211,4	206,70	-9,40	
65	209,0	204,4	206,70	4,60	
66	197,0	207,8	202,40	-10,80	
67	180,0	188,3	184,15	-8,30	

(Conclusão)

Ponto	Usuário	Software	Média	Diferença (Usuário - Software)	Ponto
68	193,0	197,7	195,35	-4,70	
69	195,0	206,1	200,55	-11,10	
70	184,0	171,5	177,75	12,50	
71	193,0	185,4	189,20	7,60	
72	183,0	188,3	185,65	-5,30	
73	208,0	206,1	207,05	1,90	
74	178,0	179,6	178,80	-1,60	
75	180,0	168,9	174,45	11,10	
76	171,0	170,2	170,60	0,80	
77	208,0	220,6	214,30	-12,60	
78	217,0	207,8	212,40	9,20	
79	219,0	222,5	220,75	-3,50	
80	205,0	196,1	200,55	8,90	
81	206,0	220,6	213,30	-14,60	
82	223,0	230,5	226,75	-7,50	
83	221,0	228,4	224,70	-7,40	
84	226,0	209,6	217,80	16,40	Sim
85	204,0	218,7	211,35	-14,70	
86	190,0	201,0	195,50	-11,00	
87	187,0	197,7	192,35	-10,70	
88	198,0	206,1	202,05	-8,10	
89	188,0	175,5	181,75	12,50	
90	190,0	175,5	182,75	14,50	Sim
91	199,0	185,4	192,20	13,60	Sim
92	193,0	189,9	191,45	3,10	
93	179,0	185,4	182,20	-6,40	
94	172,0	178,2	175,10	-6,20	
95	189,0	201,0	195,00	-12,00	

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 8 - Estatística Detalhada - Dados Zona 1 (n=35).

(Continua)

Ponto	Usuário	Software	Média	Diferença (Usuário - Software)	Outliers
25	197,0	194,5	195,75	2,50	
26	188,0	199,4	193,70	-11,40	
27	201,0	191,4	196,20	9,60	
28	185,0	199,4	192,20	-14,40	
29	195,0	196,1	195,55	-1,10	
30	204,0	204,4	204,20	-0,40	
31	203,0	211,4	207,20	-8,40	
32	210,0	222,5	216,25	-12,50	
33	192,0	197,7	194,85	-5,70	
34	185,0	193,0	189,00	-8,00	
35	190,0	189,9	189,95	0,10	
36	197,0	185,4	191,20	11,60	
37	194,0	204,4	199,20	-10,40	
38	219,0	220,6	219,80	-1,60	
63	193,0	194,5	193,75	-1,50	
64	202,0	211,4	206,70	-9,40	
65	209,0	204,4	206,70	4,60	
66	197,0	207,8	202,40	-10,80	
67	180,0	188,3	184,15	-8,30	
68	193,0	197,7	195,35	-4,70	
69	195,0	206,1	200,55	-11,10	
70	184,0	171,5	177,75	12,50	
71	193,0	185,4	189,20	7,60	
72	183,0	188,3	185,65	-5,30	
73	208,0	206,1	207,05	1,90	
74	178,0	179,6	178,80	-1,60	
75	180,0	168,9	174,45	11,10	
76	171,0	170,2	170,60	0,80	
89	188,0	175,5	181,75	12,50	
90	190,0	175,5	182,75	14,50	
91	199,0	185,4	192,20	13,60	
92	193,0	189,9	191,45	3,10	
93	179,0	185,4	182,20	-6,40	
94	172,0	178,2	175,10	-6,20	

(Conclusão)

Ponto	Usuário	Software	Média	Diferença (Usuário - Software)	Outliers
95	189,0	201,0	195,00	-12,00	

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 9 - Estatística Detalhada - Dados Zona 2 (n=40).

(Continua)

Ponto	Usuário	Software	Média	Diferença (Usuário - Software)	Outliers
9	210,0	224,5	217,25	-14,50	
10	211,0	224,5	217,75	-13,50	
11	242,0	266,9	254,45	-24,90	
12	235,0	245,4	240,20	-10,40	
13	207,0	228,4	217,70	-21,40	
14	218,0	230,5	224,25	-12,50	
15	228,0	236,7	232,35	-8,70	
16	223,0	241,0	232,00	-18,00	
17	231,0	232,5	231,75	-1,50	
18	213,0	216,8	214,90	-3,80	
19	200,0	209,6	204,80	-9,60	
20	206,0	211,4	208,70	-5,40	
21	223,0	216,8	219,90	6,20	
22	220,0	226,4	223,20	-6,40	
23	216,0	224,5	220,25	-8,50	
24	212,0	218,7	215,35	-6,70	
47	215,0	226,4	220,70	-11,40	
48	213,0	236,7	224,85	-23,70	
49	231,0	250,0	240,50	-19,00	
50	230,0	252,3	241,15	-22,30	
51	212,0	211,4	211,70	0,60	
52	221,0	220,6	220,80	0,40	
53	218,0	232,5	225,25	-14,50	
54	232,0	241,0	236,50	-9,00	
55	217,0	236,7	226,85	-19,70	
56	223,0	228,4	225,70	-5,40	
57	215,0	222,5	218,75	-7,50	
58	213,0	207,8	210,40	5,20	
59	229,0	226,4	227,70	2,60	
60	212,0	207,8	209,90	4,20	
61	208,0	213,2	210,60	-5,20	
62	200,0	199,4	199,70	0,60	
81	206,0	220,6	213,30	-14,60	
82	223,0	230,5	226,75	-7,50	

(Conclusão)

Ponto	Usuário	Software	Média	Diferença (Usuário - Software)	Outliers
83	221,0	228,4	224,70	-7,40	Sim
84	226,0	209,6	217,80	16,40	
85	204,0	218,7	211,35	-14,70	
86	190,0	201,0	195,50	-11,00	
87	187,0	197,7	192,35	-10,70	
88	198,0	206,1	202,05	-8,10	

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 10 - Estatística Detalhada - Dados Zona 3 (n=20).

Ponto	Usuário	Software	Média	Diferença (Usuário - Software)	Outliers
1	216,0	218,7	217,35	-2,70	
2	225,0	238,9	231,95	-13,90	
3	225,0	232,5	228,75	-7,50	
4	220,0	234,6	227,30	-14,60	
5	220,0	230,5	225,25	-10,50	
6	224,0	228,4	226,20	-4,40	
7	228,0	224,5	226,25	3,50	
8	221,0	222,5	221,75	-1,50	
39	221,0	234,6	227,80	-13,60	
40	220,0	226,4	223,20	-6,40	
41	226,0	230,5	228,25	-4,50	
42	204,0	226,4	215,20	-22,40	
43	220,0	236,7	228,35	-16,70	
44	198,0	196,1	197,05	1,90	
45	208,0	211,4	209,70	-3,40	
46	219,0	228,4	223,70	-9,40	
77	208,0	220,6	214,30	-12,60	
78	217,0	207,8	212,40	9,20	
79	219,0	222,5	220,75	-3,50	
80	205,0	196,1	200,55	8,90	

Fonte: Próprio Autor.