UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

David Lelis Filho

MEDIÇÃO DE DESGASTE DE INSERTO DE USINAGEM IN LOCO UTILIZANDO UM SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL

Belo Horizonte
2024

David Lelis Filho

MEDIÇÃO DE DESGASTE DE INSERTO DE USINAGEM IN LOCO UTILIZANDO UM SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e Sistemas

Linha de pesquisa: Mecatrônica

Orientador(a): Antônio Augusto Torres Maia
Coorientador(a): Pedro Bastos Costa

Belo Horizonte

2024

Lelis Filho, David.

L541m Medição de desgaste de inserto de usinagem in loco utilizando um sistema de visão computacional [recurso eletrônico] / David Lelis Filho - 2024.

1 recurso online (88 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Antônio Augusto Torres Maia.
Coorientador: Pedro Bastos Costa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 77-88.

Bibliografia: f. 73-77.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Engenharia econômica - Teses. 3. Custo-benefício - Teses. 4. Medição - Teses. 5. Desgaste mecânico - Teses. 6. Usinagem - Teses. 7. Visão por computador – Teses. 8. Sistemas embutidos de computador - Teses. I. Maia, Antônio Augusto Torres. II. Costa, Pedro Bastos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621 (043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHERIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

“MEDIÇÃO DE DESGASTE DE INSERTO DE USINAGEM IN LOCO UTILIZANDO UM SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL”

DAVID LELIS FILHO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Antônio Augusto Torres Maia (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Pedro Bastos Costa (Coorientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Alexandre Mendes Abrão (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Ricardo Poley Martins Ferreira (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Mestre em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Projeto e Sistemas”.**

Dissertação aprovada no dia 19 de julho de 2024.

Por:

Documento assinado eletronicamente por **Antonio Augusto Torres Maia**, **Professor do Magistério Superior**, em 26/07/2024, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Poley Martins Ferreira**, **Professor do Magistério Superior**, em 28/07/2024, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Pedro Bastos Costa**, **Professor do Magistério Superior**, em 29/07/2024, às 13:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mendes Abrao**, **Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 29/07/2024, às 13:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3364112** e o código CRC **B4794DE6**.

Em memória da minha mãe Lucia, minha irmã Daniela e meu pai David

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Antônio Augusto Torres Maia e coorientador Pedro Bastos Costa, pelos incentivos, instruções e ajuda durante cada etapa da pesquisa.

Ao técnico Edson e estudantes membros do Laboratório de Automação e Controle, por todo o suporte.

À minha família por todo apoio, principalmente no início da minha estadia em BH.

À minha namorada Camily, que está comigo me incentivando desde o início dessa jornada.

Aos meus amigos (com destaque ao Gabriel), pelo companheirismo e momentos de descontração.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (Processo nº 88887.699743/2022-00 do programa DS).

RESUMO

A usinagem desempenha um papel crucial na fabricação, envolvendo a remoção de material para dar forma, dimensões e acabamento desejado aos produtos. Um obstáculo para aumentar a produtividade na usinagem é o tempo de inatividade gerado por interrupções planejadas e não planejadas, com destaque para a substituição de ferramentas de corte desgastadas ou com falhas prematuras. Estudos mostram que essas interrupções podem representar uma parcela considerável do tempo total de produção das máquinas-ferramenta. Para diminuir estes efeitos, técnicas de visão computacional têm sido utilizadas para acompanhar a evolução do desgaste da ferramenta. No entanto, tradicionalmente, a aplicação destas técnicas é realizada com a máquina parada o que afeta o tempo de produção. O presente trabalho propõe a construção de um sistema de visão computacional de baixo custo para medir o desgaste de flanco de insertos de usinagem in loco e compara dois métodos de iluminação distintos, um que utiliza somente uma imagem do inserto e outro que utiliza uma combinação de três imagens. Todos os procedimentos envolvidos desde a aquisição da imagem até a determinação do desgaste são feitos utilizando um sistema dedicado de baixo custo (Raspberry Pi e câmera module v2). O firmware foi desenvolvido utilizando linguagem de programação e bibliotecas de código aberto (Python). O sistema foi validado por meio de ensaios em bancada e na área de trabalho de um centro de usinagem. Foi realizada a medição de desgaste em diferentes tipos de insertos e por meio do teste de erro normalizado comparou-se os resultados do sistema proposto com medições realizadas utilizando um microscópio óptico. Os resultados mostraram que o método que utiliza a combinação de três imagens do inserto é a mais favorável, com uma taxa de acertos de 100% para as medições de desgaste de flanco médio e 92% para as medições de desgaste de flanco máximo nos ensaios no centro de usinagem.

Palavras-chave: medição de desgaste; visão computacional; usinagem; medição in loco; baixo custo; sistema embarcado.

ABSTRACT

Machining plays an important role in manufacturing, involving the removal of material to give the desired shape, dimensions and finish to products. An obstacle to the increase of productivity in machining is the downtime generated by planned and unplanned interruptions, particularly the replacement of worn or prematurely failed cutting tools, which can represent a considerable portion of the total production time. To reduce these effects, computer vision techniques have been used to monitor the evolution of tool wear. However, traditionally, the application of these techniques are carried out with the machine stopped, which affects production time. The present work proposes the construction of a low-cost computer vision system to measure the flank wear of milling inserts in loco and compare two different lighting methods, one that uses only one image of the insert and the other that uses a combination of three images. All procedures involving from image acquisition to wear determination are performed using a dedicated low-cost system (Raspberry Pi and camera module v2). The firmware was developed using open source programming language and libraries (Python). The system was validated through bench tests and in a machining center. Tool wear measurement were carried out on different types of inserts and compared the results of the proposed system with measurements carried out using an optical microscope, through the normalized error test. The results showed that the method that uses the combination of three images of the insert is the most advantageous, with a success rate of 100% for average flank wear and 92% for maximum flank wear in the tests conducted in the machining center.

Keywords: flank wear; computer vision; machining; in loco measurement; low cost; embedded system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Parâmetros geométricos do desgaste.....21
Figura 2.2 – Exemplo de aplicação do filtro gaussiano, sendo a primeira imagem sem aplicação do filtro, a segunda com aplicação utilizando um núcleo de tamanho 21 × 21 e a terceira com aplicação utilizando um núcleo de tamanho 45 × 45.....28
Figura 2.3 – Exemplo de aplicação do filtro da mediana para redução do ruído impulsivo, sendo a primeira imagem corrompida pelo ruído impulsivo, a segunda com aplicação do filtro gaussiano utilizando um núcleo de tamanho 19 × 19 e a terceira com aplicação do filtro da mediana utilizando um núcleo de tamanho 7 × 7.....29
Figura 2.4 – Esquemático da atuação do filtro da mediana.....30
Figura 2.5 – Comparação entre filtros passa-alta.....31
Figura 2.6 – Exemplo de aplicação do filtro homomórfico, sendo a imagem da esquerda a original e a da direita a imagem com o filtro aplicado.....33
Figura 2.7 – Exemplo da aplicação da equalização de histograma, em que as imagens da esquerda são antes da aplicação da equalização de histograma e as imagens da direita depois da aplicação.....34
Figura 2.8 – a) imagem original, b) exemplo da aplicação de dilatação e c) exemplo da aplicação de erosão.....35
Figura 3.1 – a) Esquemático do sistema proposto e b) sistema montado.....40
Figura 3.2 – Insertos utilizados e sua numeração correspondente.....41
Figura 3.3 – Sequência de capturas do segundo método de iluminação.....42
Figura 3.4 – Esquemático do funcionamento do sistema proposto.....43
Figura 3.5 – Captura de imagem da malha de círculos.....43
Figura 3.6 – Sequência de processamento da imagem.....44
Figura 3.7 – a) Imagem original do inserto 6-A com distorções de lente compensadas, b) imagem em escala cinza e c) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem.....45
Figura 3.8 – a) Imagem após aplicação do filtro homomórfico, b) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem e c) exemplo do resultado se o filtro homomórfico não fosse utilizado.....45
Figura 3.9 – a) Imagem após aplicação do filtro de realce de contraste, b) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem e c) exemplo do resultado se o filtro de realce do contraste não fosse utilizado.....46
Figura 3.10 – a) Imagem após aplicação do filtro da mediana, b) exemplo de filtro Canny

aplicado na imagem e c) exemplo do resultado se o filtro da mediana não fosse utilizado..... .46
Figura 3.11 – a) Imagem após aplicação do filtro gaussiano, b) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem e c) exemplo do resultado se o filtro gaussiano não fosse utilizado..... .47
Figura 3.12 – Contorno final após aplicação do filtro Canny e remoção de pequenas linhas.47
Figura 3.13 – Esquemático do programa utilizado para recorte da ponta da ferramenta na imagem capturada.....48
Figura 3.14 – Esquemático de como o código desenvolvido realiza as medições de distância vertical entre as linhas de contorno do desgaste.....49
Figura 4.1 – Gráfico que representa a distorção radial para os coeficientes calculados no ensaio na bancada (azul) e no ensaio no centro de usinagem (vermelho)..... .53
Figura 4.2 – a) Malha quadriculada sem distorção, b) malha quadriculada com compensação de distorção utilizando coeficientes calculados no ensaio de bancada e c) malha quadriculada com compensação de distorção utilizando coeficientes calculados no ensaio no centro de usinagem.....53
Figura 4.3 – Resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem para desgaste de flanco médio (VB_B) das arestas de corte primárias..... .56
Figura 4.4 – Resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem para desgaste de flanco médio ($VB_{MÁX}$) das arestas de corte primárias..... .57
Figura 4.5 – Resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem para desgaste de flanco médio (VB_B) das arestas de corte secundárias.....58
Figura 4.6 – Resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem para desgaste de flanco máximo ($VB_{MÁX}$) das arestas de corte secundárias.....59
Figura 4.7 – Comparação entre as taxas de acertos para os diferentes tipos de iluminação testados no ensaio no centro de usinagem.....60
Figura 4.8 – Imagens do inserto 3-B utilizadas na obtenção do desgaste de flanco, para os níveis três (a esquerda) e seis (a direita) de iluminação..... .62
Figura 4.9 – Comparação entre as taxas de acertos para os diferentes tipos de iluminação testados no ensaio na bancada..... .63
Figura 4.10 – Captura do inserto 4-A no centro de usinagem a) com iluminação de intensidade 1, b) com iluminação de intensidade 6 e c) na bancada com iluminação de intensidade 6.....64
Figura 4.11 – Comparação entre a quantidade de desgaste identificado por cada método para o

ensaio no centro de usinagem.....65
Figura 4.12 – Imagem resultante da medição do desgaste dos insertos a) 12-A e b) 5-C.....66
Figura 4.13 – Imagem resultante da medição do desgaste dos insertos a) 6-A e b) 6-C.....66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Síntese de autores que utilizaram sistema de visão computacional para análise de desgaste de ferramentas de usinagem.....23
Tabela 4.1 – Coeficientes de distorção calculados.....52
Tabela 4.2 – Resultados de medição obtidos através do microscópio óptico.....54
Tabela 4.3 – Resultados do desgaste de flanco médio (VB_B) e máximo ($VB_{MÁX}$) obtidos no ensaio de bancada utilizando o primeiro método de iluminação.....61
Tabela 4.4 – Resultados obtidos no ensaio de bancada utilizando o segundo método de iluminação.....63
Tabela 4.5 – Resultados para os tempos de execução em cada etapa.....67
Tabela 4.6 – Erro relativo e diferença em milímetros para $VB_{MÁX}$ e VB_B das medições realizadas no centro de usinagem utilizando o segundo método de iluminação.....68
Tabela 4.7 – Comparação entre custo dos equipamentos.....69
Tabela A.1 – Resultados do desgaste de flanco máximo ($VB_{MÁX}$) obtidos no ensaio do centro de usinagem utilizando o primeiro método de iluminação.....77
Tabela A.2 – Resultados do desgaste de flanco médio (VB_B) obtidos no ensaio do centro de usinagem utilizando o primeiro método de iluminação.....77
Tabela A.3 – Resultados do desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de flanco máximo ($VB_{MÁX}$) obtidos no ensaio do centro de usinagem utilizando o segundo método de iluminação.....78
Tabela A.4 – Resultados do erro relativo entre as medições do microscópio e do ensaio de bancada.....78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCD	Dispositivo de carga acoplado
CMOS	Metal-Óxido-Semicondutor Complementar
CNC	Controle Numérico Computadorizado
IA	Inteligência Artificial
ISO	Organização Internacional de Padronização
LED	Diodo emissor de luz
OpenCV	Biblioteca de visão computacional de código aberto
PLA	Ácido polilático
RAM	Memória de acesso aleatório
RGB	Vermelho, Verde e Azul
USB	Barramento serial universal

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Metade da largura do intervalo em que o valor de X_i está contido
c_x	Centro óptico em x
c_y	Centro óptico em y
D	Desgaste de flanco em pixels
E_n	Erro normalizado
f_x	Distância focal em x
f_y	Distância focal em y
F	Largura de flanco
G	Gradiente
G_C	Gradiente das colunas de pixels
G_L	Gradiente das linhas de pixels
i	Quantidade de linhas de pixels
j	Quantidade de colunas de pixels da imagem
K	Matriz de parâmetros intrínsecos
k	Fator de abrangência
k	Coeficiente de distorção radial
n	Número de leituras
p	Coeficiente de distorção tangencial
Px	Fator de escala do sistema
r	Raio dado pelas posições de x e y
r_ε	Raio de ponta da ferramenta
s	Coeficiente de inclinação
s	Desvio padrão amostral
TP	Tamanho de pixel
U	Incerteza expandida
$u(x_i)$	Incerteza-padrão
$u(x_i)_{RET}$	Incerteza-padrão para uma distribuição retangular
u(Y)	Incerteza-padrão combinada
U_{calc}	Incerteza expandida do resultado calculado
U_{ref}	Incerteza expandida do resultado de referência
V_B	Desgaste de flanco médio
V_{bmax}	Desgaste de flanco máximo

x	Posição no eixo x
X_{calc}	Resultado calculado
x_d	Posição em x com distorção
x_i	Estimativa de uma medição
X_i	Valor de entrada de uma medição
X_{ref}	Resultado de referência
y	Posição no eixo y
y_d	Posição em y com distorção
δD	Incerteza do desgaste de flanco em pixels
δTP	Incerteza do tamanho de pixel
σ_x	Desvio-padrão em x
σ_y	Desvio-padrão em y

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 Objetivos 18

1.2 Contribuições da pesquisa 18

1.3 Estrutura da dissertação 19

2 REVISÃO DE LITERATURA 20

2.1 Medição de desgaste de inserto de usinagem por imagem 20

2.2 Processo de aquisição de imagens 24

2.3 Calibração de lentes 25

2.4 Métodos de pré-processamento de imagens 27

2.4.1 Filtros de suavização de imagens 28

2.4.2 Filtros de acentuação de bordas 30

2.4.3 Filtro homomórfico 32

2.4.4 Processamento de imagem baseado no histograma 33

2.4.5 Operações morfológicas 34

2.5 Análise de incertezas 35

2.6 Considerações finais 37

3 METODOLOGIA 39

3.1 Sistema desenvolvido e procedimentos para medição 39

3.2 Calibração da lente da câmera 43

3.3 Processamento da imagem e cálculo do desgaste de flanco 44

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 52

4.1 Calibração de lente e tamanho de pixel 52

4.2 Medições utilizando o microscópio 54

4.3 Medições utilizando o sistema proposto 55

4.4 Comparação com outros autores 67

5 CONCLUSÕES 71

REFERÊNCIAS 73

APÊNDICE A – Resultados detalhados 77

APÊNDICE B – Códigos desenvolvidos 80

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação que envolve a remoção de material na forma de cavaco, a fim de dar ao produto sua forma final, dimensões e acabamento desejados. Os processos de usinagem são extremamente relevantes para a indústria, e são utilizados em setores variados, como o automotivo, aeronáutico, mineração, siderúrgico, aeroespacial, têxtil, hospitalar, entre outros.

Com o avanço da indústria nacional de alta tecnologia, os processos de fabricação se tornaram cada vez mais relevantes no cotidiano das empresas. Por essa razão, é fundamental desenvolver novas tecnologias que possibilitem melhorar a qualidade das peças produzidas e aumentar a produtividade. No entanto, um dos principais obstáculos para o aumento da produtividade é o tempo improdutivo gerado pelas interrupções do processo, tanto as planejadas quanto as não planejadas. No contexto da usinagem, dentre essas interrupções, destacam-se aquelas necessárias para substituir a ferramenta de corte, devido ao desgaste ou falha prematura. Isso torna a vida útil da ferramenta de corte um fator econômico crucial no processo de usinagem (HESSER et al., 2019).

A decisão sobre a troca da ferramenta de corte pode ser realizada através de três abordagens diferentes, como a baseada na experiência do operador, através de procedimentos estatísticos e pelo monitoramento direto ou indireto. No final da década de 1980 e no início da década de 1990, ocorreu uma mudança da antiga prática de troca automática de ferramentas para instituir procedimentos de troca de ferramentas baseados no monitoramento do desgaste nas arestas das ferramentas de corte. Isso foi possível através da implementação de mecanismos adaptativos de inspeção de ferramentas. Tradicionalmente, uma ferramenta era trocada para atender a novos requisitos do processo, por exemplo, diferentes geometrias e materiais da ferramenta, ou para se adequar ao tipo de corte, como desbaste, acabamento e perfilamento. A troca de uma ferramenta quando desgastada requer o monitoramento do desgaste em tempo real, principalmente porque o desgaste da ferramenta é um fenômeno complexo que ocorre de maneiras diferentes e variadas (DIMLA, 2000).

Diversos estudos e pesquisas têm focado sobre a questão do tempo de inatividade da máquina-ferramenta em processos produtivos industriais. De acordo com as análises realizadas, estima-se que esses problemas sejam responsáveis por cerca de 20% do tempo total de produção das máquinas-ferramenta em questão (Wong et al., (2020) e Zhu et al., (2023)). Esse dado, por sua vez, reforça a importância de estratégias eficientes de monitoramento e manutenção das ferramentas de corte utilizadas nos processos de usinagem.

Ao minimizar o tempo de inatividade das máquinas, é possível aumentar a eficiência e a produtividade, além de reduzir custos e desperdícios decorrentes de eventuais problemas na operação. Desse modo, investir em tecnologias e metodologias que possibilitem o monitoramento contínuo do desgaste das ferramentas de corte é uma medida estratégica e fundamental para a otimização dos processos produtivos em diferentes setores industriais.

A demanda por monitoramento em um processo de fabricação inclui o monitoramento da máquina, da dinâmica do processo de usinagem, da peça e das máquinas-ferramentas para garantir o desempenho ideal. Os objetivos dos sistemas de monitoramento de condição de ferramenta são a detecção precoce do desgaste da ferramenta de corte, manutenção da precisão da usinagem fornecendo uma ação corretiva para o desgaste da ferramenta e prevenção da quebra da ferramenta de corte (MOHANRAJ et al., 2020). A medição direta do desgaste durante o processo de usinagem é um desafio para os pesquisadores devido as condições de trabalho no interior da máquina, sendo atualmente a medição por visão computacional a mais utilizada (Daicu; Oancea, 2022).

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é construir um sistema de visão computacional para realizar a medição de desgaste de inserto de usinagem in loco, utilizando uma Raspberry Pi modelo 3 e comparando diferentes abordagens para iluminação e captura da imagem do inserto.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um algoritmo de código aberto e implementá-lo na Raspberry Pi;
- Tornar o sistema viável ao uso no interior do centro de usinagem;
- Validar as medições realizadas.

1.2 Contribuições da pesquisa

A proposta deste trabalho difere das abordagens anteriores, porque todo o processo de captura e processamento de imagem é feito por um sistema computacional dedicado (Raspberry Pi modelo 3 com câmera module v2), robusto, de baixo custo e passível de ser montado dentro da área de trabalho de um centro de usinagem. Além disso, o *firmware* para a aquisição, processamento e cálculo do desgaste do flanco foi realizado utilizando software de código aberto (Python).

A utilização de um software de código aberto e um sistema de baixo custo auxilia na reprodução do protótipo para diferentes contextos da indústria e do meio acadêmico, que favorece o desenvolvimento da tecnologia da visão computacional voltada para a usinagem. Ademais, o estudo comparativo de diferentes ambientes e formas de iluminação da cena agrega conhecimento sobre as dificuldades e facilidades presentes na medição por visão computacional de uma ferramenta desgastada.

Por fim, a realização das medições na área de trabalho de um centro de usinagem com resultados confiáveis e validados por um estudo estatístico em conjunto com a portabilidade da Raspberry Pi mostram a viabilidade do sistema proposto.

1.3 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 foram discutidas as considerações iniciais, introduzindo o assunto, mostrando os objetivos do trabalho e quais são suas contribuições. No Capítulo 2 é mostrado uma revisão bibliográfica do tema, abordando os principais estudos relacionados a medição por visão computacional na usinagem e apresentando conceitos necessários para o desenvolvimento e compreensão do trabalho realizado. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada com base nos estudos apresentados no Capítulo 2, explicando cada etapa do software desenvolvido e como foram realizadas a medições apresentadas nos resultados. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através da metodologia aplicada e discute os principais pontos observados e possíveis influenciadores dos resultados. O Capítulo 5 conclui o trabalho abordando os principais resultados obtidos e discute as vantagens e desvantagens de cada método estudado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura desse trabalho tem o objetivo de cobrir os tópicos essenciais para desenvolvimento e compreensão do tema. Para isso, contempla inicialmente como ocorre o processo de medição de desgaste de insertos de usinagem de forma geral e é discutido como outros autores abordam a medição do desgaste através da visão computacional. Então, são discutidos os principais aspectos teóricos necessários para realização de um trabalho sobre aplicação de sistemas de medição por imagem. Por fim, são abordadas as ferramentas matemáticas da metrologia que são utilizadas para analisar a confiabilidade dos resultados.

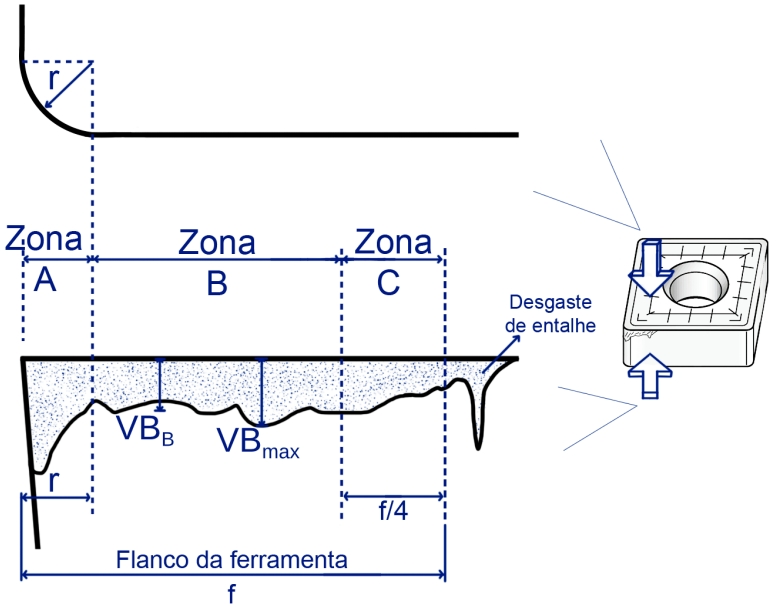
2.1 Medição de desgaste de inserto de usinagem por imagem

Daicu; Oancea (2022) classificam as principais causas do desgaste em ferramentas de corte como sendo degaste abrasivo, desgaste por difusão, desgaste por oxidação e desgaste adesivo. O degaste abrasivo é consequência da perda de material por micro-sulcamento causado por partículas de elevada dureza relativa. Já o desgaste por difusão ocorre ao exceder uma certa temperatura os átomos de alguns elementos se difundem do material da ferramenta para o material que está sendo usinado. O desgaste por oxidação ocorre usualmente em temperaturas acima de 700/800 °C, quando o oxigênio reage com o carboneto formando óxidos, que são removidos pelo próprio atrito. E o desgaste adesivo acontece pela deposição de metal na aresta de corte, quando esse metal depositado quebra, também remove parte do material da ferramenta de corte.

Segundo a norma ISO 3685:2017, o desgaste da ferramenta de corte é classificado em quatro tipos principais: desgaste do raio da ponta, desgaste de flanco, desgaste de entalhe e desgaste de cratera. Em que o desgaste do raio da ponta, desgaste de flanco e desgaste de entalhe aparecem na superfície de folga no contato entre a ferramenta de corte e a peça e o desgaste da cratera aparece na superfície de saída no contato entre a ferramenta e o cavaco.

Para medição de desgaste de flanco máximo e médio, segundo as recomendações da ISO 3685:2017, a região que deve ser considerada para medição está localizada na zona B, como mostra a Figura 2.1. A zona A é a região do raio da ponta da ferramenta e a zona C é a região que precede o desgaste de entalhe. O desgaste de flanco máximo (VB_{max}) é o ponto máximo de desgaste da zona B e o desgaste de flanco médio (VB_B) é a média dos pontos de desgaste desta região.

Figura 2.1: Parâmetros geométricos do desgaste.



Fonte: Adaptado da ISO 3685:2017.

Existem duas categorias principais de monitoramento do desgaste de ferramentas de usinagem: métodos indiretos e diretos. Os métodos de monitoramento indiretos estimam o desgaste da ferramenta medindo variáveis como forças de corte, vibração, emissão acústica, que estão relacionadas aos estágios de desgaste da ferramenta. No entanto, a relação entre o desgaste da ferramenta e as variáveis observadas depende das condições de corte, que geralmente não são conhecidas antecipadamente. Embora esses métodos sejam populares, a precisão alcançada com eles pode ser afetada por sinais de ruído em ambientes industriais. Alternativamente, os métodos de monitoramento direto avaliam a variável de interesse comparando-a com uma dimensão padrão conhecida (GARCÍA-ORDÁS et al., 2016).

Segundo Kuntoğlu et al. (2021) uma vez que o desgaste da ferramenta se desenvolve na pastilha de corte, ele deve ser mantido sob controle para entender o mecanismo subjacente para evitar níveis excessivos. Nesse sentido, uma das principais vantagens dos métodos indiretos é que o monitoramento em tempo real do desgaste da ferramenta é possível de ser realizado com sensores sem interromper a operação. Com o aumento do desgaste de flanco adequado para quantificação com padrões, sua detecção oferece informações vitais sobre a vida útil restante da ferramenta de corte. No entanto, a sofisticação por causa dos numerosos parâmetros e variáveis de corte dificulta a estimativa precisa do desgaste da ferramenta. Para validar a taxa de progressão do desgaste, isso é necessário, o que leva a um alto custo de investimento para uma fabricação confiável e sustentável.

Dentre os métodos diretos, os métodos baseados em sistemas de visão computacional destacam-se por sua capacidade de medir mudanças geométricas reais na ferramenta com exatidão e confiabilidade. Esses métodos fornecem informações confiáveis sobre o desgaste da ferramenta, permitindo ajustes no processo de usinagem antes que ocorram falhas prematuras da ferramenta, aumentando a vida útil e a produtividade da mesma (GARCÍA-ORDÁS et al., 2016). A principal desvantagem desse método é a necessidade de paradas de máquina para realização das medidas, prolongando o tempo de fabricação (KUNTOĞLU et al., 2021). Dessa forma, vê se a necessidade de se mensurar esse tempo gasto na medição do desgaste e buscar um sistema mais eficiente com respostas rápidas e satisfatórias.

As ferramentas de metrologia virtual têm hoje um papel fundamental na avaliação da qualidade da produção, controle e amostragem dinâmica. E seu objetivo é estimar parâmetros importantes para a produção e avaliação da qualidade, que podem ser caros ou difíceis de mensurar (MAGGIPINTO et al., 2018). A visão computacional está relacionada com maneiras de um computador ou qualquer máquina conseguir ver o ambiente. Portanto, a ciência da visão computacional aborda técnicas de processamento de imagens para extrair e processar características importantes de objetos e do ambiente em que se encontram (PEDRA et al., 2013).

No âmbito das operações de usinagem, um dos principais desafios enfrentados pela visão computacional é a redução significativa nas relações sinal-ruído do conjunto de dados. Isso se deve ao fato de que o ambiente de produção é extremamente ruidoso, com intensas vibrações e flutuações de temperatura, destacando a importância da implementação de técnicas de pré-processamento avançadas (DREYFUS et al., 2021).

A adaptabilidade da metrologia virtual é uma característica importante que pode reduzir as necessidades de tempo e dados para implementação, tornando-a um recurso valioso e pouco explorado que ganhará importância com o tempo. Atualmente, existem inúmeras oportunidades de pesquisa para replicar e aprimorar os resultados obtidos em aplicações de metrologia virtual para operações industriais, como usinagem e manufatura aditiva (DREYFUS et al., 2021).

A Tabela 2.1 mostra autores que utilizaram sistema de visão computacional para medição do desgaste de ferramentas de usinagem:

Tabela 2.1: Síntese de autores que utilizaram sistema de visão computacional para análise de desgaste de ferramentas de usinagem.

Autor	Tipo de medição e medida de referência	Medição realizada	Equipamentos e softwares utilizados	Resultados alcançados
Bagga et al. (2021)	Medição em bancada e referência microscópio	Desgaste de inserto de torno	Câmera CMOS, luz LED em formato anelar, computador, software Matlab	Erro entre 1% e 5%
Bagga; Makhesana; Patel (2021)	Medição in loco e referência microscópio	Desgaste de flanco em inserto de torno CNC	Câmera CMOS, luz LED em formato anelar, computador, software Matlab	Erro entre 0,5% e 5%
Dong; Li (2022)	Medição in loco e utiliza a mesma imagem como referência, modificando apenas o software de análise	Desgaste de flanco em inserto de torno	Câmera CMOS, luz LED, computador Lenovo, software não mencionado	Erro de aproximadamente 3%
Ganesh; Bommi (2022)	Medição em bancada e referência não mencionada	Desgaste de flanco em inserto de torno	Câmera não especificada, computador, software Matlab	Não houve comparação com medida de referência
García-Ordás et al. (2017)	Medição em bancada e referência microscópio	Desgaste de flanco em inserto de fresa	Câmera CCD, lente Azure de 25 mm, luz LED em formato de barra, computador, software Matlab	Precisão entre 80,24% e 88,46%
Thakre; Lad; Mala (2019)	Medição em bancada e referência microscópio	Desgaste de flanco em inserto de torno	Câmera CMOS, luz LED pontual, computador, software Matlab	Erro de aproximadamente 3%
You et al. (2020)	Medição in loco e referência microscópio	Desgaste de flanco em inserto de fresa	Câmera CCD, lente telecêntrica, luz LED em formato anelar, computador, software não mencionado	A precisão estimada está entre 91% e 97%
Zhang; Zhang (2013)	Medição in loco e referência microscópio	Desgaste de inserto de fresa esférica	Câmera CCD, lente telecêntrica, luz LED em formato anelar, computador, software próprio em C++	Erro entre 0,5% e 5%
Zhou; Yu (2021)	Medição em bancada e referência microscópio	Desgaste da aresta transversal de broca helicoidal	Câmera CMOS, luz LED em formato cilíndrico, computador, software próprio em C++	Erro entre 2,4% e 6%
Zhu et al. (2023)	Medição em bancada e referência não mencionada	Desgaste de flanco em ferramenta de micro-fresamento	Câmera CCD, lente telecêntrica, luz LED em formato anelar, computador, software não mencionado	Erro entre 1% e 5%

Segundo You et al. (2020), devido às limitações da resolução da câmera e ao custo dos sistemas de visão computacional, os pesquisadores utilizam lentes de zoom para obter um monitoramento de alta exatidão do desgaste da ferramenta em pequenos campos de visão.

You et al. (2020), Zhang; Zhang (2013), García-ordás et al. (2016) e Zhu et al. (2023), utilizam câmeras com sensor *Charge Coupled Device* (CCD) que geralmente possuem maior qualidade, porém a um custo maior que as de sensor *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS). Os autores que utilizaram câmeras com sensor CCD também utilizam lentes telecêntricas a fim de evitar a distorção causada por lentes tradicionais, os demais autores deveriam realizar a calibração da lente para mitigar o problema da distorção, o que não ocorre ou não é mencionado nos trabalhos de Ganesh; Bommi (2022), Dong; Li (2022), Thakre; Lad; Mala (2019), Bagga; Makhesana; Patel (2021) e Bagga et al. (2021).

Metade dos autores mencionados na Tabela 2.1 utilizaram o software Matlab, que é um software fechado e de custo elevado. Apenas dois utilizaram software próprio programado em linguagem C++ e o restante não menciona o software utilizado. O uso de um software de código aberto e um sistema de baixo custo auxilia na reprodução do método em diferentes contextos, favorecendo o desenvolvimento da tecnologia.

Segundo Dreyfus et al. (2021) a exatidão dos resultados alcançados, apesar de ser uma das características mais importantes, é apenas um dos aspectos que precisa ser satisfeito para viabilizar a aplicação dos sistemas de visão computacional na indústria. Existem outros pontos importantes relacionados com a praticidade e aplicação do método que precisam ser considerados durante o desenvolvimento do sistema de medição usando visão computacional, importando destacar o espaço ocupado pela câmera dentro da máquina, o comportamento do sistema para diferentes tipos de inserto, a facilidade de acesso aos resultados da medição, o tempo de resposta do programa e o custo. Estes pontos não são discutidos pelos autores da Tabela 2.1.

Para o início da discussão sobre a utilização de sistemas de visão computacional é necessário abordar o processo de aquisição de imagens, que se trata da captura da imagem real e sua transformação em imagem digital.

2.2 Processo de aquisição de imagens

O equipamento de aquisição de imagem é o dispositivo encarregado de criar uma representação de um objeto utilizando a luz refletida por este. Um equipamento de aquisição de imagem é, por si só, um sistema complexo no qual cada um de seus componentes pode influenciar no resultado final da aquisição, ou seja, na imagem digital gerada. Segundo Leta et al. (2016), os componentes básicos de um sistema de aquisição incluem lente, sensor e interface:

- A lente é responsável por refratar e transmitir a luz e pode ser classificada quanto a sua resolução. A lente padrão é de baixa resolução e trabalha comumente com distâncias focais maiores que 200 mm. As lentes de alta resolução trabalham com distâncias focais entre 1 mm e 1200 mm. Lentes macro também são consideradas de alta resolução e possuem um campo de visão restrito e quase nenhuma distorção. As telecêntricas não provocam aumento ou redução no tamanho dos objetos e são as mais utilizadas em aplicações de metrologia dimensional.
- O sensor é responsável pela conversão da luz refletida por objetos físicos em sinal elétrico. O menor elemento do sensor e o menor elemento da imagem é o pixel, quanto maior a quantidade de pixels mais detalhes do objeto são capturados.
- A interface realiza a transferência da imagem digital, formada pela sensibilização do sensor, para um sistema computacional que segue um padrão de comunicação, como USB (*Universal Serial Bus*) e FireWire.

A iluminação da cena desempenha um papel crucial na captura da imagem, uma vez que a qualidade da imagem pode ser negativamente afetada por uma fonte de luz com intensidade insuficiente ou excessiva. Em seu estudo, Lyu et al. (2020) abordam questões como a superexposição local, que ocorre devido à reflexão irregular da superfície do objeto alvo sob uma forte luz de fundo. Em ambientes naturais ou industriais, a intensidade da luz varia amplamente, embora não possa ser totalmente capturada pelos dispositivos devido às limitações das câmeras. Na visão computacional, a superexposição severa é frequentemente observada em casos de restrições de iluminação e alta refletância, resultando na perda de informações importantes na imagem.

Um dos fatores importantes no processamento de imagens para medição de desgaste de ferramentas é desenvolver um modelo de iluminação robusto, pois a própria superfície da ferramenta tem muito ruído na forma de superfície irregular. Além disso, a região de desgaste a ser identificada também é irregular (BAGGA et al., 2021).

2.3 Calibração de lentes

Como discutido na subseção anterior, as câmeras com lentes padrão, de alta resolução e macro geram distorções dimensionais dos objetos capturados, ou seja, as distorções de lente resultam em uma imagem capturada pela câmera que difere da imagem ideal. Existem diferentes formas de distorção de lente, como distorção radial, tangencial e de prisma fino. A distorção radial é a forma mais significativa de distorção de lente, e muitos pesquisadores

lidam exclusivamente com ela (WU et al., 2015). A distorção radial ocorre devido a uma ampliação inconsistente no campo de visão. Conforme explicado por Brown (1971), a quantidade de distorção radial é simétrica em relação ao centro óptico da câmera. Isso significa que não há distorção no centro óptico e, à medida que um ponto na imagem se afasta do centro, a distorção aumenta. Além disso, quando a distância entre a câmera e o plano de foco é aumentada, ocorre um aumento na distorção radial.

Os parâmetros físicos da câmera são comumente classificados em parâmetros extrínsecos e intrínsecos. Os parâmetros extrínsecos são necessários para transformar as coordenadas do objeto em um sistema de coordenadas centrado na câmera. Em sistemas com múltiplas câmeras, os parâmetros extrínsecos também descrevem a relação entre elas. Por outro lado, os parâmetros intrínsecos englobam a distância focal (em pixels), o centro óptico (em pixels) e o coeficiente de inclinação (HEIKKILA; SILVEN, 1997). Os parâmetros intrínsecos da câmera são definidos pela Equação (2.1):

$$K=\begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

Em que K é a matriz de parâmetros intrínsecos, f_x e f_y é a distância focal em x e em y, c_x e c_y é o centro óptico em x e em y e s é o coeficiente de inclinação.

Durante o processo de calibração, são empregadas equações de colinearidade em conjunto com modelos paramétricos para representar os efeitos das distorções (CAMPOS et al., 2015). As distorções radial e tangencial podem ser calculadas utilizando as Equações (2.2), (2.3) e (2.4) (HEIKKILA; SILVEN, 1997):

$$r^2=x^2+y^2 \tag{2.2}$$

$$x_d=x\left(1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6\right)+2\,p_1xy+p_2\left(r^2+2\,x^2\right) \tag{2.3}$$

$$y_d=y\left(1+k_1r^2+k_2r^4+k_3r^6\right)+p_1\left(r^2+2\,y^2\right)+2\,p_2xy \tag{2.4}$$

Em que x e y são as posições em x e y sem distorção, x_d e y_d são as posições em x e y com distorção, k é o coeficiente de distorção radial e p é o coeficiente de distorção tangencial.

Zhang et al. (2019) comparam quatro alvos diferentes para calibração, sendo eles uma malha xadrez, uma malha de círculos, duas malhas de círculos em diferentes planos e um

padrão proposto pelo autor com quatro planos de malha de círculos diferentes. Em sua metodologia ele manteve a quantidade de características, como quantidade de círculos e arestas do xadrez, iguais para os diferentes métodos; utilizou duas câmeras distintas e concluiu que o método proposto possui os melhores resultados. Comparando-se os resultados dos métodos que utilizam apenas um plano (malha xadrez e malha de círculos), não se pode concluir que há uma diferença significativa entre eles.

A calibração da lente é uma etapa que não ocorre na utilização de todos sistemas de visão computacional, visto que lentes telecêntricas não possuem distorção. Então, com a imagem digital sem distorções dimensionais a próxima etapa é o pré-processamento da imagem.

2.4 Métodos de pré-processamento de imagens

Nos métodos de visão computacional é comum a necessidade de processar a imagem de forma a destacar objetos ou áreas de interesse do restante da cena, facilitando sua análise e compreensão. Para isso são utilizados filtros e outros recursos de processamento da imagem digital.

Uma imagem digital pode ser representada como uma matriz de N_1 x N_2 elementos, onde cada elemento (pixel) está localizado em um plano cartesiano, sendo $1 \leq n_i \leq N_i$. Uma função f atribui a cada pixel (n_1, n_2) um valor que representa sua intensidade. Ao analisar essa função f em uma imagem, é possível extrair várias características, como variações de forma, posição e intensidade. Com base nessas características, podem ser realizadas modificações na imagem por meio de técnicas de filtragem (LYU et al., 2020).

Os filtros podem ser classificados como sendo do domínio da frequência ou espacial, lineares ou não lineares, em relação ao tipo de frequência que admite passar ou eliminar (baixas, altas ou faixas) e na forma de aplicação (globais, adaptativos, janelados ou locais) (LETA et al., 2016).

Uma forma de se aplicar um filtro bidimensional no domínio discreto é o processo de convolução, em que cada pixel f(i, j) passa a ser representado por uma resposta g(i, j) de acordo com o tipo de filtro utilizado e dimensões da máscara do filtro (matriz geralmente quadrada). De forma geral, é um processo iterativo que consiste em deslizar sobre a imagem a matriz da máscara, na qual a resposta g(i, j) é definida de acordo com os pixels coincidentes entre a máscara e a imagem. Para máscaras de tamanho ímpar, a máscara de convolução é centralizada no pixel em que está sendo aplicada e, para máscaras de tamanho par, a máscara

de convolução aplicada no primeiro elemento (LETA et al., 2016).

2.4.1 Filtros de suavização de imagens

Um desafio comum no processamento de imagens é a presença de ruído, que ocorre quando um ou mais elementos na cena real são representados de forma diferente na imagem digital, resultando em uma degradação nos detalhes da imagem. Portanto, é importante considerar a presença de ruído e aplicar técnicas de filtragem afim de reduzi-lo.

Os filtros de suavização ou filtros passa-baixa, como o filtro da mediana e o filtro gaussiano, têm como objetivo remover ou reduzir o ruído presente em uma imagem. Esse ruído pode ser do tipo aleatório que é o ruído que pode ser corrigido utilizando um filtro gaussiano, que realiza uma convolução com um núcleo gaussiano. O filtro gaussiano suaviza a imagem, reduzindo o ruído de alta frequência e preservando melhor os detalhes em comparação com outros filtros. A Figura 2.2 mostra um exemplo da aplicação desse filtro e seus efeitos em uma imagem.

Figura 2.2: Exemplo de aplicação do filtro gaussiano, sendo a primeira imagem sem aplicação do filtro, a segunda com aplicação utilizando um núcleo de tamanho 21 × 21 e a terceira com aplicação utilizando um núcleo de tamanho 45 × 45.

Fonte: Gonzalez; Woods (2018).

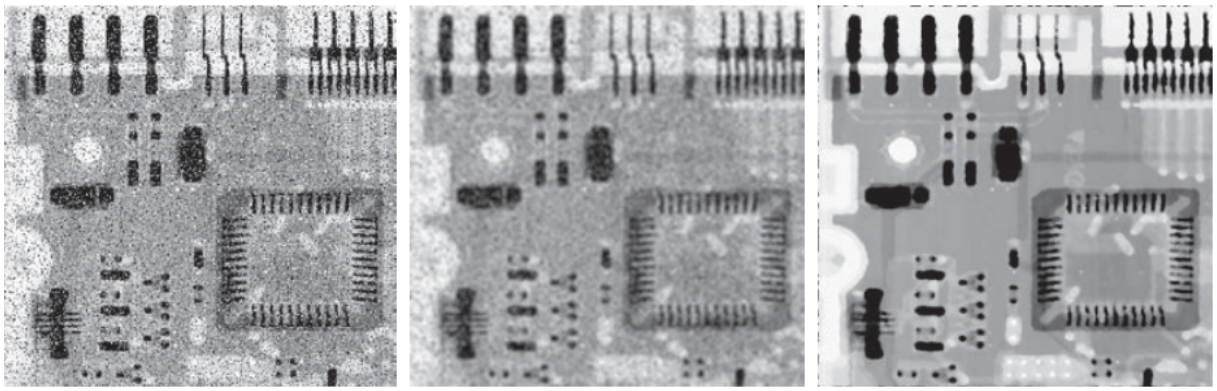
A máscara do filtro gaussiano é calculada a partir de uma discretização da curva gaussiana, que atenua valores próximos à mediana e suaviza o decaimento quando os valores se afastam da mediana. A equação de uma curva gaussiana generalizada para um espaço bidimensional é dado pela Equação (2.5) (LETA et al., 2016):

$$G(x,\ y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{\frac{-x^2}{2\sigma_x^2}+\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (2.5)$$

Em que G é a função gaussiana, x e y as localizações dos pixels e σ_x e σ_y são os desvios-padrão.

Além do ruído aleatório, também pode ocorrer o ruído impulsivo em uma imagem, que pode ser corrigido pelo filtro da mediana. O filtro da mediana é um filtro não linear que utiliza a mediana dos pixels dentro de uma determinada área. O valor mediano é então atribuído ao pixel central, substituindo o valor original. Esse tipo de filtro é particularmente eficaz na redução de ruído impulsivo, também conhecido como ruído do tipo "sal e pimenta", devido à aparência da imagem ruidosa, como mostra a primeira imagem da Figura 2.3. Esse filtro produz menos desfoque nas bordas da imagem em comparação com filtros lineares de tamanho similar (PETROU; PETROU, 2010). A Figura 2.3, mostra um exemplo da aplicação desse filtro e sua atuação no ruído impulsivo comparado ao filtro gaussiano.

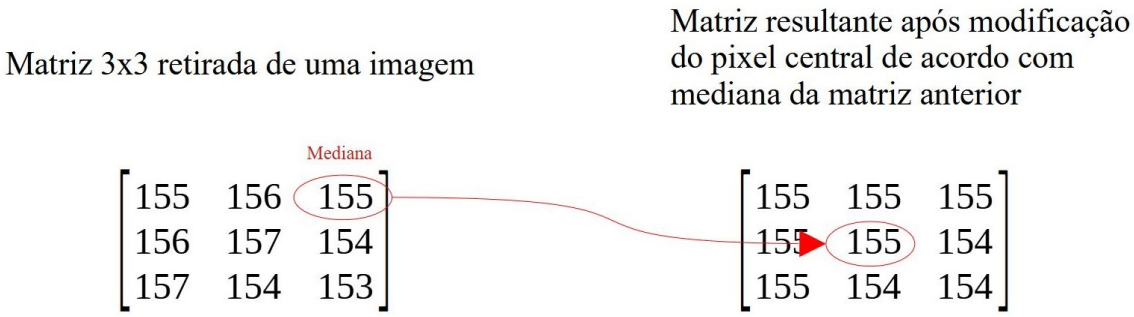
Figura 2.3: Exemplo de aplicação do filtro da mediana para redução do ruído impulsivo, sendo a primeira imagem corrompida pelo ruído impulsivo, a segunda com aplicação do filtro gaussiano utilizando um núcleo de tamanho 19 × 19 e a terceira com aplicação do filtro da mediana utilizando um núcleo de tamanho 7 × 7.



Fonte: Gonzalez; Woods (2018).

A Figura 2.4 exemplifica como o filtro atua na imagem. Para esse exemplo, a matriz 3x3 possui o pixel central com valor de 157 e a mediana dessa matriz é igual a 155. Dessa forma, na matriz resultante o pixel central muda seu valor de 157 para 155 e os demais valores também se modificam de acordo com os outros valores vizinhos presentes no restante da imagem.

Figura 2.4: Esquemático da atuação do filtro da mediana.



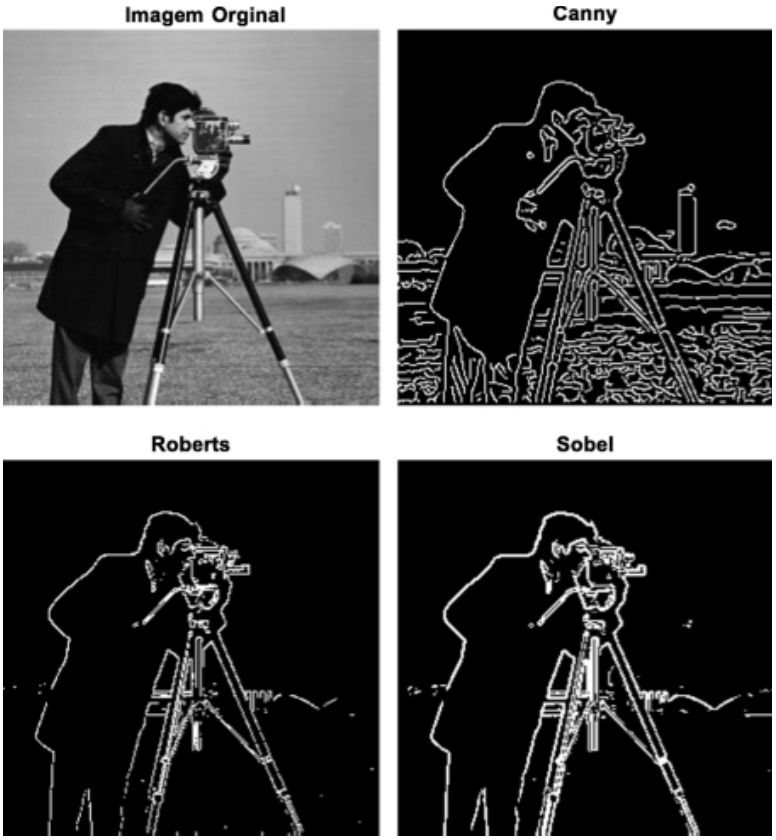
Fonte: Adaptado de Leta et al. (2016).

Ambos os filtros, o da mediana e o gaussiano, são amplamente utilizados na redução de ruído em imagens, cada um adequado para diferentes tipos de ruído e objetivos específicos (PETROU; PETROU, 2010). Outros filtros de suavização comuns são o da média, que altera o pixel da imagem pela média dos pixels vizinhos, e o filtro de ordem, em que os pixels da máscara são ordenados e o pixel da imagem é alterado para o valor máximo dos pixels da máscara ou por de uma ordem qualquer dentro da ordenação (LETA et al., 2016).

2.4.2 Filtros de acentuação de bordas

Enquanto os filtros de suavização são filtros passa-baixa os filtros de acentuação de bordas são filtros passa-alta. A detecção de bordas em uma imagem é realizada com base na diferença de intensidade entre os pixels. É um processo amplamente utilizado no reconhecimento de imagens digitais e diversos algoritmos foram desenvolvidos para essa finalidade, como os filtros de Sobel, Roberts, Prewitt (GERHARD E JOSEPH, 1996) e Canny (CANNY, 1986). As bordas são regiões de transição na imagem digital que marcam os limites entre objeto e fundo, bem como entre os contornos de objetos que se sobrepõem ou se tocam. Ao detectar as bordas, é possível localizar os objetos e mensurar suas propriedades, como área, perímetro e forma. Essas informações são necessárias em diversas aplicações de processamento de imagem, como segmentação e análise de objetos (MIRANDA, 2011). A Figura 2.5 mostra alguns exemplos dos filtros de acentuação de bordas ou filtros passa-alta.

Figura 2.5: Comparação entre filtros passa-alta.



Fonte: Balochian; Baloochian (2022).

Quanto maior for a diferença de níveis de cinza em uma determinada região da imagem, mais fácil é detectar a borda. No entanto, em imagens de cenas do mundo real, é comum ocorrer uma transição gradual de níveis de cinza, o que pode dificultar a detecção de bordas (MUKHOPADHYAY; CHAUDHURI, 2015).

Uma borda pode ser identificada pelo cálculo do gradiente ao longo de uma linha normal a essa borda e quando o valor desse gradiente for superior a um limiar predefinido, o ponto é detectado como uma borda. Os gradientes para as linhas e colunas da imagem são dados pelas Equações (2.6) e (2.7) (LETA et al., 2016):

$$G_L(i,j)=f(i+1,j)-f(i,j) \tag{2.6}$$

$$G_C(i,j)=f(i,j+1)-f(i,j) \tag{2.7}$$

Em que G_L é gradiente das linhas, G_C é o gradiente das colunas, i são as linhas de pixels e j as colunas de pixels da imagem. A partir dessas equações alguns métodos foram desenvolvidos para detecção de bordas, variando as máscaras utilizadas no cálculo das

derivadas.

O filtro de Sobel utiliza uma máscara 3x3 em que os valores vizinhos ao pixel central são ajustados de acordo com a direção de borda que se deseja acentuar. O filtro de Roberts utiliza uma derivada discreta da imagem, aplicando uma diferenciação no pixel vizinho posicionado em sua diagonal. O filtro de Prewitt utiliza uma matriz 3x3 para determinação do gradiente da imagem, assim como o filtro de Sobel, mas utiliza outra equação para determinação do gradiente de acordo com os coeficientes dessa matriz (LETA et al., 2016).

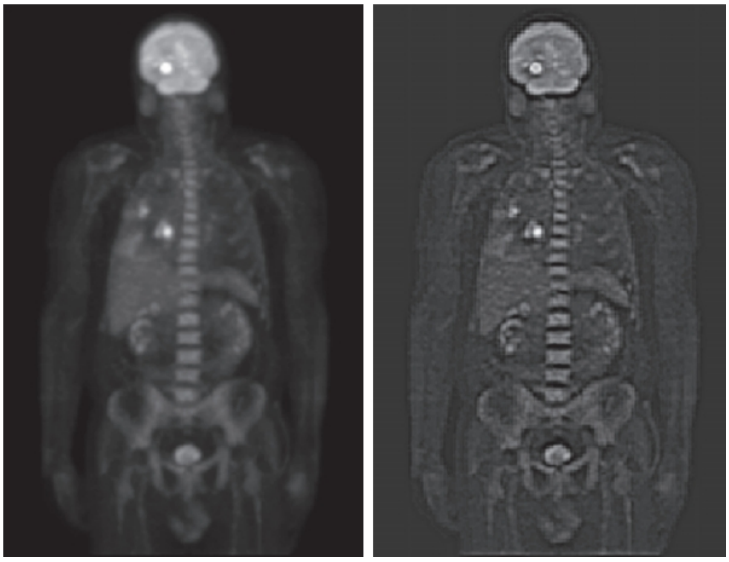
O filtro Canny é um filtro passa-alta que emprega três critérios preestabelecidos para obter melhores resultados na detecção de bordas (LYU et al., 2020). Segundo Leta et al. (2016), o primeiro critério define que bordas reais não podem ser descartadas e bordas falsas não devem ser encontradas, a fim de obter uma baixa taxa de erro. O segundo critério minimiza a distância entre o centro da borda e os pontos ao seu redor. E o terceiro define que deve haver apenas uma resposta válida para uma única aresta, eliminando a possibilidade de múltiplas respostas para uma mesma borda. Esses passos combinados ajudam a melhorar a precisão e a robustez da detecção de bordas em uma imagem.

2.4.3 Filtro homomórfico

A filtragem homomórfica é mais uma técnica no domínio da frequência, esta visa aumentar simultaneamente o contraste e a compressão da faixa dinâmica. É utilizado principalmente para imagens com iluminação não uniforme em imagens médicas, de sonar e outros. Além disso, o filtro é utilizado para o aprimoramento de bordas tornando os detalhes da imagem mais evidentes (GAMINI; KUMAR, 2023). A Figura 2.6 mostra um exemplo da aplicação desse filtro para análise de raio X.

Na filtragem homomórfica, os componentes de iluminação e refletância são processados usando a transformada de Fourier discreta. Nesta abordagem, o domínio multiplicativo é mapeado com o domínio aditivo aplicando o logaritmo na imagem de entrada. O resultado é representado no domínio de Fourier e posteriormente a filtragem linear é aplicada. Então, a exponencial da transformada discreta inversa de Fourier é aplicada à imagem filtrada para obter a imagem aprimorada. O filtro passa-alta captura as propriedades significativas no processo de filtragem homomórfica, incluindo geometria, refletividade e iluminação. A função do filtro pode ser definida para suprimir as frequências baixas e fortalecer os componentes de alta frequência (GAMINI; KUMAR, 2023).

Figura 2.6: Exemplo de aplicação do filtro homomórfico, sendo a imagem da esquerda a original e a da direita a imagem com o filtro aplicado.



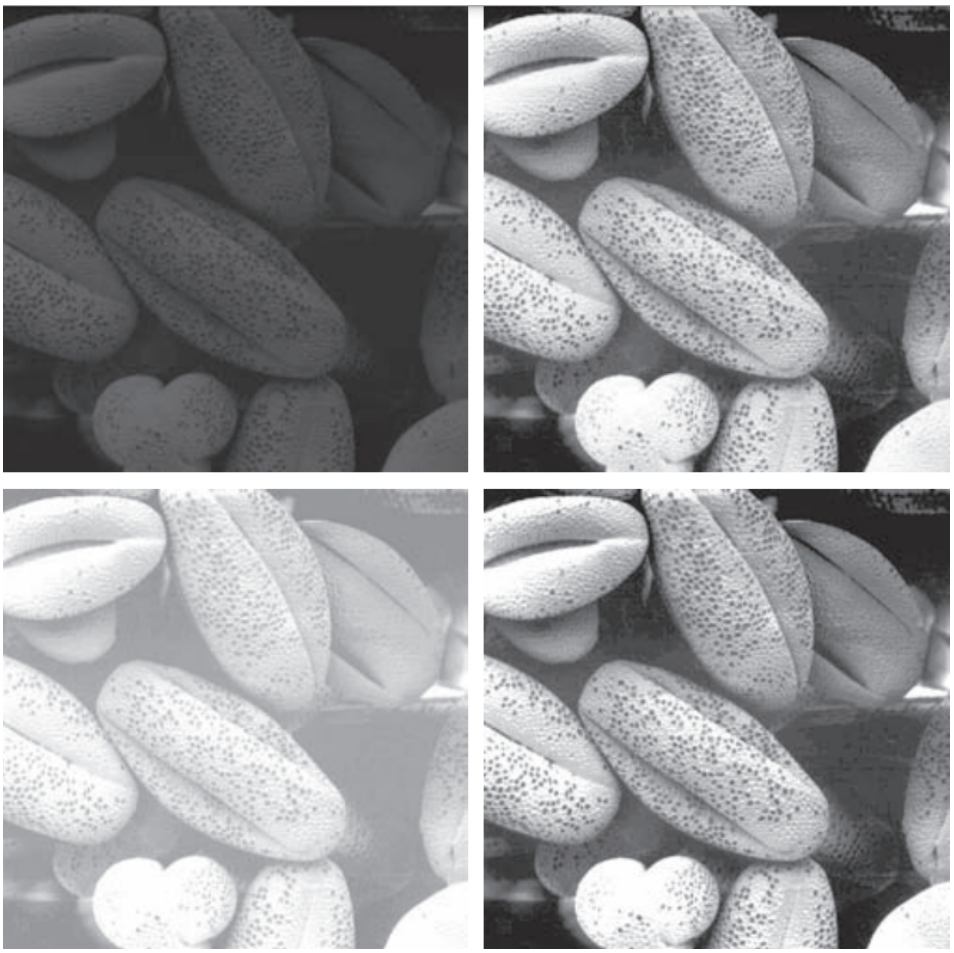
Fonte: Gonzalez; Woods (2018).

2.4.4 Processamento de imagem baseado no histograma

O histograma de uma imagem é o que relaciona a frequência com cada valor de nível de cinza correspondente. A forma do histograma está relacionada à aparência da imagem, de modo que uma imagem com baixo contraste possui um histograma estreito localizado normalmente no meio da escala de intensidade. Para uma imagem monocromática, isso implica uma aparência cinza desbotada e opaca. Já para o histograma de uma imagem de alto contraste uma ampla faixa da escala de intensidade é coberta e sua distribuição tende a se manter uniforme (GONZALEZ; WOODS, 2018).

A equalização de histograma é o processo de modificação do histograma que tem o objetivo de torná-lo mais uniforme, gerando assim uma imagem com maior contraste. A equalização do histograma geralmente funciona melhor em imagens com detalhes ocultos em regiões escuras. Imagens originais e de boa qualidade são frequentemente pioradas pela equalização do histograma (PRATT, 2007). A Figura 2.7 mostra um exemplo da aplicação da equalização de histograma para uma imagem com pouco brilho e para uma imagem com muito brilho.

Figura 2.7: Exemplo da aplicação da equalização de histograma, em que as imagens da esquerda são antes da aplicação da equalização de histograma e as imagens da direita depois da aplicação.



Fonte: Gonzalez; Woods (2018).

A equalização do histograma considera o contraste global da imagem, o que em alguns casos não é o ideal, sendo então indicado a aplicação de uma equalização de histograma adaptativa. Esse método envolve a aplicação a cada pixel do mapeamento de equalização do histograma com base nos pixels de uma região ao redor daquele pixel, ou seja, cada pixel é mapeado para uma intensidade proporcional à sua classificação de acordo com os pixels que o rodeiam (PIZER et al., 1987).

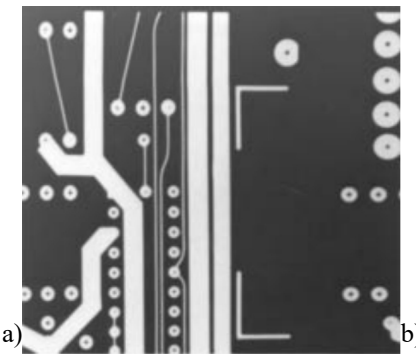
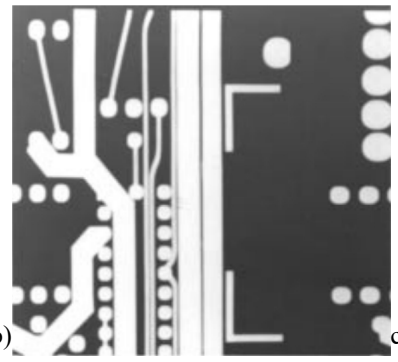
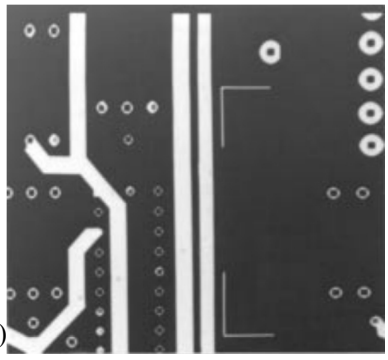
2.4.5 Operações morfológicas

Além dos filtros mencionados anteriormente que lidam com o domínio da frequência da imagem, existem outras formas de se modificar uma imagem, como as operações morfológicas. O processamento morfológico de imagens é um tipo de processamento no qual a forma espacial ou estrutura dos objetos dentro de uma imagem são modificadas. Dilatação e

erosão são duas operações morfológicas fundamentais. Na dilatação, um objeto cresce uniformemente em extensão espacial, enquanto na erosão um objeto encolhe uniformemente (PRATT, 2007).

As operações morfológicas de imagens binárias baseiam-se na relação geométrica ou conectividade de pixels que são considerados da mesma classe. As duas operações morfológicas básicas, dilatação e erosão, além de muitas variantes, podem ser definidas e implementadas por uma transformação de “acerto ou erro”. Em que uma máscara pequena de tamanho ímpar, usualmente 3X3, é digitalizada sobre uma imagem binária. Se o padrão de valor binário da máscara corresponder ao estado dos pixels sob a máscara (acerto), um pixel de saída em correspondência espacial com o pixel central da máscara é definido para algum estado binário desejado. Já para uma incompatibilidade de padrão (erro), o pixel de saída é definido para o estado binário oposto (PRATT, 2007). A Figura 2.8 mostra o exemplo das aplicações das operações morfológicas de dilatação e erosão.

Figura 2.8: a) imagem original, b) exemplo da aplicação de dilatação e c) exemplo da aplicação de erosão.

a)  b)  c) 

Fonte: Pratt (2007)

Como a dilatação provoca um alargamento na imagem, ela pode ser usada para unir regiões que, por exemplo, foram separadas por uma segmentação. Já a erosão por provocar um estreitamento na imagem, pode ser utilizada para a eliminação de ruídos em imagens binarizadas e na separação de regiões (LETA et al., 2016).

2.5 Análise de incertezas

Além dos processos descritos nas subseções anteriores a metrologia por imagem deve considerar também as incertezas envolvidas, visto que todo sistema de medição está submetido a influências que acarretam erros. A estimativa das incertezas podem ser separadas

em tipo A e tipo B. As incertezas do tipo A são relacionadas a distribuições estatísticas obtidas através de mais de uma medição de um mesmo mensurando e as incertezas do tipo B estão relacionadas a outra forma de avaliação da incerteza que não a de observações. Quando o valor de um mensurando é determinado de acordo com de n observações independentes, temos que a incerteza-padrão do tipo A pode ser calculada pela Equação (2.8) (JCGM, 2008):

$$u(x_i) = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{2.8}$$

Em que $u(x_i)$ é a incerteza-padrão, s desvio padrão amostral e n o número de leituras.

Para uma estimativa x_i de uma quantidade de entrada X_i que não foi obtida a partir de observações repetidas, a variância estimada associada ou a incerteza padrão é avaliada por julgamento científico com base em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i. O conjunto de informações podem incluir: dados de medições anteriores; experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos; especificações do fabricante; dados fornecidos em calibração e outros certificados; incertezas atribuídas a dados de referência retirados de manuais (JCGM, 2008).

Em alguns casos, pode ser possível estimar apenas os limites superior (+a) e inferior (−a) para um valor X_i, ou seja, o valor de X_i está contido dentro desse intervalo. Se não houver conhecimento específico sobre os valores possíveis de X_i dentro do intervalo, pode-se apenas assumir que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer lugar dentro dele (uma distribuição uniforme ou retangular de valores possíveis). Então x_i, a expectativa ou valor esperado de X_i, é o ponto médio do intervalo e sua incerteza pode ser calculada pela Equação (2.9) (JCGM, 2008):

$$u(x_i)_{RET} = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{2.9}$$

Em que, $u(x_i)_{RET}$ é a incerteza-padrão para uma distribuição retangular e *a* é metade da largura do intervalo entre os limites inferior e superior em que o valor de X_i está contido.

Um exemplo de incerteza com distribuição retangular que ocorre comumente em sistemas de visão de computacional é a incerteza relacionada ao preenchimento completo ou não do pixel. Na maioria das imagens capturadas durante a medição, acontece de as bordas do objeto mensurado serem modificadas pela discretização da imagem. Quando a imagem é

digitalizada, qualquer parte do pixel que esteja sendo ocupada será preenchida por completo e, portanto, deve ser considerada, no cálculo da incerteza, a dúvida devido à aproximação da imagem para um valor inteiro de pixel. Segundo Costa et al. (2015), a estimativa é feita como sendo de um pixel e a esta variável se atribui uma distribuição de probabilidade uniforme pois a probabilidade de o centro da marca estar em um determinado ponto é a mesma para todos os pontos internos a um pixel.

O cálculo para a incerteza levando em consideração um fator de abrangência *k* (fator que indica o nível de confiança fornecido) é dado pela Equação (2.10), através dela que se obtém a incerteza expandida (JCGM, 2008):

$$U = k.u(Y) \tag{2.10}$$

Em que U é a incerteza expandida, *k* é o fator de abrangência e *u*(*Y*) a incerteza-padrão combinada.

Para comparação entre o resultado obtido em um experimento e um resultado de referência é possível se utilizar o cálculo de erro normalizado, dado pela Equação (2.11) (DOQ-CGCRE-008, 2016):

$$E_n = \frac{X_{calc} - X_{Ref}}{\sqrt{U_{calc}^2 + U_{Ref}^2}} \tag{2.11}$$

Em que X_{calc} é resultado calculado; X_{Ref} é o resultado de referência; U_{calc} é a incerteza expandida do resultado calculado; U_{Ref} é a incerteza expandida do resultado de referência. Se o erro normalizado calculado for menor ou igual a um, tem-se que o resultado calculado é adequado.

2.6 Considerações finais

A medição do desgaste de flanco é essencial para operações de usinagem, podendo ser realizada por métodos diretos e indiretos. Para um controle mais completo e confiável do desgaste o emprego dos dois métodos é requerido e, para métodos diretos, o uso de sistemas de visão computacional se destacam pela exatidão e desempenho. Para garantir a aplicação correta desse sistema as etapas de aquisição, pré-processamento, extração das características e

análise do resultado devem ser cumpridas acertadamente.

Para a aquisição de imagens a utilização de lentes telecêntricas, que usualmente são mais caras e menos compactas que lentes comuns, permitem realizar medições sem a necessidade de calibração da lente, pois não deformam os objetos na imagem. Para os outros tipos de lente essa deformação pode ser compensada do estudo dos coeficientes de distorção de lente. Outro fator importante na aquisição de imagens é a iluminação da cena que deve ser adequada para cada tipo de aplicação.

O pré-processamento da imagem após sua aquisição é realizado utilizando filtros e outros recursos para modificação da imagem. Os filtros de suavização são utilizados na remoção de ruídos e existem diferentes filtros para diferentes tipos de ruídos, como o filtro gaussiano que reduz o ruído aleatório e o filtro da mediana que reduz o ruído impulsivo. Os filtros de acentuação de bordas são utilizados para destacar as bordas dos objetos nas imagens e, com a utilização de um filtro criterioso como o filtro Canny, é possível detectar as bordas reais presentes na imagem com baixa taxa de erro. A detecção de bordas pode ser auxiliada por técnicas que visam tornar os detalhes da imagem mais evidentes, como a utilização da filtragem homomórfica e realce do contraste baseado no histograma da imagem.

Outro processamento de imagens são as operações morfológicas que podem ser utilizadas para auxiliar a extração de características das imagens. Com as características desejadas devidamente extraídas a análise dos resultados deve ocorrer levando em consideração as incertezas envolvidas no processo. A comparação com um valor de referência também é necessária para comprovação da confiabilidade do sistema e isso pode ser mensurado com testes estatísticos.

3 METODOLOGIA

O objetivo deste Capítulo é apresentar os métodos utilizados e esclarecer o leitor sobre como as medições do presente trabalho foram executadas. Inicialmente é mostrado o funcionamento do sistema de forma geral e quais medições foram realizadas. Então, é discutido de forma mais detalhada as etapas de medição e como foram obtidos os resultados finais.

3.1 Sistema desenvolvido e procedimentos para medição

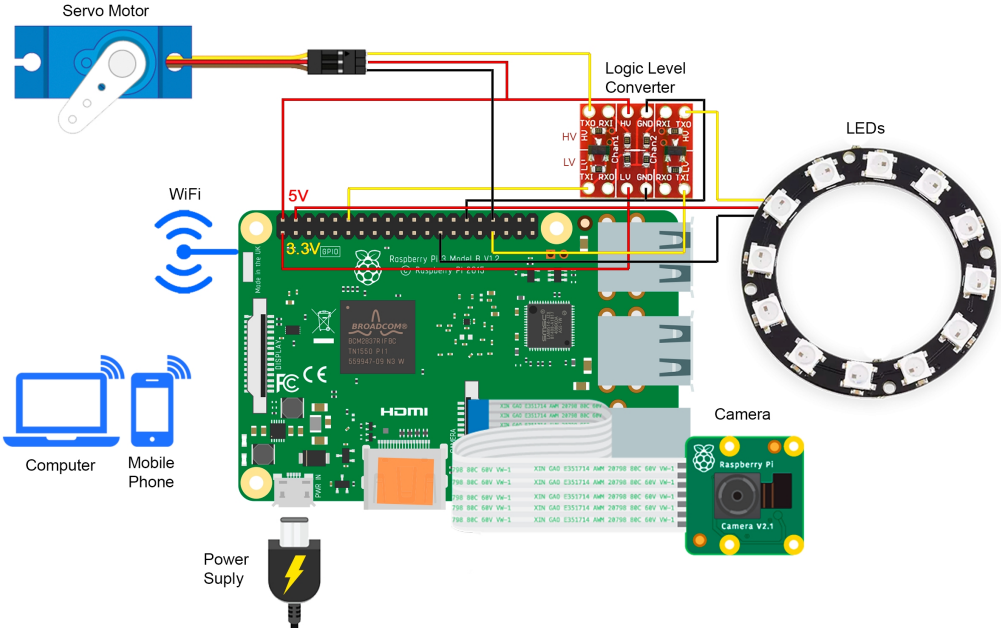
Foi utilizado uma Raspberry Pi 3 modelo B, que possui 1 GB de RAM (*Random Access Memory*) e processador de quatro núcleos de 1,2 GHz. Este conjunto é responsável por armazenar e executar o software responsável pela aquisição, processamento e análise da imagem e medição do desgaste, além de enviar os comandos para o servo motor que abre e fecha a caixa de proteção e para o conjunto de LEDs (*Light Emitting Diode*) utilizado na iluminação da região de interesse.

A aquisição da imagem é realizada por meio de uma câmera module v2 de 8 megapixels, que possui sensor CMOS Sony IMX219 com resolução de 3280 × 2464 pixels. A iluminação da cena é proporcionada por um conjunto de doze LEDs endereçáveis modelo WS2812B dispostos em formato anelar, que são controlados pela Raspberry Pi. Além disso, a Raspberry Pi é controlada por um sistema de *Virtual Network Computing* (VNC), o que permite ao operador realizar alterações e leituras de resultados no programa de forma remota através de algum outro dispositivo conectado à rede de internet. Todas as medições foram realizadas utilizando um dispositivo celular conectado a uma rede sem fio privada, o que mostra a facilidade de se acessar e controlar a Raspberry Pi mantendo a segurança evitando acesso externo.

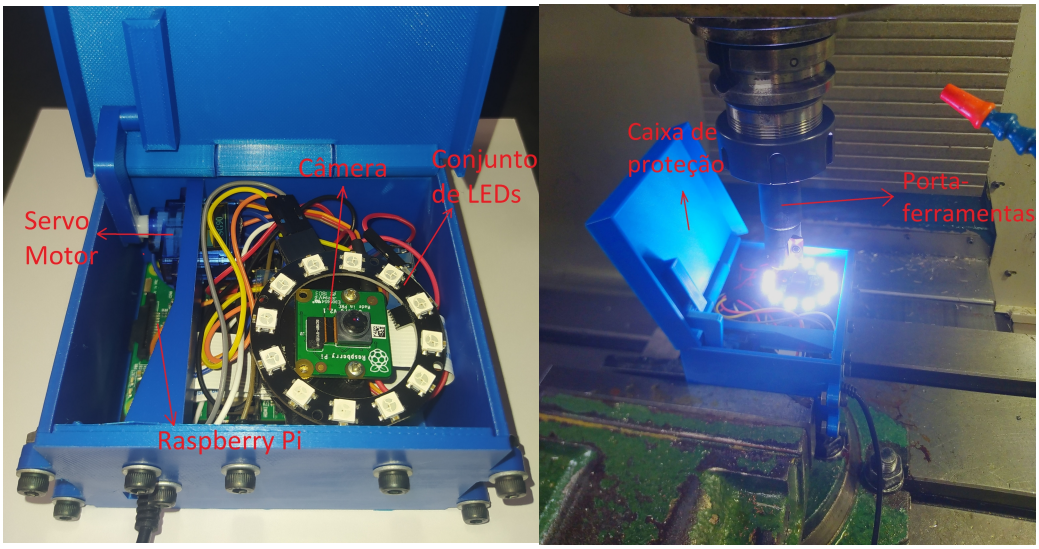
Para possibilitar que o sistema de medição completo fosse montado dentro do gabinete do centro de usinagem, foi construída uma caixa feita em ácido polilático (PLA) para acomodar todos os componentes. A caixa é dotada de uma porta móvel posicionada logo a frente da câmera. Esta porta é automaticamente aberta por um servomotor instantes antes de coletar as imagens para a determinação do desgaste da ferramenta. Na Figura 3.1a é apresentado um esquemático das conexões do sistema e na Figura 3b é apresentada uma imagem do conjunto já montado dentro da caixa de proteção e em funcionamento no interior do centro de usinagem. A caixa de proteção possui dimensões de 100 mm x 70 mm x 95 mm.

Figura 3.1: a) Esquemático do sistema proposto e b) sistema montado.

a)



b)



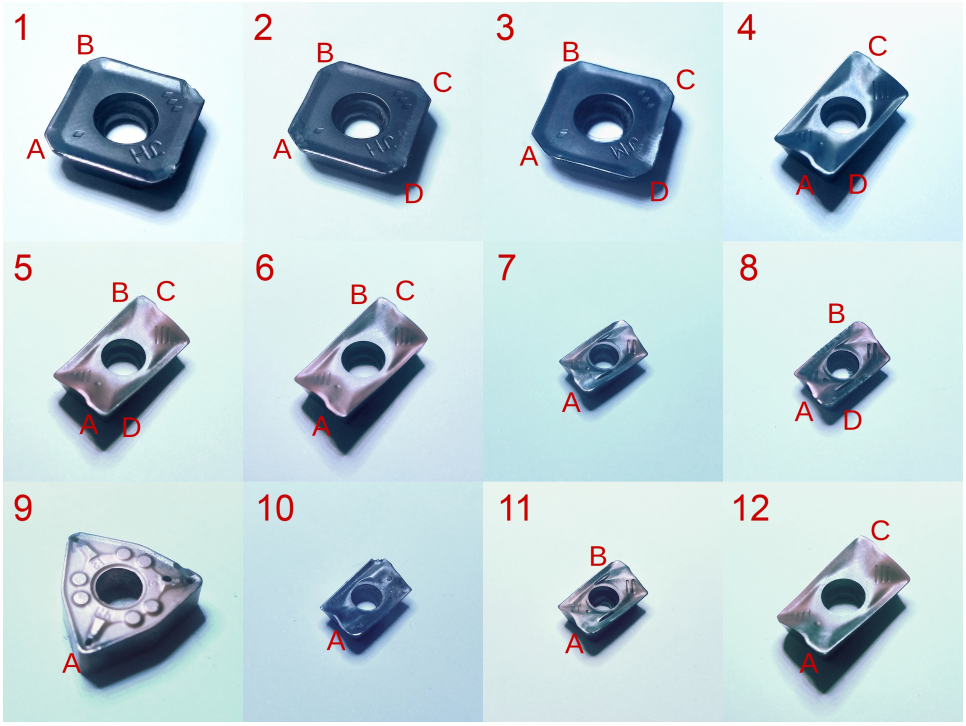
Fonte: Autor.

Como mostra a Figura 3.1a, para a conexão de nível lógico do servomotor e do conjunto de LEDs foi utilizado um conversor de nível lógico. A saída de nível lógico da Raspberry possui tensão de 3,3 V e para os modelos do servomotor e LEDs utilizados é recomendado que a entrada de nível lógico seja de 5 V. Dessa forma, foi adotada a alimentação de 5 V da própria Raspberry para realização da conversão.

A Figura 3.2 mostra os insertos utilizados junto da sua numeração correspondente. Foram feitos testes em bancada utilizando insertos de fresa e torno e testes in loco no centro de usinagem com os insertos de fresa. Foram utilizados 12 insertos sendo um total de 30 arestas disponíveis para as medições, considerando as arestas primária e secundária e

eliminando algumas pontas cuja fratura tornou a medida de desgaste de flanco impossível. Para o ensaio na bancada foram realizadas medições de desgaste de flanco médio e máximo de todos insertos mostrados na Figura 3.2, em que, buscou-se utilizar insertos com variadas geometrias e funções para avaliação da adaptabilidade dos métodos testados. Os insertos 4, 5, 6 e 12 foram os insertos selecionados para os testes in loco no centro de usinagem por possuírem as mesmas características dimensionais, que permitiu maior fluidez nas trocas para diferentes medições, e por possuírem mais arestas disponíveis em relação as outras combinações de insertos com as mesmas características dimensionais.

Figura 3.2: Insertos utilizados e sua numeração correspondente.



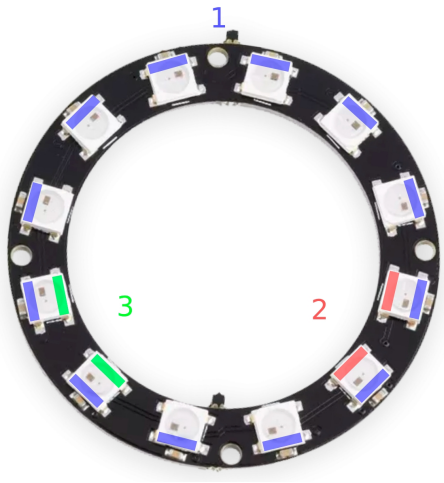
Fonte: Autor.

Dois métodos de iluminação diferentes foram utilizados. O primeiro consiste na iluminação do inserto utilizando todo o círculo de LEDs capturando uma única imagem e a utilizando para análise dos desgaste. Para esse método também foi feita uma variação de seis níveis de intensidade da iluminação para estudar sua influência nos resultados.

O segundo método é uma versão simplificada do que foi utilizado por Pfeifer; Wiegers (2000), em que foram realizadas três capturas variando os LEDs acionados conforme a Figura 3.3 e com intensidade máxima dos mesmos. Com o inserto posicionado centralizado na imagem, para a sequência 2 e 3 de LEDs acionados, como na Figura 3.3, o inserto é iluminado majoritariamente em sua região inferior. Os LEDs a serem acionados foram selecionados

através de uma avaliação qualitativa em testes preliminares variando as combinações de acionamento. O contorno do desgaste foi obtido através da combinação dessas três capturas e como ocorre a combinação dessas imagens é explicado ao final da seção 3.3 que discorre sobre a captura e processamento da imagem.

Figura 3.3: Sequência de capturas do segundo método de iluminação.



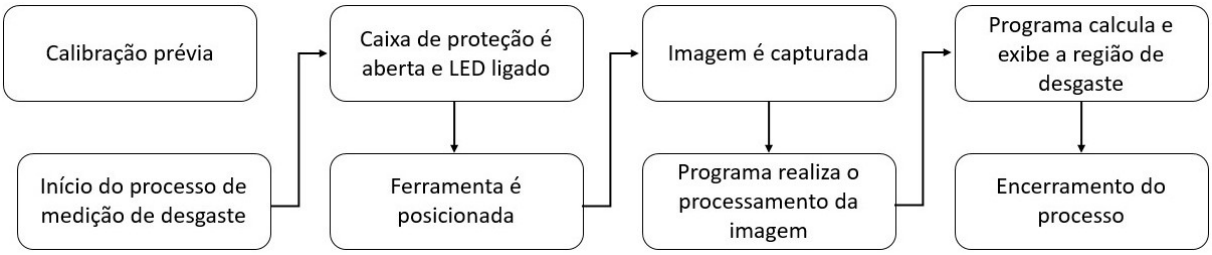
Fonte: Autor.

Para o ensaio de bancada foi realizada uma medição para cada aresta desgastada totalizando 30 medições e para o ensaio no centro de usinagem foram realizadas três medições para cada um dos oito flancos de insertos diferentes totalizando 24 medições. Essas medições foram realizadas para cada uma das seis intensidades de iluminação do primeiro método e para o segundo método.

A Figura 3.4 mostra de forma sucinta o funcionamento geral do sistema proposto e nas seções 3.2 e 3.3 serão discutidos mais a fundo o processo de calibração e o processamento da imagem para seleção da região de desgaste e cálculo de desgaste de flanco máximo e médio.

O algoritmo desenvolvido foi implementado em Python e utilizando funções da biblioteca OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) versão 4,6. O OpenCV é uma biblioteca de código aberto é vem sendo amplamente utilizado por diversos autores em estudos relacionados ao reconhecimento de imagens, como Wu et al. (2015), Sajjad et al. (2020), Campos et al. (2015) e Ventura et al. (2016).

Figura 3.4: Esquemático do funcionamento do sistema proposto.

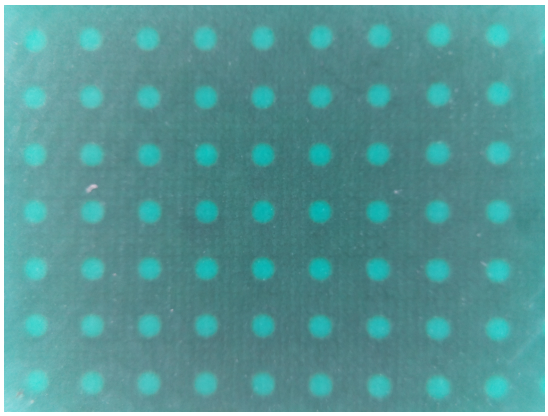


Fonte: Autor.

3.2 Calibração da lente da câmera

Como mencionado anteriormente para métodos de calibração que utilizam apenas um plano de captura (malha xadrez e malha de círculos), pelo estudo de Zhang et al. (2019), não se pode concluir que há uma diferença significativa entre eles. Os padrões em malha xadrez utilizados em testes preliminares apresentaram resultados insatisfatórios em relação ao padrão de malha circular, devido à dificuldade de se alcançar uma impressão de alta qualidade do padrão com dimensões pequenas (em torno de 10 mm). Dessa forma, neste trabalho foi utilizado um padrão de malha circular (Figura 3.5) com nove círculos na horizontal e sete na vertical. A distância, foi medida utilizando o microscópio óptico Olympus CX31, entre o centro dos círculos é de 0,992 ± 0,003 mm e o diâmetro dos círculos é igual a 0,405 ± 0,003 mm.

Figura 3.5: Captura de imagem da malha de círculos.



Fonte: Autor.

O programa detecta a localização dos círculos e seus pontos centrais na imagem capturada e compara com a localização encontrada através das medições no microscópio óptico através das Equações (2.2), (2.3) e (2.4). Dessas equações, para n pontos na imagem

com localizações conhecidas, ao resolver o sistema em função dos coeficientes de distorção, obtém-se um sistema sobredeterminado. Para o presente trabalho esse sistema foi resolvido utilizando a função “calibrateCamera” da biblioteca OpenCV, que utiliza o algoritmo de otimização global de Levenberg-Marquardt (MORE, 1977) para minimizar o erro de reprojeção dos n pontos da malha de círculos.

A matriz de parâmetros intrínsecos da câmera utilizada estão dispostos na Equação (3.1):

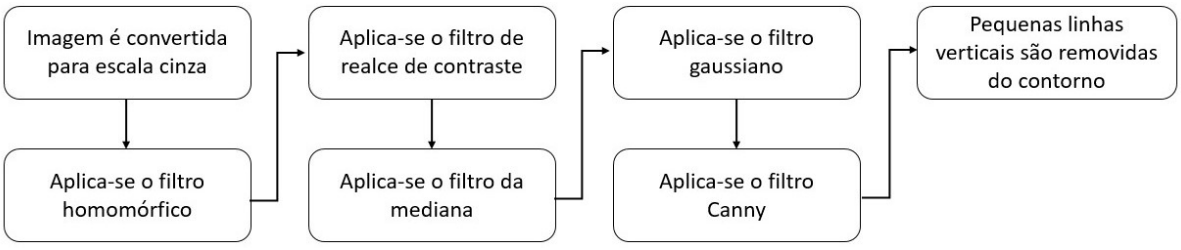
$$K = \begin{bmatrix} 2714.3 & 0 & 1640 \\ 0 & 2714.3 & 1232 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Com os coeficientes de distorção calculados pela calibração e os parâmetros dispostos na Equação (3.1) é possível realizar o processo de compensação da distorção da imagem capturada através da função “undistort” presente na biblioteca OpenCV, que realiza o remapeamento da imagem. Todas as imagens capturadas dos insertos tiveram sua distorção compensada para realização das medições.

3.3 Processamento da imagem e cálculo do desgaste de flanco

A sequência de processamento de imagem utilizada segue a ordem descrita no esquemático da Figura 3.6 e a função desenvolvida em linguagem Python que executa esse procedimento se encontra no Apêndice B tópico 1.

Figura 3.6: Sequência de processamento da imagem.

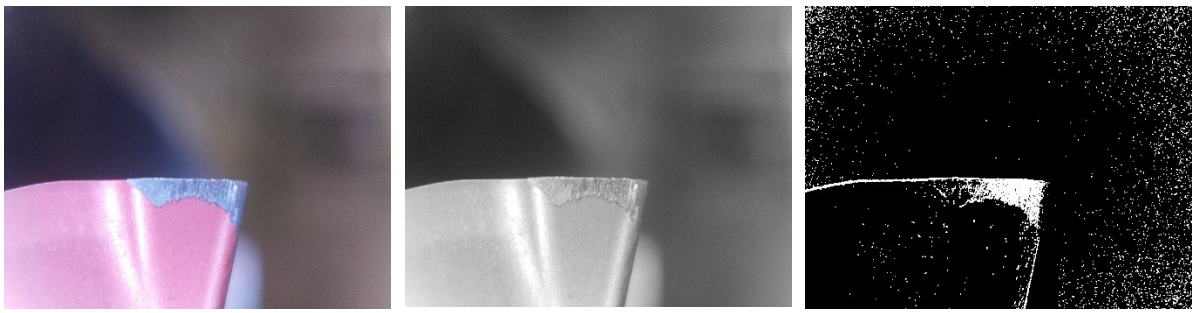


Fonte: Autor.

Primeiro, a imagem original tem sua distorção de lente corrigida como descrito na seção anterior (Figura 3.7a), então a mesma é convertida de RGB (*Red Green Blue*) para escala cinza (Figura 3.7b), com proporções de 0,299 para o vermelho, 0,587 para o verde e

0,114 para o azul. Esse passo se torna necessário para utilização somente da matriz de escala cinza, em vez de se utilizar uma matriz para cada cor primária, que totalizaria três matrizes. A Figura 3.7c mostra a imagem após aplicação do filtro Canny exemplificando que o processo de apenas transformar para escala cinza não seria o suficiente para identificação correta do contorno do desgaste devido ao ruído em toda imagem.

Figura 3.7: a) Imagem original do inserto 6-A com distorções de lente compensadas, b) imagem em escala cinza e c) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem.



(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

Após a conversão para a escala cinza é aplicado um filtro homomórfico (Figura 3.8a) que realça o contraste nas bordas da imagem, como o utilizado por You (2020). Se o processamento da imagem fosse interrompido nessa etapa, os objetos realçados no fundo da imagem teriam sido identificados pelo filtro Canny, impossibilitando a correta identificação da região de desgaste, como pode ser observado na Figura 3.8b. Para o cenário em que todas as etapas de processamento da imagem fossem realizadas, exceto a aplicação do filtro homomórfico o contorno não teria sido identificado completamente (Figura 3.8c).

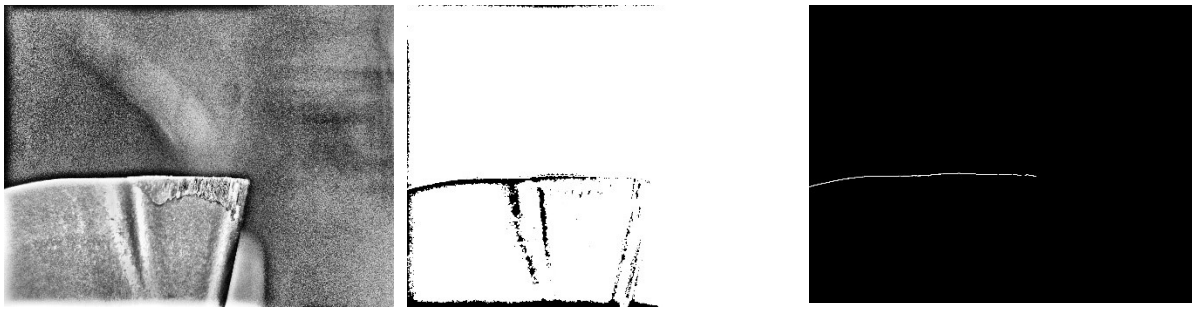
Figura 3.8: a) Imagem após aplicação do filtro homomórfico, b) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem e c) exemplo do resultado se o filtro homomórfico não fosse utilizado.

(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

Depois da aplicação do filtro homomórfico, aplica-se um filtro para realce do contraste da imagem (Figura 3.9a), que aumenta a diferença de intensidade entre os pixels através de uma equalização de histograma adaptativa, favorecendo a identificação do contorno. Se o processo fosse interrompido nessa etapa o filtro Canny identificaria contornos em diversos lugares indesejados, como mostra a Figura 3.9b. No caso de todas as etapas serem realizadas exceto o realce de contraste, a falta de contraste dificultaria a identificação do contorno do desgaste, como exibido na Figura 3.9c.

Figura 3.9: a) Imagem após aplicação do filtro de realce de contraste, b) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem e c) exemplo do resultado se o filtro de realce do contraste não fosse utilizado.



(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

A fim de remover o ruído impulsivo na imagem foi aplicado um filtro da mediana (Figura 3.10a), como o utilizado por Fernández-Robles et al. (2021) e Zhou; Yu (2021). A remoção do ruído favorece o destaque do objeto de interesse, como observado na Figura 3.10b, mas ainda não seria o suficiente. No cenário em que o processamento da imagem ocorresse sem o filtro da mediana, o ruído dificultaria a identificação correta da região de desgaste, como mostra a Figura 3.10c.

Figura 3.10: a) Imagem após aplicação do filtro da mediana, b) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem e c) exemplo do resultado se o filtro da mediana não fosse utilizado.

(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

Há a necessidade também da remoção do ruído aleatório e, para isso, se aplica um filtro gaussiano (Figura 3.11a), que foi utilizado também por Fernández-Robles et al. (2021). Como observado na Figura 3.11b o filtro remove o ruído que ainda permanecia mesmo após a aplicação do filtro da mediana, tornando a imagem mais limpa e com destaque na região desejada. Exemplificando para caso o processamento da imagem ocorresse sem o filtro gaussiano o ruído impossibilitaria identificação correta da região de desgaste, como mostra a Figura 3.11c.

Figura 3.11: a) Imagem após aplicação do filtro gaussiano, b) exemplo de filtro Canny aplicado na imagem e c) exemplo do resultado se o filtro gaussiano não fosse utilizado.

(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

O filtro Canny ainda identifica contornos de partes indesejadas e observou-se que essas partes formam linhas verticais pequenas. Como as linhas de interesse possuem uma maior extensão e estão na horizontal, foi criado um algoritmo que identifica linhas verticais (com proporção de um para largura e dois para altura) e pequenas (menores que 45 pixels de largura) e as elimina. A Figura 3.12 mostra o resultado final para a imagem de exemplo.

Figura 3.12: Contorno final após aplicação do filtro Canny e remoção de pequenas linhas.

Fonte: Autor.

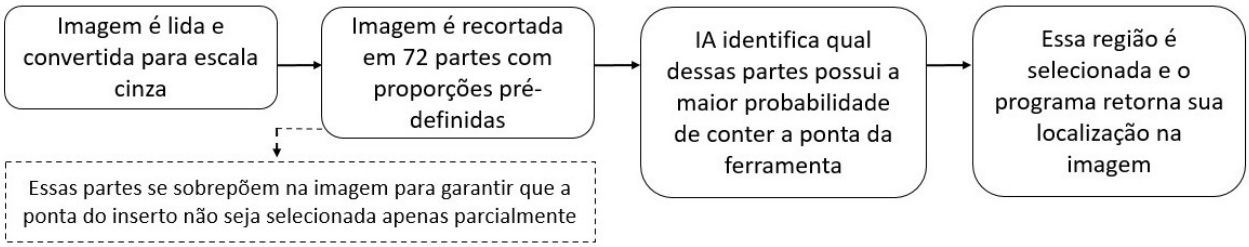
Para o segundo método de iluminação utilizado nesse trabalho, as três imagens

capturadas passam pela sequência de processamentos da imagem descrito acima. Os contornos das duas primeiras imagens são somados, é feito o processo de dilatação e erosão da imagem para que suas linhas sejam unidas e então o resultado é somado da mesma forma com a terceira imagem. Esse processo é muito mais simples que o utilizado por Pfeifer; Wiegers (2000) pois utiliza menos imagens e não realiza o processo de seleção dos contornos pelo grau de sobreposição, sendo realizado somente o processamento da imagem para remoção dos contornos indesejados. A função em linguagem Python desenvolvida que executa essa combinação de imagens se encontra no Apêndice B tópico 2.

Com o contorno devidamente identificado é feito recorte da imagem de forma que permaneça apenas a ponta da ferramenta. Esse recorte pode ser realizado manualmente ou através de uma inteligência artificial (IA) de classificação entre classes que varre a imagem e identifica se a região recortada é ou não uma ponta de ferramenta. Essa IA foi treinada através de uma técnica de aprendizado de máquina chamada transferência de aprendizado, na qual o conhecimento obtido por meio de uma tarefa ou conjunto de dados é usado para melhorar o desempenho do modelo em outra tarefa relacionada e/ou conjunto de dados diferente (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016). Então, com uma rede neural pré-treinada foram definidas as classes “ponta de ferramenta” e “não ponta de ferramenta”, para recortes das imagens capturadas com o sistema proposto. Por fim, o modelo Keras (KERAS, 2019) foi gerado utilizando a biblioteca de código aberto TensorFlow, que é uma biblioteca de aprendizado de máquina aplicável a uma ampla variedade de tarefas.

A Figura 3.13 mostra o esquemático do programa que realiza o corte utilizando a IA e no Apêndice B tópico 3 está o código em Python desenvolvido.

Figura 3.13: Esquemático do programa utilizado para recorte da ponta da ferramenta na imagem capturada.



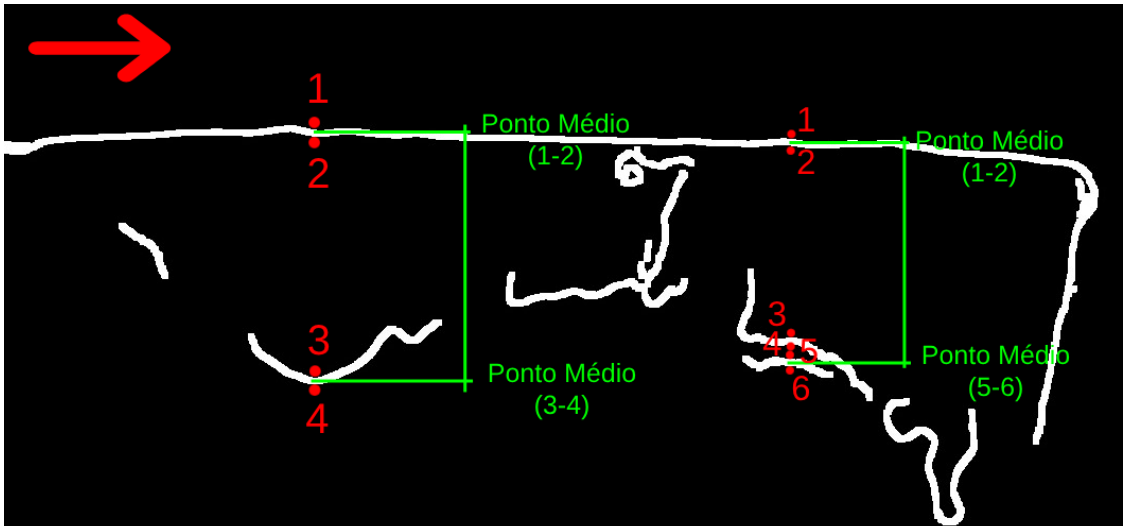
Fonte: Autor.

Foi utilizado o método por IA para todos insertos para os ensaios de bancada e no centro de usinagem. Para as medições repetidas, os pontos de recorte que já tinham sido encontrados pela IA foram inseridos manualmente, visto que a localização do inserto

permaneceu a mesma. Para a maioria dos insertos a proporção do recorte foi mantida em 1300 pixels de largura e 500 pixels de altura, para alguns foi necessário aumentar a altura para 700 pixels.

Com a região da ponta da ferramenta selecionada, a imagem é varrida da esquerda para direita medindo a distância vertical entre o contorno superior e o inferior do desgaste em pixels. O código desenvolvido localiza os pares de transição entre preto e branco na imagem para identificação da linha branca na imagem, como mostra a Figura 3.14. Para o primeiro exemplo de varredura mostrado à esquerda na Figura 3.14, foram identificados dois pares de transição entre preto e branco, para esse caso se considera a distância entre os pontos médios das duas linhas identificadas. Para o segundo exemplo de varredura mostrado à direita na Figura 3.14, foram identificados três pares de transição entre preto e branco, para esse caso se considera a distância entre os pontos médios da primeira e da última linha, o mesmo ocorreria para quatro ou mais linhas identificadas. Para o caso em que só uma linha é identificada nada acontece. Da média da distância entre essas linhas se obtém o desgaste de flanco médio, essa primeira média é utilizada como referência para eliminação de pontos muito distantes que o programa possa ter encontrado. Para isso, o código realiza uma varredura eliminando resultados três vezes maiores ou menores que a média de referência. Esse valor de três vezes foi baseado em testes preliminares e nos valores de referência da norma ISO 3685:2017 para vida da ferramenta, em que se utiliza valores de desgaste de flanco máximo duas vezes maiores que o desgaste de flanco médio.

Figura 3.14: Esquemático de como o código desenvolvido realiza as medições de distância vertical entre as linhas de contorno do desgaste.



Fonte: Autor.

Com o valor final entre as distâncias verticais calculadas em pixels, se multiplica pelo fator de escala do sistema para o cálculo do resultado em milímetros. Então, o programa exibe uma imagem do inserto com o desgaste grifado em amarelo, o resultado para desgaste de flanco máximo e onde o mesmo ocorre e o resultado para o degaste de flanco médio. A função em linguagem Python que realiza esse processo de medição do desgaste de flanco e exibição do resultado de forma gráfica se encontra no Apêndice B tópico 4.

O tamanho de pixel do sistema é obtido considerando o comprimento real do objeto e quantos pixels esse comprimento ocupa na imagem através da Equação (3.2) (THAKRE et al., 2019):

$$Px = \frac{comprimento[mm]}{número\,de\,pixels[pixel]} \tag{3.2}$$

Em que Px é o tamanho de pixel do sistema.

Para o sistema proposto, o cálculo da Equação (3.2) foi realizado através da medição das distâncias verticais e horizontais do centro dos círculos da malha de círculos da Figura 3.5, totalizando 110 leituras medidas. A distância em milímetros foi medida através de um microscópio óptico e a distância em pixels foi obtida pelo software após a correção da distorção de lente. O tamanho de pixel de cada uma das 110 leituras foi obtido e calculou-se a média e desvio-padrão das medições. Por fim, os resultados para desgaste de flanco médio e máximo encontrados nos ensaios utilizando o sistema proposto foram comparados com os resultados encontrados pelas medições realizadas no microscópio óptico Olympus CX31 através do teste de erro normalizado (Equação (2.11)), que utiliza o resultado de medição o resultado de referência e suas incertezas expandidas associadas.

Para os resultados de desgaste de flanco médio e máximo, a incerteza expandida foi calculada pela incerteza-padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência obtido pela tabela *t-student* considerando uma probabilidade de abrangência de 95,45%. Para as medições realizadas no microscópio considerou-se a repetição da medição quatro vezes (incerteza do tipo A com distribuição normal) e a resolução do instrumento (incerteza do tipo B com distribuição uniforme) para o cálculo da sua incerteza. O cálculo foi feito de acordo com a Equação (3.3), em que U é a incerteza expandida para as medições no microscópio, *s* é o desvio-padrão das quatro medições e *k* é o fator de abrangência obtido da tabela *t-student.*

$$U = \sqrt{\left(\frac{s}{\sqrt{4}}\right)^2 + \left(\frac{0{,}0005}{\sqrt{3}}\right)^2} . k \tag{3.3}$$

Para o sistema proposto foi realizado o cálculo das incertezas fracionárias. Como o resultado em milímetros é dado pela multiplicação entre o desgaste encontrado pelo programa em pixels e o tamanho de pixel em mm/pixel, tem-se a incerteza (δu) dada pelas Equações (3.4) e (3.5):

$$\frac{\delta u}{|TP . D|} = \frac{\delta TP}{|TP|} + \frac{\delta D}{|D|} \tag{3.4}$$

$$(\delta u)^2 = (D . \delta TP)^2 + (TP . \delta D)^2 \tag{3.5}$$

Em que TP é o tamanho de pixel em mm/pixel, δTP a incerteza relacionada a esse tamanho de pixel, D é o desgaste de flanco em pixels e δD a incerteza relacionada a esse desgaste de flanco.

Para a incerteza do tamanho de pixel considerou-se a resolução do microscópio que foi utilizado na medição da malha de círculos (Figura 3.5) e a repetição da medição do tamanho de pixel para cada uma das 110 distâncias verticais e horizontais entre os pontos da malha de círculos. E para a incerteza do desgaste de flanco foi considerado a incerteza combinada da repetição da medição (incerteza do tipo A com distribuição normal), resolução do sistema (incerteza do tipo B com distribuição uniforme), a incerteza de detecção de bordas relativo ao preenchimento completo ou não de um pixel da borda (incerteza do tipo B com distribuição uniforme).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados e discutidos os resultados encontrados. Inicialmente são abordados os resultados da calibração de lente realizada e qual tamanho de pixel calculado, posteriormente são mostrados os resultados utilizados como referência obtidos através do microscópio. Então essas medições são comparadas com as obtidas através do sistema proposto e, por fim, é feita a comparação entre o presente trabalho e de outros autores que também utilizaram visão computacional para medição de desgaste de ferramentas de corte.

4.1 Calibração de lente e tamanho de pixel

Foi utilizada a malha de círculos da Figura 3.5 para se calcular os coeficientes de distorção das Equações (2.3) e (2.4), resultando na Tabela 4.1. A calibração foi realizada tanto para o ensaio no centro de usinagem quanto para o ensaio de bancada por não ser possível garantir exatamente as mesmas condições para ambos os ensaios. Como se observa pelos coeficientes de distorção tangencial (p_1 e p_2) o alinhamento entre a câmera e plano de captura não se mantiveram iguais o que pode ter influenciado também nos coeficientes de distorção radial.

Tabela 4.1: Coeficientes de distorção calculados.

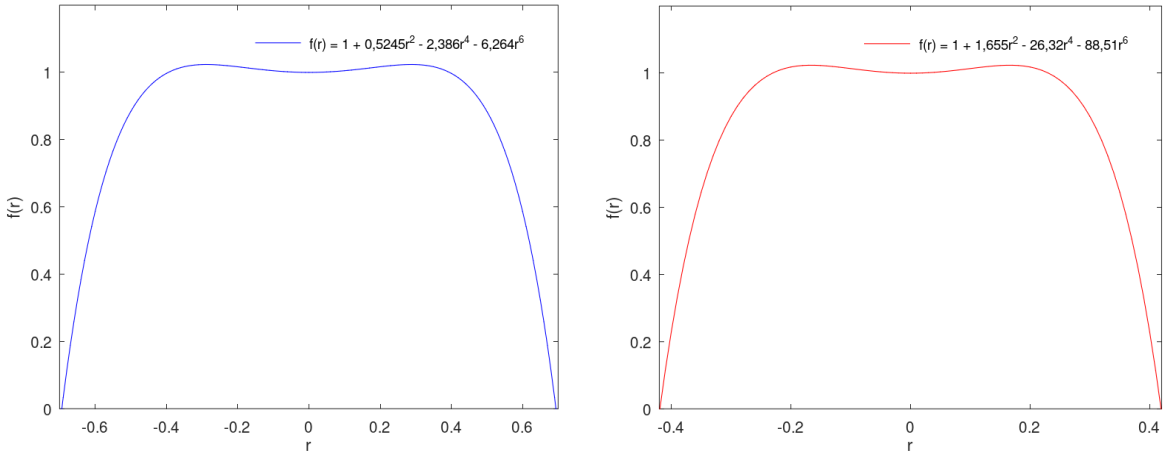
Coeficiente	Ensaio no centro de usinagem	Ensaio na bancada
k_1	1,655	0,5245
k_2	-26,32	-2,386
k_3	-88,51	-6,264
p_1	-3,500E-03	2,120E-03
p_2	-1,203E-03	2,959E-04

A Figura 4.1 mostra os coeficientes de distorção radiais aplicados a uma função do tipo $f(r) = 1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6$, que expressa de forma visual como ocorre a distorção radial. Apesar de apresentar raízes diferentes, para ambos ensaios o comportamento da curva entre as raízes se manteve semelhante, com a região central côncava para cima e a as regiões laterais côncavas para baixo.

As imagens da Figura 4.2 mostram a aplicação da compensação de distorção em uma malha quadriculada, a fim de se observar os efeitos dessa compensação. A diferença entre a dimensão dos coeficientes de distorção radial se deve a distância entre a câmera e o plano foco, que ficaram levemente diferentes para os dois ensaios. Porém, o comportamento dos

coeficientes se manteve com k_1 positivo e k_2 e k_3 negativos, gerando uma compensação de deformação muito semelhante como se observa na Figura 4.2b e 4.2c.

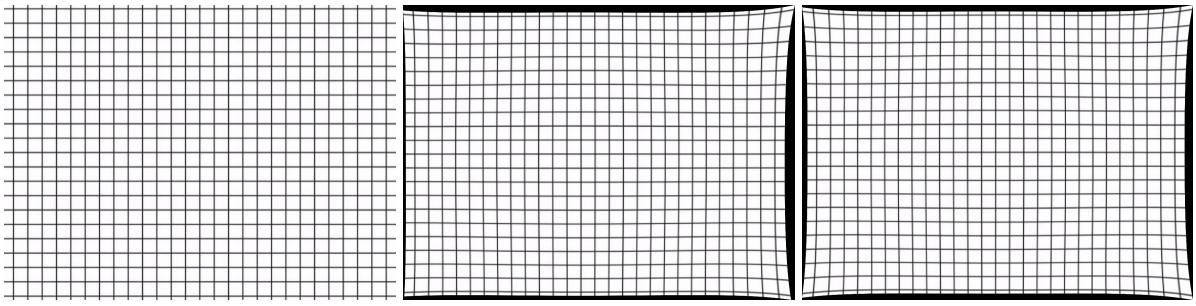
Figura 4.1: Gráfico que representa a distorção radial para os coeficientes calculados no ensaio na bancada (azul) e no ensaio no centro de usinagem (vermelho).



Fonte: Autor.

A distorção é mais visível na região periférica da imagem e dado os coeficientes de distorção encontrados dispostos na Tabela 4.1 e pelas Equações (2.3) e (2.4) para a distorção radial tem-se como resultado uma curva decrescente, indicando uma distorção do tipo barril. Dessa forma sua compensação é feita com uma distorção do tipo almofada de alfinetes, como se observa na Figura 4.2b e 4.2c.

Figura 4.2: a) Malha quadriculada sem distorção, b) malha quadriculada com compensação de distorção utilizando coeficientes calculados no ensaio de bancada e c) malha quadriculada com compensação de distorção utilizando coeficientes calculados no ensaio no centro de usinagem.



(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

Também foram medidas as distâncias verticais e horizontais do centro dos círculos da

malha de círculos da Figura 3.5 para se determinar o tamanho de pixel. A distância em milímetros foi medida através de um microscópio óptico resultando em uma média de 0,992 mm e desvio padrão amostral de 0,003 mm e a distância em pixels foi obtida pelo software através da imagem após a correção da distorção de lente, resultando em um tamanho de pixel de 0,002947 mm/pixel com desvio padrão amostral de $5,85*10^{-5}$ mm/pixel para o ensaio no centro de usinagem e 0,002776 mm/pixel com desvio padrão amostral de $7,03*10^{-5}$ mm/pixel para o ensaio de bancada.

4.2 Medições utilizando o microscópio

Os resultados para desgastes de flancos utilizados como referência foram obtidos através de quatro medições utilizando um microscópio óptico Olympus CX31 (de resolução igual a um micrometro) e a média dessas medições se encontram na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados de medição obtidos através do microscópio óptico.

Inserto		Desgaste de flanco [mm]				Inserto		Desgaste de flanco [mm]			
		VB_{max}	U_{VBmax}	VB_B	U_{VBB}			VB_{max}	U_{VBmax}	VB_B	U_{VBB}
1	A	0,307	0,007	0,166	0,005	6	A	0,816	0,004	0,579	0,010
	B	0,367	0,009	0,358	0,006		B	0,143	0,004	0,107	0,006
2	A	0,841	0,009	0,602	0,020		C	0,254	0,006	0,183	0,004
	B	1,166	0,010	1,020	0,011	7	A	0,319	0,004	0,264	0,004
	C	1,433	0,016	1,305	0,047	8	A	0,487	0,008	0,188	0,012
	D	0,466	0,008	0,288	0,008		B	0,550	0,011	0,368	0,027
3	A	0,857	0,009	0,647	0,025		D	0,498	0,005	0,247	0,004
	B	1,053	0,015	0,871	0,021	9	A	0,378	0,004	0,193	0,017
	C	0,326	0,013	0,130	0,006	10	A	0,244	0,005	0,152	0,006
	D	0,453	0,002	0,332	0,006	11	A	0,218	0,005	0,152	0,004
4	A	0,160	0,004	0,110	0,013		B	0,463	0,006	0,359	0,012
	C	0,251	0,003	0,145	0,011	12	A	0,335	0,006	0,253	0,002
	D	0,128	0,008	0,086	0,006		C	0,625	0,006	0,453	0,008
5	A	0,151	0,007	0,085	0,005						
	B	0,317	0,005	0,255	0,009						
	C	0,064	0,004	0,041	0,005						
	D	0,315	0,016	0,258	0,011						

A incerteza expandida (U) é mostrada na Tabela 4.2 e seu cálculo foi realizado

considerando a resolução do microscópio (incerteza do tipo B com distribuição uniforme) e a repetição da medição de quatro vezes (incerteza do tipo A com distribuição normal). O fator de abrangência utilizado foi referente a uma probabilidade de abrangência de 95,45%. Então, tendo como referência as medições da Tabela 4.2 realizadas no microscópio, foi realizado o teste de erro normalizado para todas medições utilizando o sistema proposto, que é mostrado no próximo tópico.

4.3 Medições utilizando o sistema proposto

Em testes preliminares com a utilização dos LEDs sem um difusor de luz ocorreram problemas de superexposição, tornando a realização da medição difícil ou impossível para algumas imagens. Dessa forma, os resultados foram obtidos com a utilização de um difusor de papel no formato do conjunto de LEDs.

Os resultados do ensaio realizado no centro de usinagem para desgaste de flanco máximo e médio foram obtidos através da repetição da medição em três vezes para cada inserto. Dessa forma, o resultado foi dado pela média dessas medições e para esta média foi calculado o desvio-padrão, que posteriormente foi utilizado nos cálculos das incertezas de medição.

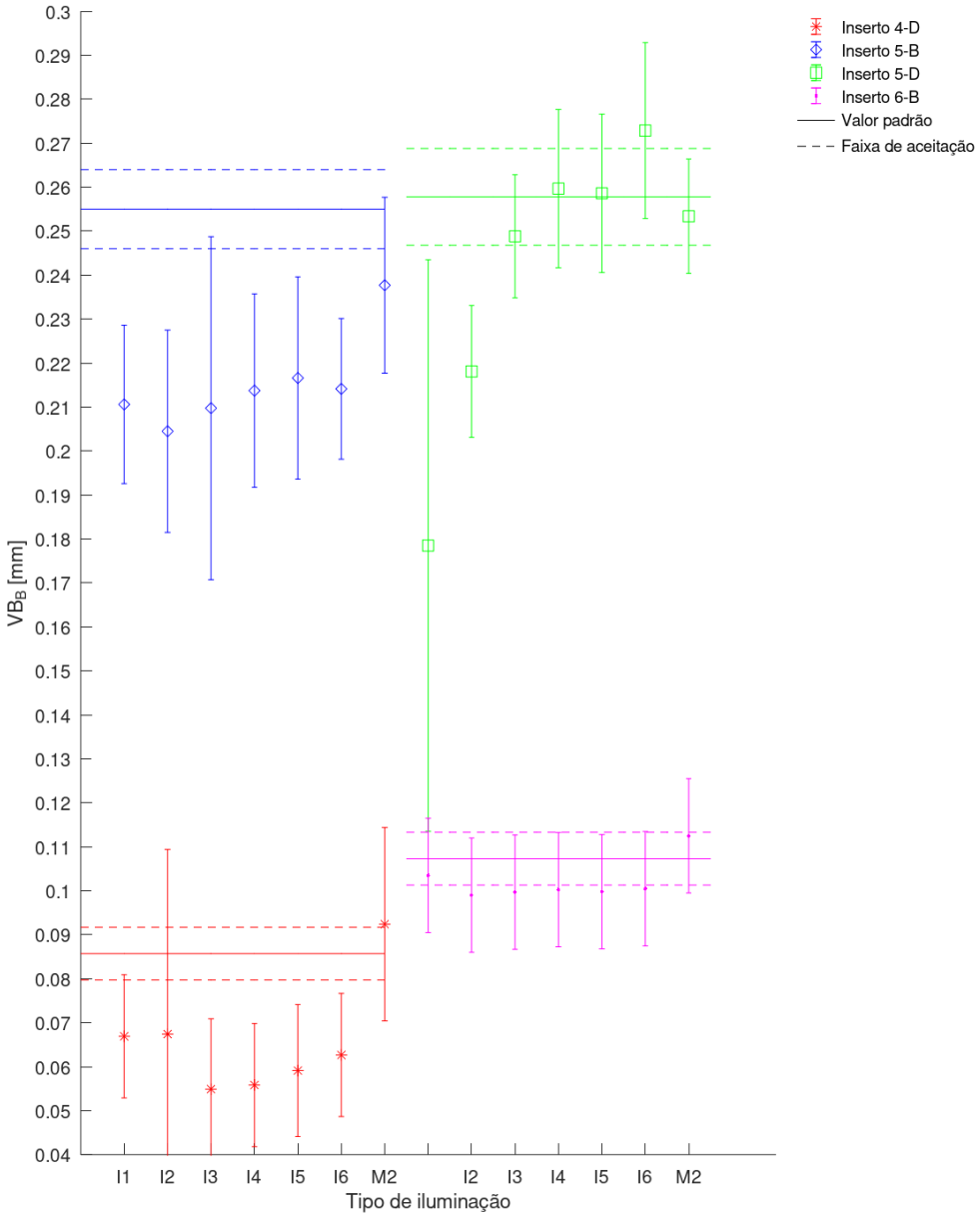
A incerteza expandida (U) foi calculada considerando a incerteza do tamanho de pixel (em mm/pixel) e a incerteza do desgaste (em pixel). Para a incerteza do desgaste foi considerado a incerteza do preenchimento de um pixel da borda (incerteza do tipo B com distribuição uniforme) e a repetição da medição de três vezes (incerteza do tipo A com distribuição normal). O fator de abrangência utilizado foi referente a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

Os gráficos das Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 e as Tabelas 4.3 e 4.4 exibem os resultados para desgaste de flanco utilizando o sistema de visão computacional. A intensidade de iluminação mostrada nas tabelas e gráficos do primeiro método de iluminação varia de 1 a 6, sendo o dado de entrada da intensidade na biblioteca do LED um valor de 0 a 255, dessa forma as intensidades utilizadas foram de 10, 30, 80, 150, 200 e 255. Para os gráficos e tabelas a seguir foram utilizadas as notações de I1, I2, I3, I4, I5 e I6 para indicar os diferentes níveis de intensidades de iluminação do primeiro método de iluminação e a notação M2 para indicar a utilização do segundo método de iluminação.

Os gráficos das Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 exibem os resultados obtidos através das medições no centro de usinagem, para as arestas primárias e secundárias dos insertos 4, 5, 6 e

12. O eixo das ordenadas mostra o desgaste de flanco em milímetros e o eixo das abscissas indica a iluminação utilizada. As linhas horizontais nos gráficos são referentes ao resultado obtido pelo microscópio, sendo a linha contínua o resultado e a tracejada a incerteza expandida relativa a esse resultado. Os insertos são diferenciados pela cor e símbolo de acordo com a legenda de cada gráfico, sendo o resultado da medição indicado pela posição central do seu simbolo e a incerteza expandida indicada pela cota que acompanha o símbolo.

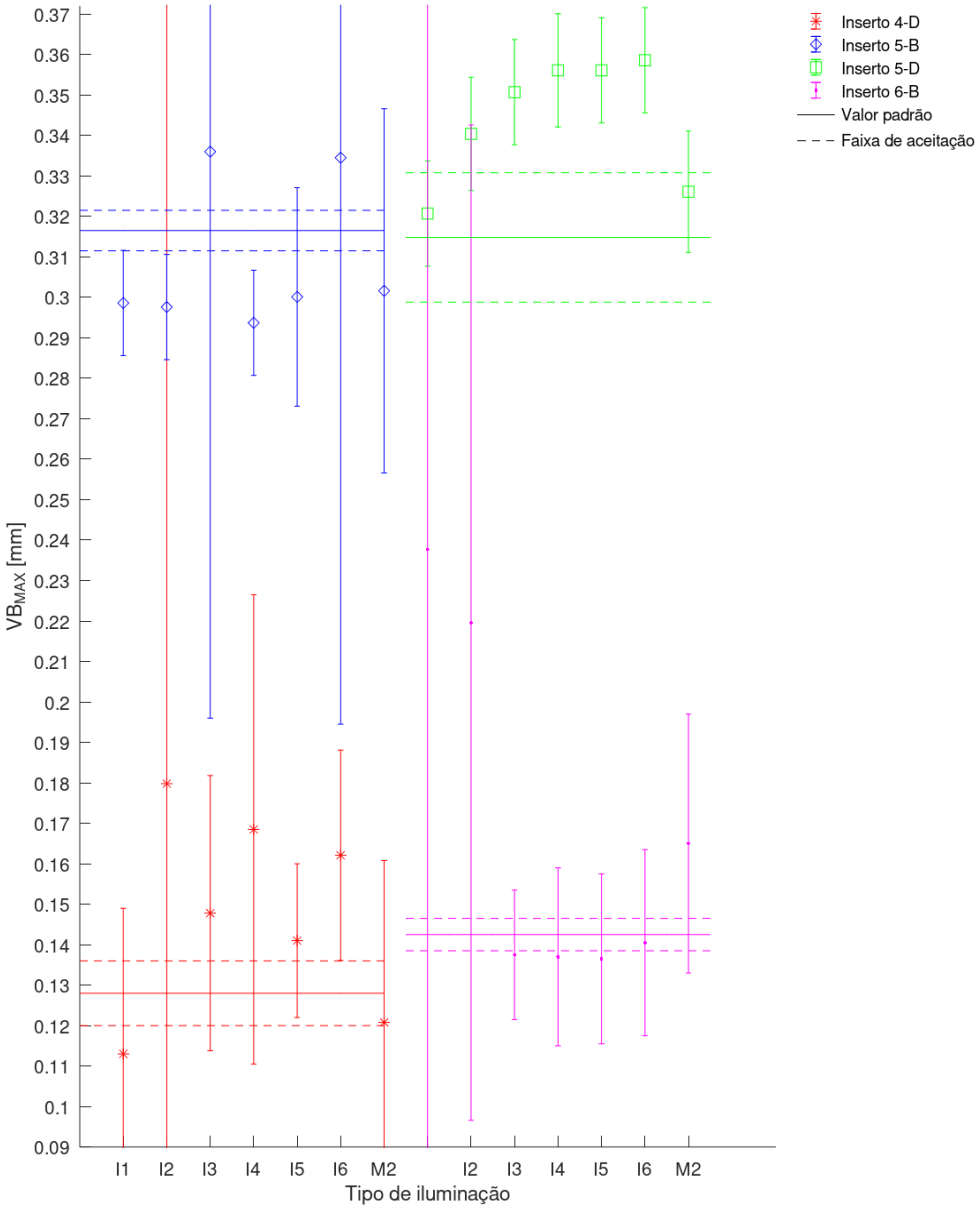
Figura 4.3: Resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem para desgaste de flanco médio (VB_B) das arestas de corte primárias.



Fonte: Autor.

As Figuras 4.3 e 4.4, mostram os resultados para as arestas de corte primárias no ensaio no centro de usinagem. Para o segundo método de iluminação os resultados estiveram dentro da faixa de aceitação em 100% das medições segundo o teste de erro normalizado. Já para o primeiro método de iluminação os melhores resultados tiveram 50% de acertos para o desgaste de flanco médio e 75% de acertos para o desgaste de flanco máximo.

Figura 4.4: Resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem para desgaste de flanco médio ($VB_{MÁX}$) das arestas de corte primárias.



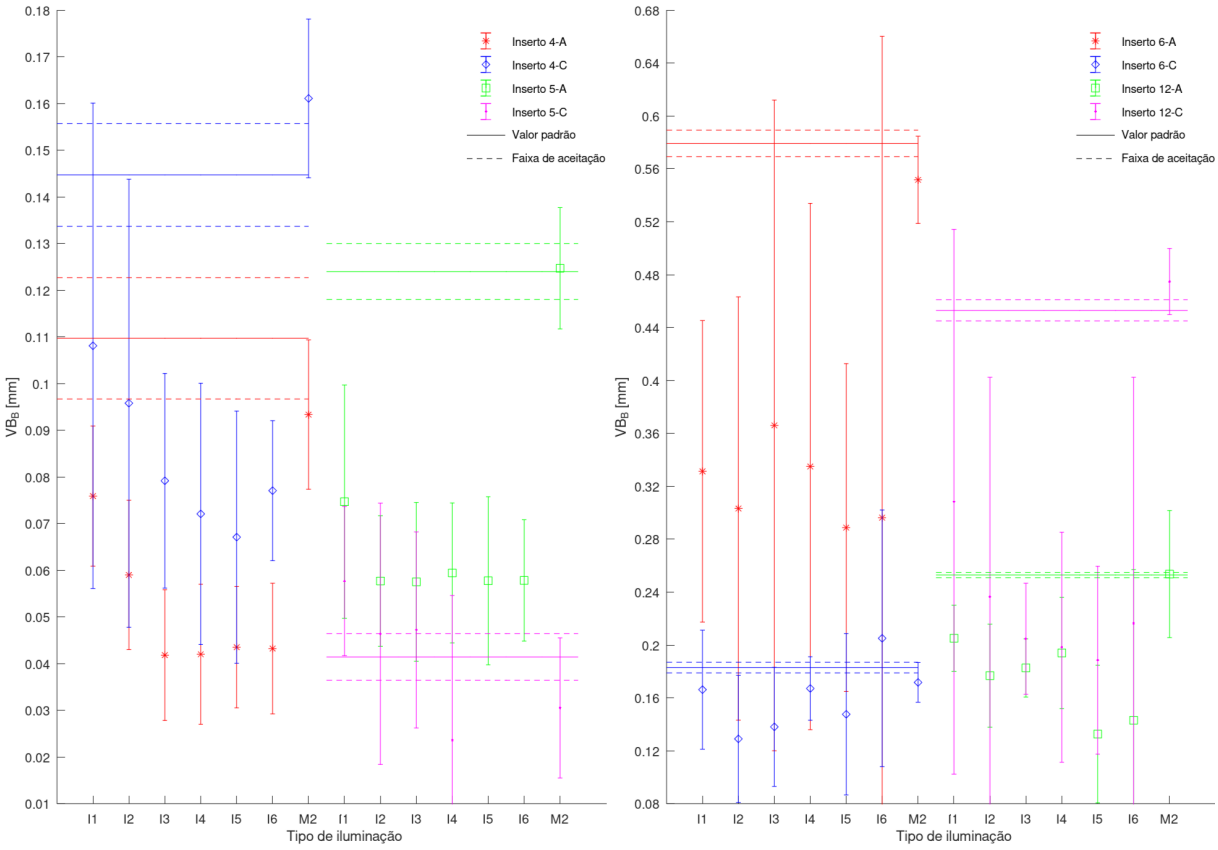
Fonte: Autor.

As Figuras 4.5 e 4.6, mostram os resultados para as arestas de corte secundárias no

ensaio no centro de usinagem, que também são dados importantes que influenciam na qualidade da superfície da peça usinada e agrega mais resultados testados para o sistema proposto. E para esses resultados o segundo método de iluminação continuou se mostrando mais vantajoso que o primeiro.

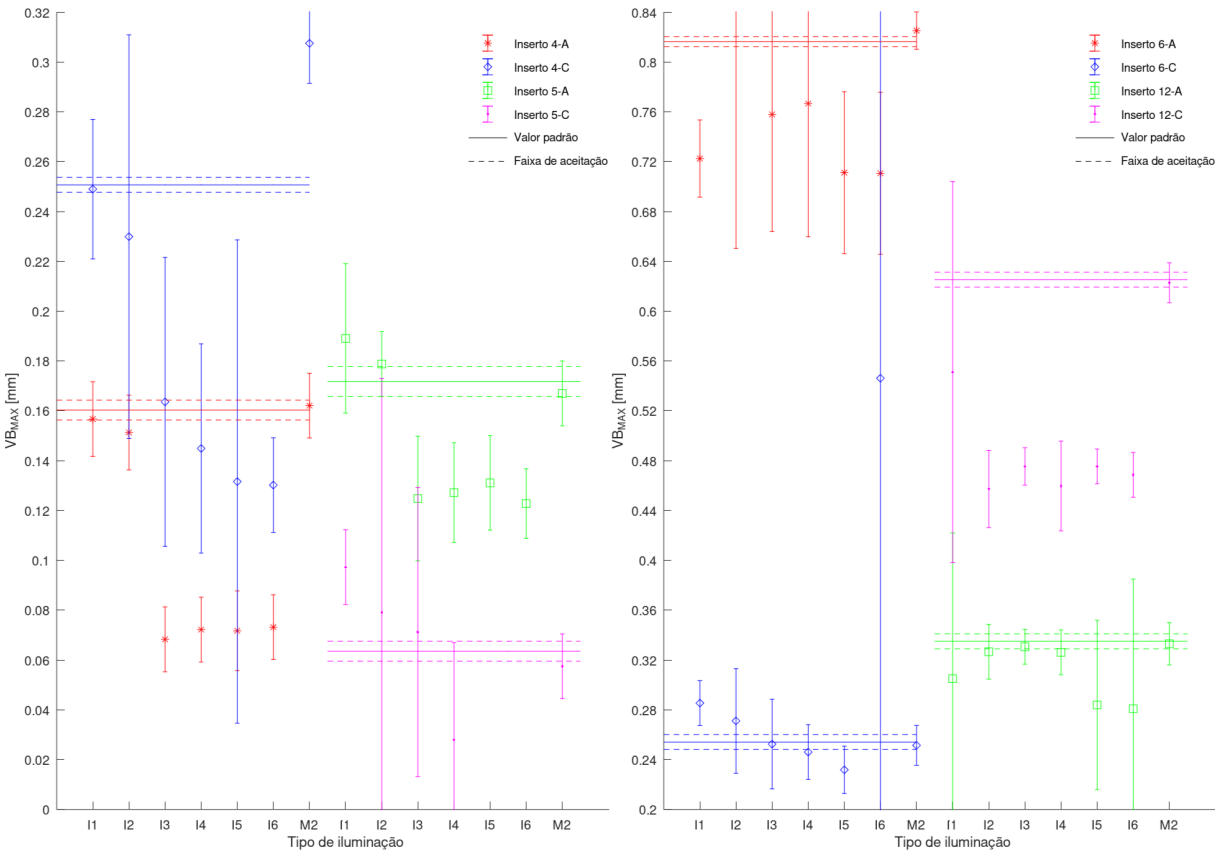
Outro importante fator observado pelas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 foi a maior dispersão de resultados do primeiro método em relação ao segundo para a repetição de medições do mesmo inserto, que gerou uma incerteza de medição superior, indicando uma maior confiabilidade do segundo método em relação ao primeiro. Para mais detalhes dos valores utilizados nos gráficos das Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, as Tabelas A.1, A.2 e A.3 do Apêndice A mostram os resultados numéricos obtidos no ensaio no centro de usinagem.

Figura 4.5: Resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem para desgaste de flanco médio (VB_B) das arestas de corte secundárias.



Fonte: Autor.

Figura 4.6: Resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem para desgaste de flanco máximo ($VB_{MÁX}$) das arestas de corte secundárias.

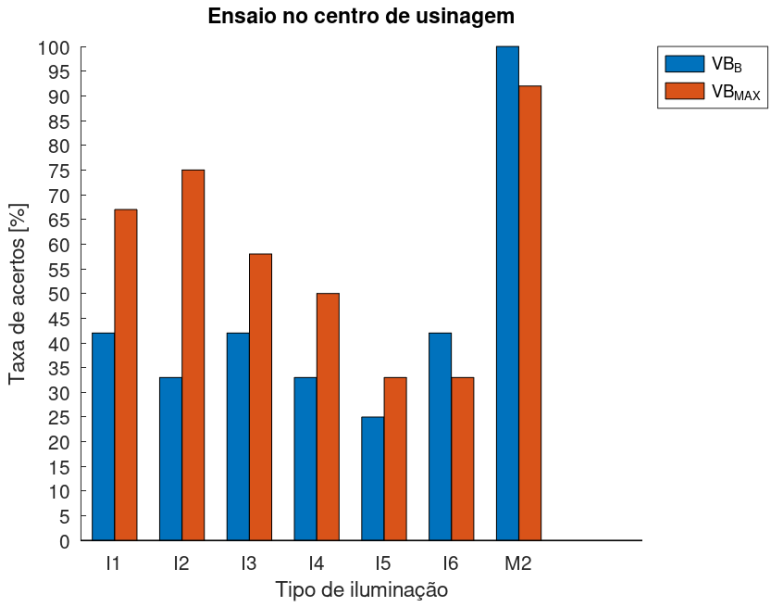


Fonte: Autor.

Da Figura 4.7, para o ensaio no centro de usinagem considerando os resultados de arestas primárias e secundárias, o desgaste de flanco médio (VB_B) calculado pelo segundo método de iluminação esteve dentro da faixa de aceitação em 100% das medições realizadas segundo o teste de erro normalizado. Já o primeiro método de iluminação, para as intensidades de iluminação de um a seis, obteve-se respectivamente 42%, 33%, 42%, 33%, 25% e 42% de acertos segundo o teste de erro normalizado. Indicando que o segundo método de iluminação possui melhores resultados para o desgaste de flanco médio.

Para os resultados de desgaste de flanco máximo ($VB_{MÁX}$) (Figura 4.7) o segundo método de iluminação se manteve superior ao primeiro método, com 92% de aceitação segundo o teste de erro normalizado. Já o primeiro método, para as intensidades de iluminação de um a seis, obteve-se respectivamente 67%, 75%, 58%, 50%, 33% e 33% de acertos segundo o teste de erro normalizado. Indicando que o segundo método de iluminação possui melhores resultados e o primeiro método é mais assertivo no segundo nível de intensidade de iluminação para os resultados de desgaste de flanco máximo.

Figura 4.7: Comparação entre as taxas de acertos para os diferentes tipos de iluminação testados no ensaio no centro de usinagem.



Fonte: Autor.

Os resultados do ensaio realizado em bancada para desgaste de flanco máximo e médio foram obtidos através de uma medição para cada inserto. O cálculo da incerteza expandida foi realizado de forma similar ao ensaio no centro de usinagem, porém como não houve a repetição da medição para o ensaio na bancada a repetibilidade utilizada teve como referência o ensaio no centro de usinagem. Dessa forma, para o segundo método de iluminação a maior incerteza calculada foi utilizada como referência para o cálculo de incerteza do tipo A relacionada a repetibilidade. Já para o primeiro método de iluminação, em que houve casos com a incerteza muito acima da média, foi utilizado a maior incerteza obtida no ensaio no centro de usinagem, desconsiderando esses casos de incertezas muito acima da média.

A incerteza expandida se manteve igual para todos resultados do primeiro método de iluminação, sendo igual a 0,067 mm para VB_B e 0,118 mm para $VB_{MÁX}$. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram os resultados obtidos no ensaio de bancada e os valores em negrito foram aprovados segundo o teste de erro normalizado, comparados aos resultados de referência da Tabela 4.2. Da Tabela 4.3 e Figura 4.9, para o primeiro método de iluminação, observa-se que dos resultados de desgaste de flanco médio e máximo o segundo nível de intensidade de iluminação obteve os melhores resultados, assim como no ensaio realizado no centro de usinagem para $VB_{MÁX}$.

Tabela 4.3: Resultados do desgaste de flanco médio (VB_B) e máximo ($VB_{MÁX}$) obtidos no ensaio de bancada utilizando o primeiro método de iluminação.

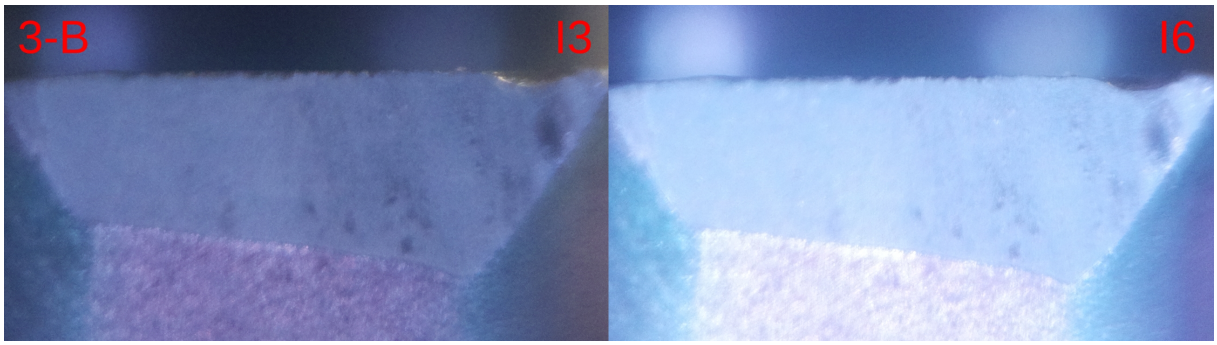
Inserto		$VB_{MÁX}$ [mm]						VB_B [mm]					
		Intensidade de iluminação						Intensidade de iluminação					
		I1	I2	I3	I4	I5	I6	I1	I2	I3	I4	I5	I6
1	A	0,3914	0,3831	0,1777	0,1721	0,1735	0,4802	**0,1442**	**0,09840**	**0,05880**	**0,05477**	**0,04893**	**0,08349**
	B	0,4955	0,5774	0,1610	0,1763	0,1874	0,6052	**0,2618**	**0,2515**	0,05132	0,05249	0,05257	0,1722
2	A	0,9369	1,280	1,187	0,1874	**0,8397**	0,1305	0,3721	0,4816	0,3639	0,1241	0,2928	0,1074
	B	**1,213**	**1,205**	**1,216**	1,369	1,288	1,271	**0,9263**	**0,9035**	0,8600	0,8669	0,6351	0,5932
	C	1,575	0,1957	0,1846	**1,405**	1,582	1,550	1,073	0,06434	0,05458	0,2053	0,3644	0,4959
	D	**0,5288**	**0,5302**	0,5344	0,5816	0,3151	0,2485	**0,3146**	**0,2288**	**0,2503**	**0,1927**	0,09860	0,08177
3	A	1,047	1,058	1,122	1,441	0,6413	1,031	0,3219	**0,6044**	0,3952	0,4894	0,2702	**0,5759**
	B	**1,117**	**1,101**	1,138	0,9300	0,04719	-	**0,7576**	**0,7817**	**0,7974**	0,6224	0,08174	-
	C	**0,2818**	**0,3470**	**0,3706**	**0,3498**	**0,3817**	**0,3609**	**0,1053**	**0,1176**	**0,1276**	**0,1014**	**0,09385**	**0,08505**
	D	0,8869	0,6940	**0,4941**	1,123	1,026	0,2346	**0,3404**	**0,2777**	**0,2402**	**0,2885**	**0,2965**	0,09240
4	A	**0,1624**	**0,1582**	0,2582	**0,1083**	**0,1194**	**0,1444**	**0,05681**	**0,05556**	**0,05127**	**0,05394**	**0,05346**	**0,06126**
	C	0,1749	**0,2304**	**0,2790**	**0,2915**	**0,2387**	**0,3137**	**0,05121**	**0,0556**	**0,06677**	**0,07390**	**0,08656**	**0,06916**
	D	0,2901	0,2429	0,2526	**0,1596**	**0,1763**	**0,1166**	**0,06493**	**0,05518**	**0,04165**	**0,04887**	**0,05452**	**0,04836**
5	A	**0,08606**	**0,1055**	**0,1138**	**0,1277**	**0,1638**	**0,1943**	**0,04641**	**0,05274**	**0,05912**	**0,06614**	**0,07765**	**0,08467**
	B	**0,3414**	0,6190	0,6746	**0,3623**	0,6871	0,6579	**0,1937**	**0,2047**	**0,2144**	**0,1406**	**0,2125**	**0,2711**
	C	0,1346	**0,1221**	**0,1055**	**0,07218**	0,1610	0,6024	**0,03221**	**0,02849**	**0,02786**	**0,02868**	**0,02846**	**0,05573**
	D	0,7523	0,6607	0,6343	0,3845	0,4011	0,4053	**0,2577**	**0,2653**	**0,2446**	**0,2206**	**0,2931**	**0,2988**
6	A	0,1943	0,9133	0,9119	**0,7773**	1,080	0,9383	0,05388	0,3047	0,4234	0,3715	**0,5869**	**0,6408**
	B	**0,1180**	**0,1083**	**0,1110**	**0,1291**	**0,1319**	0,2193	**0,03686**	**0,04897**	**0,04662**	**0,07980**	**0,08588**	**0,09652**
	C	**0,3067**	**0,2984**	0,3317	0,4303	0,4733	**0,2998**	**0,1357**	**0,1427**	**0,1360**	**0,1661**	**0,1578**	**0,1480**
7	A	**0,3137**	0,4081	0,7912	**0,3428**	0,7801	0,3914	**0,2016**	**0,1639**	**0,2122**	**0,1465**	**0,2544**	**0,2842**
8	A	**0,5385**	**0,5441**	**0,5163**	0,4011	0,2734	0,2526	0,3667	**0,1787**	**0,1686**	**0,1059**	**0,08466**	0,06768
	B	0,2443	0,6871	0,6829	0,4608	**0,6121**	0,6302	0,1247	0,1722	0,2243	0,1147	0,2130	0,2215
	D	0,7648	**0,5302**	**0,5191**	**0,5552**	**0,5413**	**0,5441**	0,4293	0,4548	**0,2729**	0,3973	0,4925	0,5181
9	A	0,09716	**0,3873**	**0,3775**	0,2179	0,2249	0,2193	0,07074	**0,1517**	**0,1864**	**0,1625**	**0,1669**	**0,1632**
10	A	0,4344	**0,2387**	**0,2110**	**0,2124**	**0,2040**	**0,2193**	**0,1429**	**0,1513**	**0,1549**	**0,1518**	**0,1372**	**0,1437**
11	A	**0,2776**	**0,2124**	0,2873	0,3012	0,3054	0,3067	**0,0761**	**0,1015**	**0,1148**	**0,1158**	**0,1124**	**0,1949**
	B	0,3914	**0,5274**	0,3498	0,3456	0,2762	0,5885	0,2344	0,2054	0,1316	0,1935	0,1728	**0,2544**
12	A	0,4122	0,4206	0,4247	0,4192	0,4275	0,4192	**0,2007**	**0,2359**	**0,2404**	**0,2208**	**0,1845**	**0,1874**
	C	0,7287	0,7329	0,6954	1,388	0,7356	**0,6315**	**0,4391**	0,3167	0,2914	**0,4697**	**0,4680**	**0,4079**

A Tabela 4.3 e Figuras 4.7 e 4.9 mostram que o segundo nível de intensidade de iluminação apresentou melhores resultados. E, como já mencionado anteriormente, a luz muito intensa pode causar uma superexposição na imagem gerando perdas de informação e uma intensidade muito baixa pode dificultar a visualização da cena. Para o inserto 3-B, por exemplo, como mostrado nas Tabelas 4.3 não foi possível detectar o contorno do desgaste no nível seis de iluminação, devido a perda de informação causada por superexposição.

A Figura 4.8 mostra à esquerda a imagem para o nível três de iluminação que obteve o

resultado correto para o desgaste de flanco médio e à direita a imagem que não obteve nenhum resultado, pois a superexposição na parte inferior do desgaste dificultou a identificação do contorno pelo programa. Para diferentes ambientes é esperado que exista diferentes condições de iluminação de cada cenário que será mais adequado para um determinado tipo de inserto, já que suas cores ou tipos de desgaste podem influenciar no contraste e brilho da imagem.

Figura 4.8: Imagens do inserto 3-B utilizadas na obtenção do desgaste de flanco, para os níveis três (a esquerda) e seis (a direita) de iluminação.



Fonte: Autor.

Para o segundo método de iluminação não houve o mesmo problema de superexposição descrito acima. A Tabela 4.4 mostra os resultados para o segundo método de iluminação, com uma taxa de acertos de 27% para $VB_{MÁX}$ e 73% para VB_B segundo o teste de erro normalizado (Figura 4.9).

A Figura 4.9 mostra a comparação entre as taxas de acertos para o uso dos diferentes métodos de iluminação. Para o desgaste de flanco médio os resultados foram semelhantes, tendo o nível de iluminação mais bem-sucedido do primeiro método alcançado 77% na taxa de acertos e o segundo método 73%. Já para o desgaste de flanco máximo o nível de iluminação mais bem-sucedido do primeiro método alcançou 53% na taxa de acertos, enquanto o segundo método obteve 27% na taxa de acertos.

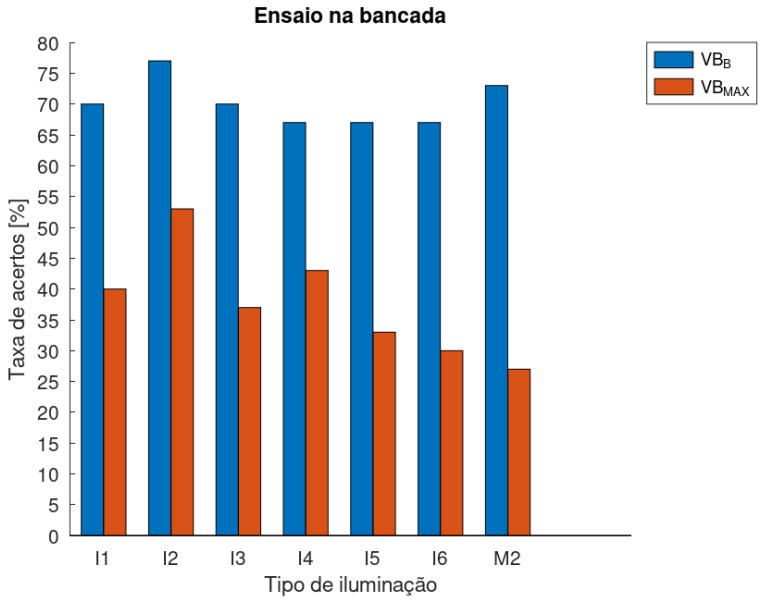
Pelo teste de erro normalizado o primeiro método de iluminação obteve os melhores resultados. Porém, a incerteza expandida do primeiro método de iluminação calculada para o ensaio de bancada foi muito superior ao segundo método de iluminação, o que favoreceu o método no teste de erro normalizado. Então, foi analisado também a média do erro relativo entre as medições do microscópio e do ensaio de bancada, resultando em uma média do erro relativo de 31% para VB_B e $VB_{MÁX}$ do segundo nível de iluminação do primeiro método e 9% para VB_B e 14% para $VB_{MÁX}$ do segundo método de iluminação. Ou seja, o segundo método

de iluminação também mostrou melhores resultados que o primeiro para o ensaio de bancada. Os resultados detalhados do erro relativo são apresentados na Tabela A.4 do Apêndice A.

Tabela 4.4: Resultados obtidos no ensaio de bancada utilizando o segundo método de iluminação.

Inserto		Desgaste de flanco [mm]				Inserto		Desgaste de flanco [mm]			
		$VB_{MÁX}$	$U_{VBMÁX}$	VB_B	U_{VBB}			$VB_{MÁX}$	$U_{VBMÁX}$	VB_B	U_{VBB}
1	A	**0,3137**	**0,010**	**0,1732**	**0,028**		A	0,9522	0,012	**0,5787**	**0,028**
	B	0,4136	0,010	**0,3481**	**0,028**	6	B	**0,1527**	**0,010**	**0,09842**	**0,028**
2	A	0,9272	0,012	**0,6341**	**0,028**		C	**0,2498**	**0,010**	**0,1622**	**0,028**
	B	**1,169**	**0,013**	**1,035**	**0,029**	7	A	0,3387	0,010	**0,2663**	**0,028**
	C	1,538	0,015	1,459	0,030	8	A	0,5080	0,010	**0,1865**	**0,028**
	D	**0,4691**	**0,010**	0,3369	0,028		B	0,7134	0,011	0,4643	0,028
3	A	0,9244	0,012	**0,6815**	**0,028**		D	**0,5011**	**0,010**	**0,2580**	**0,028**
	B	1,108	0,013	0,9430	0,029	9	A	0,3553	0,010	**0,1980**	**0,028**
	C	0,2720	0,010	**0,1368**	**0,028**	10	A	**0,2510**	**0,010**	**0,1341**	**0,028**
	D	0,5025	0,010	0,3795	0,028	11	A	0,2026	0,010	**0,1335**	**0,028**
4	A	0,2082	0,010	0,1593	0,028		B	0,4247	0,010	**0,3724**	**0,028**
	C	0,3192	0,010	**0,1456**	**0,028**	12	A	**0,3303**	**0,010**	**0,2345**	**0,028**
	D	0,1749	0,010	**0,09016**	**0,028**		C	0,7495	0,011	0,5459	0,028
5	A	0,1915	0,010	**0,08895**	**0,028**						
	B	0,3470	0,010	**0,2543**	**0,028**						
	C	0,1110	0,010	**0,04013**	**0,028**						
	D	0,3997	0,010	0,2993	0,028						

Figura 4.9: Comparação entre as taxas de acertos para os diferentes tipos de iluminação testados no ensaio na bancada.



Fonte: Autor.

Os resultados para o ensaio de bancada e para o ensaio no centro de usinagem foram semelhantes em relação a diferença entre os métodos, visto que para o ensaio de bancada buscou-se imitar um ambiente similar ao da fresadora, porém o erro foi maior para o ensaio de bancada. Possivelmente, isso se deu pelo fato de que no ensaio de bancada, apesar de se ter utilizado equipamentos fixadores e reguladores da posição da ferramenta, na troca de insertos com diferentes características dimensionais houve uma certa dificuldade em manter exatamente a mesma distância entre a face desgastada do inserto e a câmera. Esse problema não existiu no ensaio no centro de usinagem, pois os insertos avaliados têm as mesmas dimensões e seu posicionamento é definido com resolução de um micrometro pela máquina através do sistema de Controle Numérico Computadorizado (CNC).

Outra diferença se deu nas capturas realizadas nos ensaios no centro de usinagem e na bancada, em que o fundo da imagem que se manteve mais claro no teste de bancada, como mostra a Figura 4.10 o que poderia influenciar na operação de realce de contraste. Ao se aumentar a intensidade de iluminação no ensaio no centro de usinagem, peças como o mandril porta-fresa refletem mais a luz, o que também pode influenciar no processamento da imagem. Porém, por estar fora do plano de foco da câmera, sua influência não foi grande o suficiente para afetar os resultados de forma conclusiva.

Figura 4.10: Captura do inserto 4-A no centro de usinagem a) com iluminação de intensidade 1, b) com iluminação de intensidade 6 e c) na bancada com iluminação de intensidade 6.

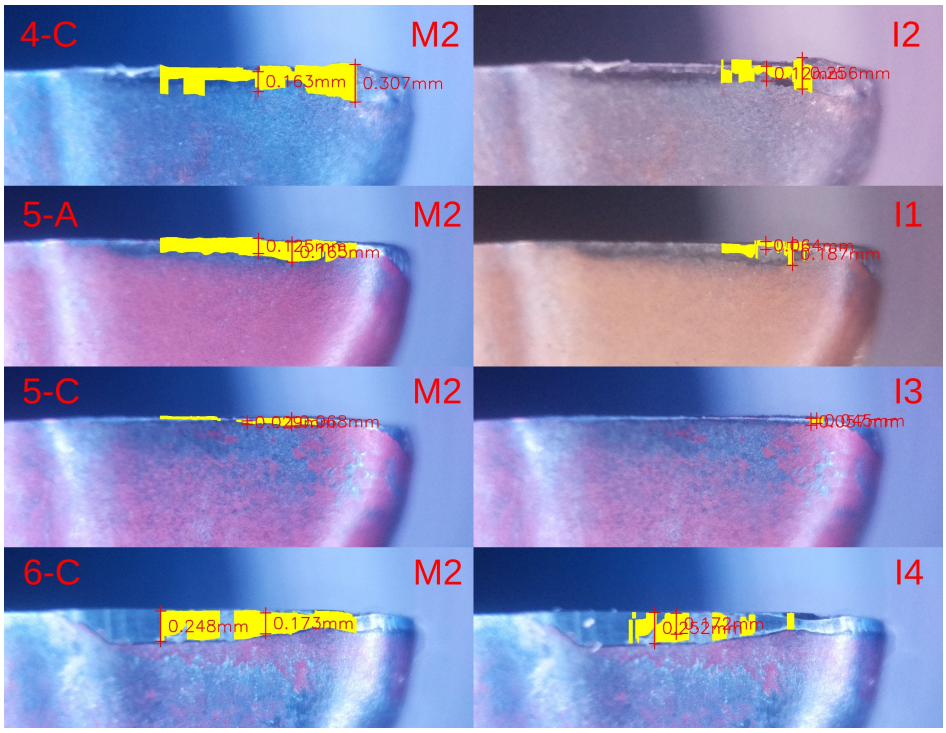
(a) (b) (c)

Fonte: Autor.

A quantidade de desgaste identificado por cada método de iluminação também mostra uma vantagem do segundo método em relação ao primeiro. Como se observa na Figura 4.11, para os resultados obtidos no ensaio no centro de usinagem, o segundo método de iluminação (à esquerda) apresentou resultados com a região de desgaste mais preenchida em relação ao primeiro método de iluminação (à direita). Dessa forma, um dos motivos para o segundo

método de iluminação ter alcançado resultados mais assertivos, é a característica do método de identificar mais pontos para a análise do desgaste de flanco.

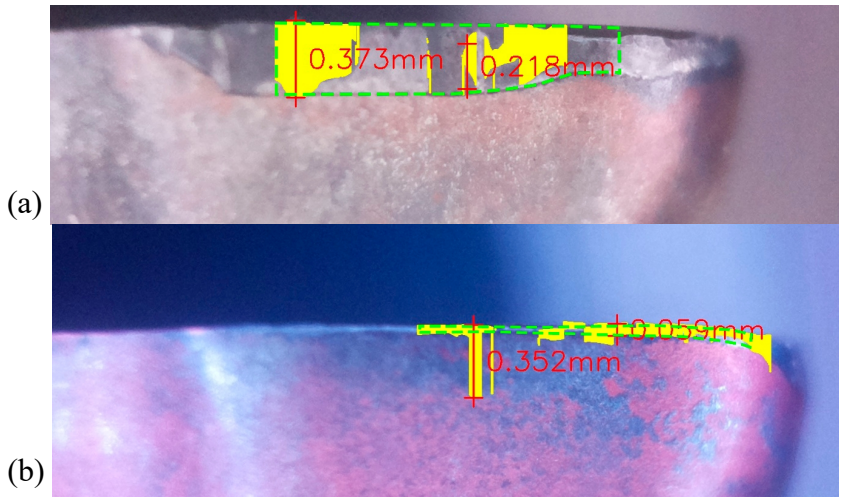
Figura 4.11: Comparação entre a quantidade de desgaste identificado por cada método para o ensaio no centro de usinagem.



Fonte: Autor.

O tipo de desgaste pode influenciar na facilidade ou dificuldade de se identificar corretamente a região de desgaste como, por exemplo, para o inserto 12-A no ensaio no centro de usinagem para o primeiro nível de iluminação do primeiro método (Figura 4.12a). Neste caso, a região do desgaste possui diferentes planos internos, o que dificultou a detecção correta e completa da região de desgaste, pois as bordas dos planos internos são detectadas em vez de se detectar somente as bordas externas do desgaste. Já para o inserto 5-C (Figura 4.12b) os desgastes na camada de cobertura são detectados em vez de somente o desgaste de flanco. Na Figura 4.12 a detecção correta da região de desgaste está grifada em verde.

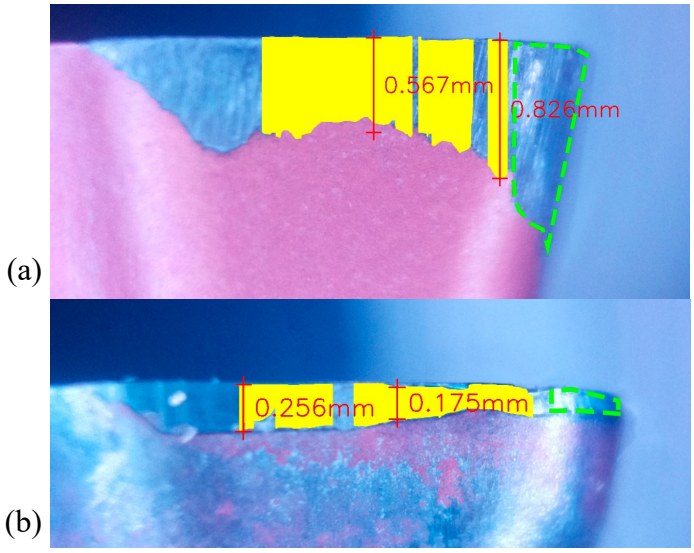
Figura 4.12: Imagem resultante da medição do desgaste dos insertos a) 12-A e b) 5-C.



Fonte: Autor.

O desfoque causado pela diferença na distância em relação a câmera que ocorre na extremidade do inserto auxilia o programa a selecionar a região correta do desgaste de flanco, como se observa nos exemplos da Figura 4.13, esse efeito foi responsável pela detecção correta do desgaste de flanco máximo dos insertos 6-A e 6-C. A região tracejada de verde indica o desgaste na região do raio da ponta do inserto que não deve ser detectada pelo software segundo a ABNT (2017), como foi mostrado na Figura 1 da secção 2.1.

Figura 4.13: Imagem resultante da medição do desgaste dos insertos a) 6-A e b) 6-C.



Fonte: Autor.

A Tabela 4.5 mostra o tempo médio de execução na Raspberry Pi de cada etapa do software:

Tabela 4.5: Resultados para os tempos de execução em cada etapa.

	Primeiro método		Segundo método	
	Tempo [s]		Tempo [s]	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Captura da(s) imagem(s)	6,1	0,10	18	0,10
Cálculo e exibição do resultado	7,6	0,10	20	0,17
Recorte da imagem utilizando IA	12	0,49	12	0,49
Total	25		50	

Como o esperado, o tempo para execução completa do segundo método é maior que o primeiro, o que é uma desvantagem quando se busca resultados mais rápidos. O recorte da imagem utilizando IA gasta um tempo considerável para sua execução, sendo 48% do tempo total para o primeiro método e 24% para o segundo método, porém seu uso pode ser substituído utilizando o recorte manual da imagem e posicionando a ferramenta sempre no mesmo local. Os autores mencionados que também utilizaram visão computacional não mostram resultados sobre o tempo gasto para medição do desgaste para fim de comparação. Se comparado a métodos de medição de desgaste de flanco que necessitam a retirada do inserto da máquina, mesmo o segundo método apresentaria um tempo menor.

4.4 Comparação com outros autores

A Tabela 2.1 mostrada anteriormente apresenta outros autores que utilizaram visão computacional para medição de desgaste. A maioria desses autores utiliza o erro relativo ou absoluto para comparação com o valor de referência, assim o erro relativo para o ensaio no centro de usinagem utilizando o segundo método de iluminação (que apresentou os melhores resultados) se encontra na Tabela 4.6.

García-Ordás et al. (2017) realizaram um estudo para classificação entre baixo, médio e alto desgaste, apresentando uma taxa de acertos entre 80,24% e 88,46%. O presente trabalho não classifica o desgaste de acordo com diferentes faixas, o que dificulta a comparação. Possivelmente, a comparação mais apropriada seja em relação a taxa de acertos já apresentada de acordo com o teste de erro normalizado, que também testa se o resultado se encontra em uma faixa de aceitação. Dessa forma, o resultado obtido no centro de usinagem utilizando o segundo método de iluminação está entre 100% para o desgaste de flanco médio e 88% para o desgaste de flanco máximo, que são valores superiores aos encontrados por García-Ordás et

al. (2017).

Tabela 4.6: Erro relativo e diferença em milímetros para $VB_{MÁX}$ e VB_B das medições realizadas no centro de usinagem utilizando o segundo método de iluminação.

Inserto		Erro relativo		Diferença [mm]	
		$VB_{MÁX}$	VB_B	$VB_{MÁX}$	VB_B
4	A	1,2%	14,9%	0,0018	0,0163
	C	22,7%	11,3%	0,0568	0,0164
5	A	2,8%	0,6%	0,0048	0,0008
	C	9,5%	26,3%	0,0060	0,0109
6	A	1,1%	4,8%	0,0088	0,0277
	C	1,0%	6,1%	0,0026	0,0112
12	A	0,6%	0,3%	0,0020	0,0007
	C	0,4%	4,8%	0,0025	0,0218

Bagga et al. (2021) e Bagga; Makhesana; Patel (2021) apresentam em seu trabalho os resultados para desgaste de flanco máximo com erro relativo entre 0,5% e 5%, da Tabela 4.6 tem se uma média do erro relativo para $VB_{MÁX}$ de 4,90% considerando todos resultados e de 2,68% considerando apenas os resultados aprovados no teste de erro normalizado. Da Tabela 4.6, para $VB_{MÁX}$, o inserto 5-C foi aceito no teste de erro normalizado e apresenta erro relativo de 9,5%, que é um valor consideravelmente maior que dos autores Bagga et al. (2021) e Bagga; Makhesana; Patel (2021), porém essa diferença em milímetros é de 0,0060 mm, que é uma diferença menor que a apresentada pelos autores.

Dong; Li (2022) encontrou um erro de aproximadamente 3%, porém ele utiliza a mesma imagem para extração do valor de referência e do valor do sistema proposto pelo autor, o que pode reduzir o erro encontrado. Os valores utilizados pelo autor são de diferentes partes do desgaste, mas não se enquadram especificamente com desgaste de flanco máximo ou degaste de flanco médio, o que dificulta a comparação. Da Tabela 4.6, o erro relativo apresenta uma média de 6,77% considerando todos resultados, que é um valor superior ao encontrado por Dong; Li (2022).

Thakre; Lad; Mala (2019) encontraram uma média de erro de 3% para VB_B. Da Tabela 4.6 a média do erro para VB_B é igual a 8,64%, valor maior que o encontrado por Thakre; Lad; Mala (2019). Para You et al. (2020), o erro relativo encontrado está entre 3% e 9% para o desgaste de flanco máximo e médio, que são valores próximos da média da Tabela 4.6.

Zhang; Zhang (2013), Zhou; Yu (2021) e Zhu et al. (2023) realizaram o estudo em ferramentas de corte com geometrias mais discrepantes que as utilizadas no presente estudo, porém o erro encontrado por eles permaneceram em uma faixa próxima a encontrada. Sendo o erro entre 0,5% e 5% para Zhang; Zhang (2013), entre 2,4% e 6% para Zhou; Yu (2021) e entre 1% e 5% para Zhu et al. (2023).

Para a comparação entre o custo dos equipamentos utilizados, a Tabela 4.7 apresenta o valor total e separadamente de cada equipamento utilizado por cada autor mencionado na Tabela 2.1 e para o sistema proposto.

Tabela 4.7: Comparação entre custo dos equipamentos.

Autor	Câmera		Computador		Iluminação		Software		Total
	Modelo	Preço (R$)	Modelo	Preço (R$)	Modelo	Preço (R$)	Modelo	Preço (R$)	
Sistema proposto	Module v2	208,90	Raspberry Pi 3B	370,40	12 LEDs WS2812B	14,16	Código aberto	0	593,46
Bagga et al. (2021)	Câmera Canon EOS 60D DSLR	3.068,16	Computador básico	1.206,79	Não especificado	-	Matlab (por 1 ano)	5.051,90	9.326,85
Bagga; Makhesana; Patel (2021)	Câmera Canon EOS 60D DSLR	3.068,16	Computador básico	1.206,79	Não especificado	-	Matlab (por 1 ano)	5.051,90	9.326,85
Ganesh; Bommi (2022)	Não especificado	-	Computador básico	1.208,79	Não especificado	-	Matlab (por 1 ano)	5.051,90	6.260,69
García-Ordás et al. (2017)	Genie M1280	2.669,36	Computador básico	1.208,79	Infaimon BDBL-R82/16H	18.819,49	Matlab (por 1 ano)	5.051,90	27.749,54
Thakre; Lad; Mala (2019)	SONY Cyber-shot DSC-HX400V	4.276,00	Computador básico	1.208,79	Não especificado	-	Matlab (por 1 ano)	5.051,90	10.536,69
You et al. (2020)	acA2040-90um	7.108,17	Computador básico	1.208,79	Não especificado	-	Não especificado	-	8.316,96
Zhang; Zhang (2013)	Câmera Daheng DH-HV3103UC e lente TEC-M55	3.433,96	Computador básico	1.208,79	Não especificado	-	Código aberto	0	4.642,75
Zhou; Yu (2021)	Câmera acA2500−60 um e lente M0824-MPW2	6.168,70	Computador básico	1.208,79	Não especificado	-	Código aberto	0	7.377,49

Os autores Dong; Li (2022) e Zhu et al. (2023) não especificam o suficiente os modelos dos equipamentos utilizados, por isso não estão na Tabela 4.7. O modelo específico do computador utilizado pelos autores não foi mencionado, dessa forma foi colocado o valor de um computador pessoal básico com processador Intel Core I3-8100 e memória RAM de

16GB. Alguns valores foram convertidos de dólar para real considerando o custo do dólar a R$ 5,15. Bagga et al. (2021) e Bagga; Makhesana; Patel (2021) não mencionam exatamente essa câmera que foi considerada na Tabela 4.7, porém pelas especificações e imagens presentes no artigo pode se considerar o uso dessa câmera, visto que as outras de mesma especificação possuem o valor similar.

Os valores mostrados são apenas uma estimativa e o custo pode variar de acordo com o tempo ou localidade em que se compra esses equipamentos. Tendo em vista essas considerações, o custo do sistema proposto se mostrou inferior a todos os outros autores, sendo quase oito vezes menor que o Zhang; Zhang (2013), autor que apresentou o valor mais barato e 47 vezes menor que o García-Ordás et al. (2017), autor que apresentou o valor mais alto da Tabela 4.7. Para empresas do setor de usinagem essa diferença no custo de aquisição do produto pode não ser relevante o suficiente. Porém para o desenvolvimento da tecnologia no meio acadêmico brasileiro o custo do sistema muitas vezes é relevante para reprodução dos estudos.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho visou construir um sistema de visão computacional que realiza a medição de desgaste de flanco de insertos na área de trabalho de um centro de usinagem. Para isso foi desenvolvido um algoritmo de código aberto (Python) e o mesmo foi implementado em uma Raspberry Pi modelo 3. Além disso, comparou-se diferentes abordagens para iluminação e captura da imagem do inserto.

O sistema proposto conseguiu se adaptar a utilização dos diferentes tipos de insertos para o ensaio de bancada. Para o ensaio no centro de usinagem os resultados foram mais acurados possivelmente pela repetibilidade do posicionamento da ferramenta que só foi possível na máquina CNC. Mesmo com suas particularidades, como a iluminação reduzida no ambiente da fresadora, o ensaio de bancada e o ensaio no centro de usinagem mostraram comportamento semelhante em relação as suas respostas para os diferentes tipos de iluminação testados. Sendo o segundo método de iluminação o que apresentou melhores resultados em ambos ensaios e para o primeiro método os primeiros níveis de iluminação mostraram melhor desempenho também em ambos ensaios.

O primeiro método de iluminação que utiliza somente uma captura possui a vantagem de ter maior rapidez para obtenção do resultado e desvantagens como maior dificuldade de se encontrar o desgaste de flanco médio de forma correta e a necessidade de um conhecimento prévio para ajuste da intensidade correta da iluminação. Já o segundo método que consiste na combinação de três capturas diferentes apresenta a desvantagem de ser mais demorado em relação ao primeiro método, porém o mesmo obteve os melhores resultados com 100% na taxa acertos para o desgaste de flanco médio e 92% para o desgaste de flanco máximo segundo o teste de erro normalizado para o ensaio no centro de usinagem. Um dos motivos para o segundo método de iluminação se sobressair em relação ao primeiro é sua característica de identificar mais pontos para a análise do desgaste de flanco.

A superexposição da imagem capturada foi um fator de grande influência no estudo. Inicialmente a sua presença fez com que fosse necessário a utilização de um difusor para os LEDs. Posteriormente, a superexposição da imagem capturada afetou os resultados de forma que para o primeiro método de iluminação os níveis iniciais de intensidade de iluminação apresentaram melhores resultados. Já para o segundo método não houve influência da superexposição.

Para aplicação industrial o segundo método possui maior viabilidade, o que não exclui a possibilidade de se melhorar as respostas do primeiro para tal aplicação. O primeiro método

é rápido e, utilizando o segundo nível de intensidade de iluminação, foi possível obter resultados corretos para 75% das medições de desgaste de flanco máximo no ensaio no centro de usinagem. Além disso, como o resultado é apresentado de forma visual facilmente se detectaria erros na medição do desgaste de flanco máximo. Já o segundo método apresentou uma alta taxa de acertos nos resultados e seu tempo total de 50 segundos para medição, ainda que maior que o primeiro método, com 25 segundos, pode ser otimizado se utilizando o recorte manual da imagem e mantendo o posicionamento do inserto igual para todas medições. E se comparado a métodos de medição de desgaste de flanco que necessitam a retirada do inserto do porta-ferramentas, 50 segundos ainda é um tempo muito inferior.

O uso do sistema embarcado Raspberry Pi não se mostrou limitado em apresentar bons resultados. A análise comparativa entre os resultados alcançados mostrou resultados semelhantes ou melhores em relação aos outros autores que utilizaram a visão computacional para análise do desgaste de ferramentas de corte. Além disso, o uso da Raspberry Pi é um sistema robusto e prático que favorece a implementação do protótipo em diferentes contextos da indústria contribuindo com o desenvolvimento da tecnologia de visão computacional.

Em trabalhos futuros seria interessante o aprofundamento no estudo do segundo método iluminação, realizando ensaios para diferentes intensidades de iluminação, visto que para o primeiro método os resultados dos primeiros níveis de luminosidade mostraram melhores resultados e para o segundo método foi utilizado somente a intensidade máxima. Outro ponto que poderia ser abordado seria a utilização dos modelos mais recentes de câmera da Raspberry Pi que possuem maior resolução mantendo o formato compacto. A resolução maior possibilitaria a diminuição do tamanho de pixel, melhorando a resolução do sistema de medição por visão computacional, o que poderia melhorar os resultados para o desgaste de flanco máximo. Uma resolução maior também poderia afetar o tempo de execução do programa, visto que uma imagem maior levaria mais tempo para ser processada. Por fim, a medição do raio de ponta da ferramenta também é uma variável interessante a ser estudada, pois a mesma influencia na variação dimensional da peça usinada.

REFERÊNCIAS

BAGGA, P. J.; MAKHESANA, M. A.; PATEL, K.; PATEL, K. M. Tool wear monitoring in turning using image processing techniques. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 771–775, 2021.

BAGGA, P. J.; MAKHESANA, M. A.; PATEL, K. M. A novel approach of combined edge detection and segmentation for tool wear measurement in machining. **Production Engineering**, v. 15, n. 3-4, p. 519–533, 1 mar. 2021.

BROWN, D.C. Close-Range Camera Calibration. **Photogrammetric Engineering**, 37, p. 855-866, 1971.

CAMPOS, M. B.; TOMMASELLI, A. M. G.; MORAES, M. V. A.; JUNIOR, J. M. Análise Comparativa Dos Resultados Obtidos Pelos Métodos De Calibração De Campo Tridimensional E Bidimensional. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2, p. 308–328, jun. 2015.

CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, vol. PAMI-8, n. 6, p. 679-698, 1986.

BALOCHIAN, S.; BALOOCHIAN, H. Edge detection on noisy images using Prewitt operator and fractional order differentiation. **Multimed Tools and Applications**, v. 81, p. 9759–9770, 2022.

COSTA, P. B.; BALDNER, F. O.; GOMES, J. F. S.; LETA, F. R. Measurement Uncertainty Evaluation of the Null Detector Method Using Monte Carlo. **17th International Congress of Metrology**, 2015.

DAICU, R.; OANCEA, G. Methodology for Measuring the Cutting Inserts Wear. **Symmetry**, v. 14, n. 3, p. 469, 25 fev. 2022.

DIMLA, D. E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 8, p. 1073–1098, jun. 2000.

DONG, X.; LI, Y. Online Detection of Turning Tool Wear Based on Machine Vision. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, v. 22, n. 5, 24 mar. 2022.

DOQ-CGCRE-008. Orientação sobre validação de métodos analíticos: documento de caráter orientativo. **INMETRO**, p. 21, Revisão: 05, Ago. 2016.

DREYFUS, P.-A. PSAROMMATIS, F.; MAY, G.; KIRITSIS, D. Virtual metrology as an approach for product quality estimation in Industry 4.0: a systematic review and integrative conceptual framework. **International Journal of Production Research**, p. 1–24, 21 set. 2021.

FERNÁNDEZ-ROBLES, L.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, L.; DÍEZ-GONZÁLEZ, J.; CASTEJÓN-LIMAS, M.; PÉREZ, H. Use of image processing to monitor tool wear in micro

milling. **Neurocomputing**, v. 452, p. 333–340, set. 2021.

GAMINI, S.; KUMAR, S. S. Homomorphic filtering for the image enhancement based on fractional-order derivative and genetic algorithm. **Computers and Electrical Engineering**, v. 106, p. 108566, 1 mar. 2023.

GANESH, V. D.; BOMMI, R.M. Prediction of Tool Wear by Using RGB Techniques in Comparison with Experimental Analysis. **2022 International Conference on Data Science, Agents & Artificial Intelligence**, 8 dez. 2022.

GARCÍA-ORDÁS, M. T.; ALEGRE, E.; GONZALEZ-CASTRO, V.; ALAIZ-RODRÍGUEZ, R. A computer vision approach to analyze and classify tool wear level in milling processes using shape descriptors and machine learning techniques. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 5-8, p. 1947–1961, 7 out. 2016.

GERHARD, R. X. E JOSEPH, W. N. Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra. **CRC Press**, p. 84-89, 1996.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing.** 4. ed. New York, Ny: Pearson, p. 133-134, 2018.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep Learning**. MIT Press, 2016. Disponível em: <https://www.deeplearningbook.org>.

HEIKKILA, J.; SILVEN, O. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. **IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. 1997.

HESSER, D. F.; MARKERT, B. Tool wear monitoring of a retrofitted CNC milling machine using artificial neural networks. **Manufacturing Letters**, Volume 19, p. 1-4, 2019.

ISO 3685:2017. **Tool-life testing with single-point turning tools**. Rio de Janeiro. 14 nov. 2017.

JCGM, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, **JCGM 100:2008**, p. 10-23, sep. 2008.

KERAS. Home - **Keras Documentation,** 2019. Disponível em: <https://keras.io/>.

KUNTOĞLU, M.; ASLAN, A.; PIMENOV, D. Y.; USCA, U. A.; SALUR, E.; GUPTA, M. K.; MIKOLAJCZYK, T.; GIASIN, K.; KAPŁONEK, W.; SHARMA, S. A Review of Indirect Tool Condition Monitoring Systems and Decision-Making Methods in Turning: Critical Analysis and Trends. **Sensor**s, v. 21, n. 1, p. 108, 1 jan. 2021.

LETA, F. R.; BALDNER, F. O.; GOMES, J. F. S.; COSTA, P. B. Metrologia por Imagem. [s.l.] **Elsevier Brasil**, p. 45-132, 2017.

LYU, CHENGANG; BAI, YANG; YANG, JIACHEN; QI, HAO; MA, JINGJING. An iterative high dynamic range image processing approach adapted to overexposure 3D scene. **Optics And Lasers In Engineering**, [S.L.], v. 124, p. 105831, jan. 2020. Elsevier BV.

http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105831.

MAGGIPINTO, M.; TERZI, M.; MASIERO, C.; BEGHI, A.; SUSTO, G. A. A Computer Vision-Inspired Deep Learning Architecture for Virtual Metrology Modeling With 2-Dimensional Data. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, v. 31, n. 3, p.376–384, ago. 2018.

MARESCA, P.; DUARTE, A.; WANG, C.; CAJA, J.; GOMEZ, E. Evaluation of traceability in continuous 2D measurements employing machine vision systems. **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 922–929, 2019.

MIRANDA, J. I. Detecção de Bordas com Filtro de Difusão Linear Complexa. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - Sbsr**. Curitiba, p. 7580-7587. maio 2011.

MOHANRAJ, T.; SHANKAR, S.; RAJASEKAR, R.; SAKTHIVEL, N. R.; PRAMANIK, A. Tool condition monitoring techniques in milling process — a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 1032–1042, 1 jan. 2020.

MORE, J. J. Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. **Numerical Analysis**. 1 jan. 1977.

MUKHOPADHYAY, P.; CHAUDHURI, B. B. A survey of Hough Transform. **Pattern Recognition**, v. 48, n. 3, p. 993–1010, mar. 2015.

NASCIMENTO, L. F. A.; SILVA, F. A.; ALMEIDA, L. L.; ARTERO, A. O.; PITERI, M. A. Correção De Iluminação Em Imagens Capturadas Em Ambientes Com Baixa Luminosidade. **COLLOQUIUM EXACTARUM**, v. 14, n. 1, p. 12–21, 30 mar. 2022.

PEDRA, A. V. B. M.; MENDONÇA, M.; FINOCCHIO, M. A. F.; ARRUDA, L. V. R.; CASTANHO, J. E. C. Camera Calibration Using Detection and Neural Networks. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 7, p. 245–250, maio 2013.

PETROU, M.; PETROU C. **Image Processing: The Fundamentals**. 2nd Edition, p. 311-326, 2010.

PFEIFER, T.; WIEGERS, L. Reliable tool wear monitoring by optimized image and illumination control in machine vision. **Measurement**, v. 28, n. 3, p. 209–218, out. 2000.

PIZER, S. M. AMBURN, E. P.; AUSTIN, J. D.; CROMARTIE, R.; GESELOWITZ, A.; GREER, T.; ROMENY, B. H.; ZIMMERMAN, J. B.; ZUIDERVELD, K. Adaptive histogram equalization and its variations. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 39, n. 3, p. 355–368, 1 set. 1987.

PRATT, W. K. **Digital image processing: PIKS inside**. New York: John Wiley & Sons, p. 258-404, 2007.

SAJJAD, M.; NASIR, M.; MUHAMMAD, K.; KHAN, S.; JAN, Z.; SANGAIAH, A. K.; ELHOSENY, M.; BAIK, S. W.. Raspberry Pi assisted face recognition framework for enhanced law-enforcement services in smart cities. **Future Generation Computer Systems**,

[S.L.], v.108, p. 995-1007, jul. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2017.11.013.

SOUSA, J.; SILVA RIBEIRO, Á. The choice of method to the evaluation of measurement uncertainty in metrology. **19th IMEKO World Congress**, v.4, p. 2388–2393, 1 jan. 2009.

THAKRE, A. A.; LAD, A. V.; MALA, K. Measurements of Tool Wear Parameters Using Machine Vision System. **Modelling and Simulation in Engineering**, v. 2019, 2019.

VENTURA, C.E.H.; AROCA, R.V.; ANTONIALLI, A.Í.S.; ABRÃO, A.M.; RUBIO, J.C. CAMPOS; CÂMARA, M.A.. Towards Part Lifetime Traceability Using Machined Quick Response Codes. **Procedia Technology**, [S.L.], v. 26, p. 89-96, 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.013.

WONG, S. Y.; CHUAH, J. H.; YAP, H. J. Technical data-driven tool condition monitoring challenges for CNC milling: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 107, n. 11-12, p. 4837–4857, abr. 2020.

WU, Y.; JIANG, S.; XU, Z.; ZHU, S.G; CAO, D.. Lens distortion correction based on one chessboard pattern image. **Frontiers Of Optoelectronics**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 319-328, 27 jun. 2015. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s12200-015-0453-7.

YOU, Z.; GAO, H.; GUO, L.; LIU, Y.; LI, J. On-line milling cutter wear monitoring in a wide field-of-view camera. **Wear**, v. 460-461, p. 203479, nov. 2020.

ZHANG, C.; ZHANG, J. On-line tool wear measurement for ball-end milling cutter based on machine vision. **Computers in Industry**, v. 64, n. 6, p. 708–719, ago. 2013.

ZHANG, J.; YU, H.; DENG, H.; CHAI, Z.; MA, M.; ZHONG, X. A Robust and Rapid Camera Calibration Method by One Captured Image. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 68, n. 10, p. 4112–4121, 1 out. 2019.

ZHANG, C.; WANG, M.; LI, Y.; YANG, X. Nearest Neighbour Corner Points Matching Detection Algorithm. **MATEC Web of Conferences**, v. 22, p. 01035, 2015.

ZHOU, J.; YU, J. Chisel edge wear measurement of high-speed steel twist drills based on machine vision. **Computers in Industry**, v. 128, p. 103436, jun. 2021.

ZHU, K.; GUO, H.; LI, S.; LIN, X. Online tool wear monitoring by super-resolution based machine vision. **Computers in Industry**, v. 144, p. 103782–103782, 1 jan. 2023.

APÊNDICE A – Resultados detalhados

Os resultados em negrito das Tabelas A.1, A.2 e A.3 foram aceitos segundo o teste de erro normalizado.

Tabela A.1: Resultados do desgaste de flanco máximo ($VB_{MÁX}$) obtidos no ensaio do centro de usinagem utilizando o primeiro método de iluminação.

Inserto		Intensidade de iluminação											
		I1		I2		I3		I4		I5		I6	
		$VB_{MÁX}$ [mm]	$U_{VBMÁX}$ [mm]	$VB_{MÁX}$ [mm]	$U_{VBMÁX}$ [mm]	$VB_{MÁX}$ [mm]	$U_{VBMÁX}$ [mm]	$VB_{MÁX}$ [mm]	$U_{VBMÁX}$ [mm]	$VB_{MÁX}$ [mm]	$U_{VBMÁX}$ [mm]	$VB_{MÁX}$ [mm]	$U_{VBMÁX}$ [mm]
4	A	**0,1567**	**0,015**	**0,1513**	**0,015**	0,06827	0,013	0,0722	0,013	0,07171	0,016	0,07318	0,013
	C	**0,2490**	**0,028**	**0,2299**	**0,081**	0,1636	0,058	0,1449	0,042	0,1316	0,097	0,1302	0,019
	D	**0,1130**	**0,036**	**0,1798**	**0,288**	**0,1478**	**0,034**	**0,1685**	**0,058**	**0,1410**	**0,019**	0,1621	0,026
5	A	**0,1891**	**0,030**	**0,1788**	**0,013**	0,1248	0,025	0,1272	0,020	0,1311	0,019	0,1228	0,014
	B	0,2986	0,013	0,2976	0,013	**0,3360**	**0,140**	0,2937	0,013	**0,3001**	**0,027**	**0,3345**	**0,140**
	C	0,0973	0,015	**0,07910**	**0,094**	**0,07122**	**0,058**	**0,02800**	**0,039**	0,9651	0,033	-	-
	D	**0,3207**	**0,013**	0,3404	0,014	0,3507	0,013	0,3561	0,014	0,3561	0,013	0,3586	0,013
6	A	0,7225	0,031	**0,8664**	**0,216**	**0,7579**	**0,094**	**0,7667**	**0,107**	0,7112	0,065	0,7107	0,065
	B	**0,2377**	**0,186**	**0,2196**	**0,123**	**0,1375**	**0,016**	**0,1370**	**0,022**	**0,1365**	**0,021**	**0,1405**	**0,023**
	C	0,2854	0,018	**0,2711**	**0,042**	**0,2525**	**0,036**	**0,2461**	**0,022**	0,2318	0,019	**0,5462**	**1,059**
12	A	**0,3050**	**0,117**	**0,3266**	**0,022**	**0,3306**	**0,014**	**0,3261**	**0,018**	**0,2839**	**0,068**	**0,2809**	**0,104**
	C	**0,5511**	**0,153**	0,4573	0,031	0,4754	0,015	0,4597	0,036	0,4754	0,014	0,4686	0,018

Tabela A.2: Resultados do desgaste de flanco médio (VB_B) obtidos no ensaio do centro de usinagem utilizando o primeiro método de iluminação.

Inserto		Intensidade de iluminação											
		I1		I2		I3		I4		I5		I6	
		VB_B [mm]	U_{VBB} [mm]	VB_B [mm]	U_{VBB} [mm]	VB_B [mm]	U_{VBB} [mm]	VB_B [mm]	U_{VBB} [mm]	VB_B [mm]	U_{VBB} [mm]	VB_B [mm]	U_{VBB} [mm]
4	A	0,07589	0,015	0,05900	0,016	0,04182	0,014	0,04201	0,015	0,04352	0,013	0,04323	0,014
	C	**0,1081**	**0,052**	**0,09582**	**0,048**	0,07918	0,023	0,07208	0,028	0,06710	0,027	0,07706	0,015
	D	0,0669	0,014	**0,0674**	**0,042**	0,05489	0,016	0,05581	0,014	0,05912	0,015	0,06265	0,014
5	A	0,07470	0,025	0,05773	0,014	0,05752	0,017	0,05943	0,015	0,05776	0,018	0,05783	0,013
	B	0,2106	0,018	0,2045	0,023	0,20975	0,039	0,21374	0,022	0,21661	0,023	0,21414	0,016
	C	**0,05768**	**0,016**	**0,04635**	**0,028**	**0,04723**	**0,021**	**0,02361**	**0,031**	0,6982	0,431	-	-
	D	0,1785	0,065	0,2181	0,015	**0,24882**	**0,014**	**0,25968**	**0,018**	**0,25861**	**0,018**	**0,27288**	**0,020**
6	A	0,3313	0,114	0,3032	0,160	**0,3660**	**0,246**	0,3350	0,199	0,2887	0,124	**0,2963**	**0,364**
	B	**0,1035**	**0,013**	**0,0990**	**0,013**	**0,09970**	**0,013**	**0,10025**	**0,013**	**0,09980**	**0,013**	**0,10047**	**0,013**
	C	**0,1662**	**0,045**	0,1290	0,048	**0,1381**	**0,045**	**0,1671**	**0,024**	**0,1476**	**0,061**	**0,2050**	**0,097**
12	A	0,2051	0,025	0,1768	0,039	0,1827	0,022	0,1940	0,042	0,1326	0,052	**0,1431**	**0,114**
	C	**0,3083**	**0,206**	0,2364	0,166	0,2047	0,042	0,1983	0,087	0,1885	0,071	0,2164	0,186

Tabela A.3: Resultados do desgaste de flanco médio (VB_B) e desgaste de flanco máximo ($VB_{MÁX}$) obtidos no ensaio do centro de usinagem utilizando o segundo método de iluminação.

Inserto		$VB_{MÁX}$ [mm]	$U_{VBMÁX}$ [mm]	VB_B [mm]	U_{VBB} [mm]
4	A	**0,1621**	**0,013**	**0,09336**	**0,016**
	C	0,3075	0,016	**0,1611**	**0,017**
	D	**0,1208**	**0,040**	**0,09236**	**0,022**
5	A	**0,1670**	**0,013**	**0,1247**	**0,013**
	B	**0,3016**	**0,045**	**0,2377**	**0,020**
	C	**0,05747**	**0,013**	**0,03051**	**0,015**
	D	**0,3261**	**0,015**	**0,2534**	**0,013**
6	A	**0,8252**	**0,015**	**0,5517**	**0,033**
	B	**0,1650**	**0,032**	**0,1125**	**0,013**
	C	**0,2515**	**0,016**	**0,1717**	**0,015**
12	A	**0,3330**	**0,017**	**0,2536**	**0,048**
	C	**0,6228**	**0,016**	**0,4748**	**0,025**

Os resultados da Tabela A.4 em negrito são os que apresentam o erro menor ou igual a 10%.

Tabela A.4: Resultados do erro relativo entre as medições do microscópio e do ensaio de bancada.

Inserto		Erro relativo do $VB_{MÁX}$							Erro relativo do VB_B						
		Método de iluminação							Método de iluminação						
		I1	I2	I3	I4	I5	I6	M2	I1	I2	I3	I4	I5	I6	M2
1	A	27%	25%	42%	44%	43%	56%	**2%**	13%	41%	65%	67%	71%	50%	**4%**
	B	35%	57%	56%	52%	49%	65%	13%	27%	30%	86%	85%	85%	52%	**3%**
2	A	11%	52%	41%	78%	**0%**	84%	**10%**	38%	20%	40%	79%	51%	82%	**5%**
	B	**4%**	**3%**	**4%**	17%	**10%**	**9%**	**0%**	**9%**	11%	16%	15%	38%	42%	**1%**
	C	**10%**	86%	87%	**2%**	**10%**	**8%**	**7%**	18%	95%	96%	84%	72%	62%	12%
	D	13%	14%	15%	25%	32%	47%	**1%**	**9%**	21%	13%	33%	66%	72%	17%
3	A	22%	23%	31%	68%	25%	20%	**8%**	50%	**7%**	39%	24%	58%	11%	**5%**
	B	**6%**	**5%**	**8%**	12%	96%	100%	**5%**	13%	**10%**	**8%**	29%	91%	100%	**8%**
	C	14%	**6%**	14%	**7%**	17%	11%	17%	19%	**10%**	**2%**	22%	28%	35%	**5%**
	D	96%	53%	**9%**	148%	126%	48%	11%	**3%**	16%	28%	13%	11%	72%	14%
4	A	**1%**	**1%**	61%	32%	25%	**10%**	30%	48%	49%	53%	51%	51%	44%	45%
	C	30%	**8%**	11%	16%	**5%**	25%	27%	65%	62%	54%	49%	40%	52%	**0%**
	D	127%	90%	97%	25%	38%	**9%**	37%	25%	36%	52%	43%	37%	44%	**5%**
5	A	43%	30%	25%	15%	**8%**	29%	27%	45%	38%	30%	22%	**9%**	**0%**	**5%**
	B	**8%**	95%	113%	14%	117%	108%	**9%**	24%	20%	16%	45%	17%	**6%**	**0%**
	C	110%	91%	65%	13%	152%	841%	73%	21%	31%	32%	30%	31%	36%	**2%**
	D	139%	110%	101%	22%	27%	29%	27%	**0%**	**3%**	**5%**	14%	14%	16%	16%
6	A	76%	12%	12%	**5%**	32%	15%	17%	91%	47%	27%	36%	**1%**	11%	**0%**
	B	17%	24%	22%	**10%**	**8%**	53%	**7%**	66%	54%	56%	25%	20%	**10%**	**8%**
	C	21%	17%	31%	69%	86%	18%	**2%**	26%	22%	26%	**9%**	14%	19%	11%

7	A	**2%**	28%	148%	**7%**	145%	23%	**6%**	24%	38%	20%	45%	**4%**	**8%**	**1%**
8	A	11%	12%	**6%**	18%	44%	48%	**4%**	95%	**5%**	**10%**	44%	55%	64%	**1%**
	B	56%	25%	24%	16%	11%	15%	30%	66%	53%	39%	69%	42%	40%	26%
	D	54%	**6%**	**4%**	11%	**9%**	**9%**	**1%**	74%	84%	**10%**	61%	99%	110%	**4%**
9	A	74%	**2%**	**0%**	42%	41%	42%	**6%**	63%	21%	**3%**	16%	14%	15%	**3%**
10	A	78%	**2%**	14%	13%	16%	**10%**	**3%**	**6%**	**0%**	**2%**	**0%**	**10%**	**5%**	12%
11	A	27%	**3%**	32%	38%	40%	41%	**7%**	50%	33%	24%	24%	26%	28%	12%
	B	15%	14%	24%	25%	40%	27%	**8%**	35%	43%	63%	46%	52%	29%	**4%**
12	A	23%	26%	27%	25%	28%	25%	**1%**	21%	**7%**	**5%**	13%	27%	26%	**7%**
	C	17%	17%	11%	122%	18%	**1%**	20%	**3%**	30%	36%	**4%**	**3%**	**10%**	21%

APÊNDICE B – Códigos desenvolvidos

1. Função desenvolvida para pré-processamento da imagem:

```
1  def tratar_imagem(image, l_h_ref, u_h_ref, nkernal):
2
3      # Converte a escala de cores de RGB para cinza
4      image_G = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
5      mask_ref = imagem_G
6
7      # Aplica o filtro homomórfico
8      img_log = numpy.log(numpy.float64(mask_ref), dtype=numpy.float64)
9
10     dft = numpy.fft.fft2(img_log, axes=(0,1))
11
12     dft_shift = numpy.fft.fftshift(dft)
13
14     radius = 13
15     mask = numpy.zeros_like(mask_ref, dtype=numpy.float64)
16     cy = mask.shape[0] // 2
17     cx = mask.shape[1] // 2
18     cv2.circle(mask, (cx,cy), radius, 1, -1)
19     mask = 1 - mask
20
21     mask = cv2.GaussianBlur(mask, (41,41), 0)
22
23     dft_shift_filtered = numpy.multiply(dft_shift,mask)
24
25     back_ishift = numpy.fft.ifftshift(dft_shift_filtered)
26
27     img_back = numpy.fft.ifft2(back_ishift, axes=(0,1))
28
29     img_back = numpy.abs(img_back)
30
```

```
31      img_homomorphic = numpy.exp(img_back, dtype=numpy.float64)
32
33      img_homomorphic = cv2.normalize(img_homomorphic, None, alpha=0, beta=255,
norm_type=cv2.NORM_MINMAX, dtype=cv2.CV_8UC1)
34
35      mask_ref = img_homomorphic
36
37      # Aplica o filtro para realce do contraste
38      mask_ref = cv2.equalizeHist(mask_ref)
39      clahe = cv2.createCLAHE(clipLimit=2)    #i61 5
40      mask_ref = clahe.apply(mask_ref)
41      x = 19  #i61 23
42      mask_ref = cv2.medianBlur(mask_ref, x)
43
44      mask_ref = cv2.GaussianBlur(mask_ref, (x,x), sigmaX=0)
45
46      # 'l_h_ref' e 'u_h_ref' definem a variável de intensidade mínima e máxima do píxel (em
escala de cinza)
47      # Aplica o filtro Canny
48      mask_ref = cv2.Canny(mask_ref, l_h_ref, u_h_ref, apertureSize = nkernal, L2gradient=
True)
49
50      # Operação mofológica de diltação
51      kernal_ref_dilate = numpy.ones((3, 3), numpy.uint8)
52      mask_ref = cv2.dilate(mask_ref, kernal_ref_dilate)
53
54      # Identifica e remove linhas menores que 45 pixels
55       nlabels, labels, stats, centroids = cv2.connectedComponentsWithStats(mask_ref, None,
None, None, 8, cv2.CV_32S)
56
57      wid = stats[1:, cv2.CC_STAT_WIDTH]
58      heit = stats[1:, cv2.CC_STAT_HEIGHT]
59
60      result = numpy.zeros((labels.shape), numpy.uint8)
```

```
61
62      for i in range(0, nlabels - 1):
63          if wid[i] >= 45:
64              result[labels == i + 1] = 255
65
66      mask_ref=result
67
68      # Operação mofológica de erosão para compensar a dilatação anterior
69      kernal_ref_erode = numpy.ones((3,3), numpy.uint8)
70      mask_ref = cv2.erode(mask_ref, kernal_ref_erode)
71
72      # Identifica e remove linhas verticais
73       nlabels, labels, stats, centroids = cv2.connectedComponentsWithStats(mask_ref, None,
None, None, 8, cv2.CV_32S)
74
75      wid = stats[1:, cv2.CC_STAT_WIDTH]
76      heit = stats[1:, cv2.CC_STAT_HEIGHT]
77
78      result = numpy.zeros((labels.shape), numpy.uint8)
79
80      for i in range(0, nlabels - 1):
81          if 2*wid[i] > heit[i]:
82              result[labels == i + 1] = 255
83
84      mask_ref=result
85
86      return mask_ref
```

2. Função que soma os contornos das três capturas do segundo método de iluminação:

```
1  def soma_contorno(image, l_h_ref, u_h_ref, nkernal, mtx, dist, newcameramtx):
2
3      # Lê as imagens capturadas
4      imagm1 = cv2.imread(image[0])
```

```
5     image2 = cv2.imread(image[1])
6     image3 = cv2.imread(image[2])
7
8     # Compensa a distorção de lente das imagens
9     h,w = image1.shape[:2]
10    image1 = cv2.undistort(image1, mtx, dist, None, newcameramtx)[150:h-150, 100:w-
150]
11     h,w = image2.shape[:2]
12     image2 = cv2.undistort(image2, mtx, dist, None, newcameramtx)[150:h-150, 100:w-
150]
13     h,w = image3.shape[:2]
14     image3 = cv2.undistort(image3, mtx, dist, None, newcameramtx)[150:h-150, 100:w-
150]
15
16     # Realiza o pré-processamento das imagens obtendo o contorno
17     contorno1 = tratar_imagem(imagem1, l_h_ref, u_h_ref, nkernal)
18     contorno2 = tratar_imagem(imagem3, l_h_ref, u_h_ref, nkernal)
19     contorno3 = tratar_imagem(imagem5, l_h_ref, u_h_ref, nkernal)
20
21     # Define o tamanho para as operações de erosão e dilatação
22     kernal_ref_d = numpy.ones((10, 10), numpy.uint8)
23     kernal_ref_e = numpy.ones((10, 10), numpy.uint8)
24
25     # Soma o contorno das duas primeiras imagens
26     soma1 = cv2.add(contorno1, contorno2)
27
28     # Realiza o processo de dilatação e erosão no contorno
29     soma1 = cv2.dilate(soma1, kernal_ref_d)
30     soma1 = cv2.erode(soma1, kernal_ref_e)
31
32     # Soma o contorno da terceira imagem com a soma das duas primeiras imagens
33     soma2 = cv2.add(soma1, contorno3)
34
35     # Realiza o processo de dilatação e erosão no contorno
```

```
36      soma2 = cv2.dilate(soma2, kernal_ref_d)
37      soma2 = cv2.erode(soma2, kernal_ref_e)
38      soma = soma2
39
40      return soma
```

3. Função desenvolvida para localizar a ponta da ferramenta na imagem:

```
1  def localizar_ponta(image_O):
2
3      # Carrega o modelo da IA
4      model = load_model("/keras_Model.h5", compile=False)
5      # Carrega as etiquetas
6      class_names = open("/labels.txt", "r").readlines()
7      # Define proporção do recorte em pixels
8      h = 500
9      l = 1300
10      # Inicia variaveis para vetor de recorte
11      X = []
12      Y = []
13      # Define quantidade de divisões em x e em y
14      div_x = 8
15      div_y = 9
16      # Cria vetores de recorte a serem testados
17      for i in range(div_x):
18          X.append(int(((numpy.shape(image_O)[1] - l) / (div_x-1))*(i) + l))
19      for j in range(div_y):
20          Y.append(int(((numpy.shape(image_O)[0] - h) / (div_y-1))*(j) + h))
21
22      confidence_score_aux = 0
23      corte = []
24
25      # Testa recortes criados selecionando o que possui maior probabilidade de ser a ponta
da ferramenta de corte
```

```
26    for x in X:
27        for y in Y:
28
29            image = image_O[y-h:y, x-l:x]
30
31            image = cv2.resize(image, (224, 224), interpolation=cv2.INTER_AREA)
32
33            image = numpy.asarray(image, dtype=numpy.float32).reshape(1, 224, 224, 3)
34
35            image = (image / 127.5) - 1
36
37            prediction = model.predict(image)
38            index = numpy.argmax(prediction)
39            class_name = class_names[index]
40            confidence_score = round(prediction[0][index]*100, 2)
41
42            if class_name[2] == 'P' and confidence_score >= confidence_score_aux:
43                confidence_score_aux = confidence_score
44                corte = [y-h, y, x-l, x]
45
46    return corte
```

4. Função desenvolvida para encontrar e calcular o desgaste de flanco através do contorno do desgaste:

```
1  def desgaste_flanco(imagem_b, imagem, t_p, corte):
2
3     if corte:
4        #Recorta imagem utilizada para visualização do resultado
5        imagem = imagem[corte[0]:corte[1], corte[2]:corte[3]]
6        #Recorta imagem do contorno do desgaste
7        imagem_b = imagem_b[corte[0]:corte[1], corte[2]:corte[3]]
8
9     H = []
```

```
10    L = []
11
12     #Varre a imagem da esquerda para direita identificando e armazenando a localização das linhas do contorno
13    for x in range(0, numpy.shape(imagem_b)[1]):
14          flag = 0
15
16          v = [0,0]
17          for y in range(0, numpy.shape(imagem_b)[0]):
18             if imagem_b[y, x] == 255 and flag == 0:
19                v[0] = y
20                flag = 1
21             if imagem_b[y, x] == 255 and flag == 2:
22                flag = 1
23             if imagem_b[y, x] == 0 and flag == 1:
24                v[1] = y
25                flag = 2
26
27          H.append(v)
28          L.append(x)
29
30    #Converte para arranjo para operações com a biblioteca numpy
31    L.append(0)
32    H = numpy.array(H)
33    L = numpy.array(L)
34
35    #Cálcula um desgaste de flanco médio de referência
36    d_ref = []
37    for i in range(len(H)):
38       d_ref.append(abs((H[i])[0]-(H[i])[1]))
39    ref_dist = numpy.mean(d_ref)
40
41    dist = []
42    L_D = []
```

```
43      H_D = []
44      l = 0
45
46      #Varre o desgaste identificado para cálculo do flanco médio e máximo
47      for i in range(int(len(H)/3.5),(len(H))):
48          d = abs((H[i])[0]-(H[i])[1])
49              #Elimina resultados fora de um limite aceitável de acordo com a referência de
desgaste de flanco médio
50          if d < 3*ref_dist and d > ref_dist/3:
51              dist.append(d)
52              l = l+1
53              L_D.append(L[i])
54              H_D.append([(H[i])[0],(H[i])[1]])
55              #Desenha a região de degaste na imagem
56                      cv2.line(imagem, (L[i], int((H[i])[0])), (L[i], int((H[i])[1])), (0,255,255), 2,
cv2.LINE_AA)
57
58      #Calcula os desgaste de flanco médio, máximo e a largura do desgaste identificado
59      f_med = numpy.mean(dist)*t_p
60      f_var = numpy.std(dist)*t_p
61      f_max = numpy.max(dist)*t_p
62
63      #Exibe os resultados no terminal
64      print("\n Desgaste de flanco médio [mm]: ", f_med, '+/-', f_var)
65      print(" Desgaste de flanco máximo [mm]: ", f_max)
66      print(" Quantidade de desgaste identificado [pixel]: ", l)
67
68      #Escreve os resultados na imagem
69      P1_med = (L_D[int(len(L_D)/2)], int((H_D[int(len(L_D)/2)])[0]))
70      P2_med = (L_D[int(len(L_D)/2)], int((H_D[int(len(L_D)/2)])[0] + numpy.mean(dist)))
71      cv2.line(imagem, P1_med, P2_med, (0,0,255), 2)
72      cv2.drawMarker(imagem, P1_med, (0,0,255), cv2.MARKER_CROSS, 30, 2)
73      cv2.drawMarker(imagem, P2_med, (0,0,255), cv2.MARKER_CROSS, 30, 2)
74        cv2.putText(imagem, str(round(f_med*t_p, 3)) + "mm", (L_D[int(len(L_D)/2)] + 20,
```

```
int((P1_med[1]+P2_med[1])/2)+15), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1.5, (0,0,255), 2)
    arg_max = numpy.argmax(dist)
    P1_max = (L_D[arg_max], int((H_D[arg_max])[0]))
    P2_max = (L_D[arg_max], int((H_D[arg_max])[1]))
    cv2.line(imagem, P1_max, P2_max, (0,0,255), 2, cv2.LINE_AA)
    cv2.drawMarker(imagem, P1_max, (0,0,255), cv2.MARKER_CROSS, 30, 2)
    cv2.drawMarker(imagem, P2_max, (0,0,255), cv2.MARKER_CROSS, 30, 2)
        cv2.putText(imagem, str(round(f_max*t_p, 3)) + "mm", (P1_max[0] + 20,
int((P1_max[1]+P2_max[1])/2)+15), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1.5, (0,0,255), 2)

    #Exibe o resultado gráfico
    if corte:
        cv2.imshow('img', imagem)
        cv2.waitKey(0)
    else:
        cv2.imshow('img', cv2.resize(imagem, [1200, 900]))
        cv2.waitKey(0)

    return imagem
```