

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE EXATAS E ENGENHARIAS**

GIOVANE COSTA DA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE VISÃO
COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO DO RAIOS DO GUME DE
FERRAMENTAS DE CORTE**

CAXIAS DO SUL

2020

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE EXATAS E ENGENHARIAS**

GIOVANE COSTA DA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE VISÃO
COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO DO RAI DO GUME DE
FERRAMENTAS DE CORTE**

Relatório apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia de Controle e Automação, Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa

CAXIAS DO SUL

2020

Silva, Giovane

IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO DO RAIÓ DO GUME DE FERRAMENTAS DE CORTE/
GIOVANE COSTA DA SILVA. – CAXIAS DO SUL, 2020-
29 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa

Trabalho de Conclusão de Curso II – UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE EXATAS E ENGENHARIAS , 2020.

1. Ferramenta de corte. 2. Raio do gume. 3. Visão computacional.

I. Dr. Guilherme Holsbach Costa. II. Universidade de Caxias do Sul. III. Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias. IV. Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

GIOVANE COSTA DA SILVA

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE VISÃO
COMPUTACIONAL PARA MEDIÇÃO DO RAIOS DO GUME DE
FERRAMENTAS DE CORTE**

Relatório apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia de Controle e Automação, Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias na Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em 04/12/2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Profa. Dra. Marilda Machado Spindola
Universidade de Caxias do Sul - UCS

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus por ter me dado saúde e forças para enfrentar o momento de pandemia que o mundo vem vivendo e os imprevistos que passei este ano.

A minha amiga, companheira e esposa pela ajuda, paciência e força dedicados a mim ao longo dos anos de estudo e principalmente no decorrer do Trabalho de Conclusão de Curso.

Ao meu filho por ser o motivo do meu empenho, persistência e dedicação por toda a minha graduação.

A meus pais, que sempre motivaram, incentivaram e priorizaram os meus estudos, mostrando-me a importância da educação na minha vida.

Ao meu professor, orientador e amigo Guilherme Holsbach pelo suporte e tempo dedicados a este trabalho.

Ao professor Rodrigo Zeilmann e sua equipe técnica que me auxiliaram na confecção e medição dos corpos de prova.

A Universidade de Caxias do Sul, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram todo o conhecimento aqui adquirido.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

O desempenho de um processo de usinagem é diretamente afetado pelas condições geométricas do gume da ferramenta de corte utilizada. Entretanto, os sistemas comerciais para avaliação dessas condições são substancialmente caros. Recentemente, um método de baixo custo, aqui chamado por LMCE (*LASER Measurement of the Cutting Edge*), foi proposto. Esse método, apesar de potencialmente promissor, se limita a um desenvolvimento teórico. Neste trabalho é então proposta a implementação do método LMCE, acompanhada de uma avaliação experimental de desempenho. Além de uma revisão sobre o tema, o método em estudo é apresentado com foco nas equações a serem implementadas. Experimentos são propostos e implementados e os resultados são submetidos a uma avaliação estatística.

Palavras-chave: usinagem, LASER, gume, raio do gume, medição.

ABSTRACT

The performance of a machining process is directly affected by the geometrical conditions of the cutting edge of the used tool. However, commercial systems for evaluating these conditions are substantially expensive. Recently, a low cost method, here called LMCE (LASER Measurement of the Cutting Edge), was proposed. This method, although potentially promising, is limited to a theoretical development. In this work, the implementation of the LMCE method is then proposed as well an experimental performance evaluation. In addition to a review on this topic, the method under study is presented with a focus on the equations to be implemented. Experiments are proposed and implemented and their results are presented and submitted to a statistical evaluation.

Keywords: machining, LASER, cutting edge, measurement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O gume de uma ferramenta de corte	10
Figura 2 – Método de medição do raio do gume proposto em (GARCEZ, 2019) . .	12
Figura 3 – Detalhes do gume	13
Figura 4 – Aplicação do LASER	14
Figura 5 – Vista do gume, superior e frontal	15
Figura 6 – Vista lateral e frontal do gume	16
Figura 7 – Gráficos da transformada de Hough	18
Figura 8 – Modelo de lentes finas	20
Figura 9 – Modelo corpos de prova	21
Figura 10 – Imagens capturadas	25
Figura 11 – Identificação das retas e distância A	26
Figura 12 – Identificação dos gumes e pontos P_{1f} , P_{2f} e P_{3f}	26
Figura 13 – Imagens binarizadas	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM	<i>Atomic Force Microscopy</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MSA	<i>Measurement system analysis</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
LMCE	<i>LASER Measurement of the Cutting Edge</i>

SUMÁRIO

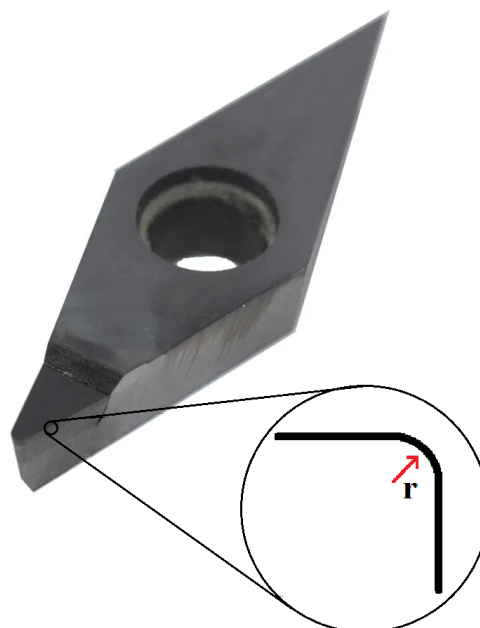
1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo Geral	12
1.2	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Conceitualização do gume	13
2.2	Visão geral do método LMCE	13
2.3	Metodologia de LMCE	15
2.4	Transformada de Hough	17
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	Hardware	19
3.2	Avaliação da espessura do LASER	20
3.3	Especificação dos corpos de prova	21
3.4	Análise do sistema de medição	22
3.5	Algoritmo	23
4	RESULTADOS	24
4.1	Medições	24
4.2	Avaliação dimensional	25
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, presenciamos o crescente monitoramento e controle de parâmetros dos processos de transformação da matéria prima (KURADA; BRADLEY, 1997). Um exemplo é a soldagem, que hoje possui alguns equipamentos e técnicas capazes de monitorar a quantidade de insumos utilizados na execução da tarefa, ou até mesmo controlar a utilização desses insumos melhorando a qualidade e produtividade do processo. Para tal controle é necessário que medições confiáveis de parâmetros relevantes sejam realizadas para o processo.

Outro processo globalmente difundido que merece destaque é a usinagem (MACHADO et al., 2015). Esse processo é qualificado principalmente pela remoção de material, o cavaco, no momento da transformação da matéria prima. Para remover material de um corpo, são empregadas as chamadas ferramentas de corte, as quais podem ser classificadas de acordo com o equipamento e técnica utilizada (ABNT, 2013). A parte provavelmente mais importante dessas ferramentas é o gume. Embora aparentemente esse gume forme um ângulo agudo, ele possui um raio, conforme ilustrado na Figura 1. O raio do gume, juntamente com outras características da ferramenta, protagoniza a operação de remoção de material. Como o gume pode sofrer desgaste, quebra ou lascamento ao longo de sua vida útil (PRASAD; RAMAMOORTHY, 2000), realizar o dimensionamento do raio do gume é de extrema relevância para o desempenho do processo e garantia da qualidade do produto final (FANG; SRINIVASA; MOSQUEA, 2011).

Figura 1 – O gume de uma ferramenta de corte



Fonte: (GARCEZ, 2019)

Grande parte das indústrias adota um indicador chamado disponibilidade de máquina. Esse indicador é baseado na relação do tempo que o equipamento tem disponível para operar com o tempo que ele ficou parado devido a alguma falha do processo ou problema de manutenção. Do tempo total de parada de máquina no processo de usinagem, 20% pode ser atribuído a falhas na ferramenta (KURADA; BRADLEY, 1997). Uma dessas falhas é o desgaste excessivo do gume. Esse tipo de falha pode gerar defeitos no resultado final do processo como, por exemplo, rugosidade fora do especificado, e pode ocasionar perdas no rendimento da máquina. Para mensurar o raio do gume é possível considerar dois métodos, o direto e o indireto. O método direto é caracterizado pela medição da própria ferramenta em questão. O método indireto se baseia na análise do resultado ou do processo de usinagem, em vez de se analisar a ferramenta de usinagem em si (KURADA; BRADLEY, 1997). Como exemplo, em vez de se medir o raio do gume, mede-se a rugosidade da superfície usinada ou parâmetros de força e de velocidade da ferramenta ou ainda a temperatura da superfície que está sendo usinada.

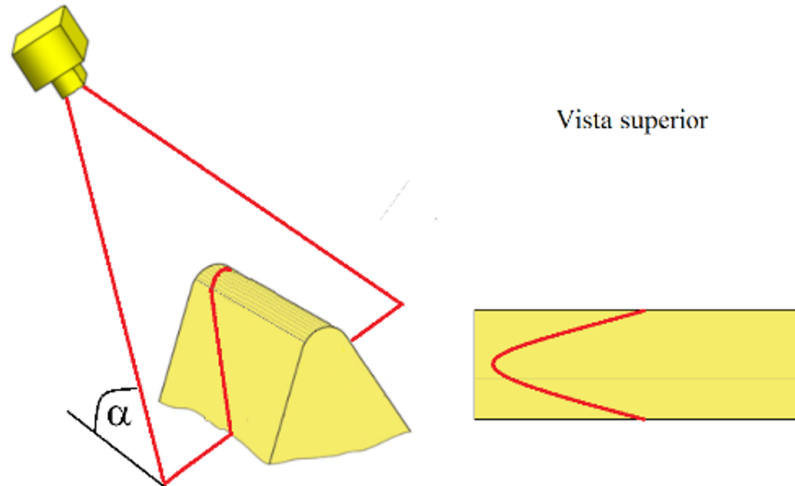
Os métodos indiretos recaem em sistemas de mais baixo custo e geralmente permitem que as condições físicas da ferramenta sejam avaliadas sem a interrupção do processo de usinagem. Já os métodos diretos, geralmente levam a medições mais precisas.

Considerando-se os métodos diretos, existem várias formas de medição. Dentre elas, a medição por proximidade é realizada através da utilização de sensores de contato (KURADA; BRADLEY, 1997). Outra forma de medição, utilizada apenas em laboratórios, é através da deposição de material radioativo sobre a peça. Nesta técnica, a ferramenta deve possuir uma quantidade conhecida de material radioativo em seu gume. No decorrer da usinagem, periodicamente, avalia-se a quantidade de material radioativo transferida para a peça, ou restante na ferramenta (KURADA; BRADLEY, 1997). A medição do raio do gume também pode ser feita em microscópios eletrônicos de varredura (MEV), entretanto, este é um método destrutivo para a maioria das ferramentas, que precisam ser seccionadas de forma que se possa avaliar o perfil do gume (PALUBICKI et al., 2014). De todos, o método provavelmente mais empregado é o de variação de foco (DANZL; HELMLI; SCHERER, 2011). Esse método monta uma imagem tridimensional da ferramenta através de imagens bidimensionais (fatias) com profundidade de campo muito pequena. Ele atinge boas precisões (DANZL; HELMLI; SCHERER, 2011), mas o equipamento de medição possui alto valor de mercado.

Em (GARCEZ, 2019), é proposto um método direto de medição, de baixo custo, que utiliza um feixe de LASER projetado sob um determinado ângulo sobre o gume da ferramenta. A projeção do LASER sobre a ferramenta gera uma imagem conforme ilustrado na Figura 2. A geometria resultante da projeção do LASER é capturada por uma câmera e analisada computacionalmente. Ainda que esse método seja bem fundamentado, aparentando ser uma forma promissora de medição, o trabalho proposto por GARCEZ

(2019) não apresenta resultados práticos, tratando-se fundamentalmente de uma proposta teórica.

Figura 2 – Método de medição do raio do gume proposto em (GARCEZ, 2019)



Fonte: (GARCEZ, 2019), adaptado

Neste trabalho é proposta a implementação do método proposto em (GARCEZ, 2019), aqui chamado de *medição do raio do gume por projeção de LASER* (LMCE — *LASER measurement of the cutting edge*). Para tanto, no próximo capítulo o método em estudo é detalhadamente revisado. No Capítulo 3 as condições de aplicação e de testes são especificadas. No Capítulo 4 os resultados são apresentados e discutidos, no capítulo subsequente é apresentada a proposta de trabalhos futuros e este trabalho é concluído.

1.1 OBJETIVO GERAL

Implementar e testar o método LMCE (GARCEZ, 2019) para medição do raio do gume

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar em linguagem de simulação de alto nível o método proposto em (GARCEZ, 2019);
- Avaliar a aplicabilidade do método a diferentes tamanhos de gume;
- Avaliar o sistema de medição através dos resultados obtidos;
- Apoiar o Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Universidade de Caxias do Sul na implementação e avaliação de processos de medição de raio de gume por imagens.

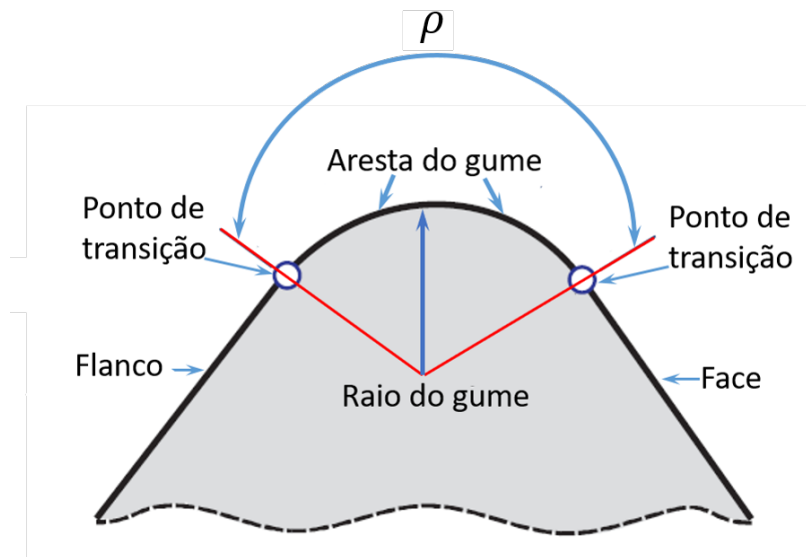
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, o método proposto em (GARCEZ, 2019) para realizar a medição do raio do gume de uma ferramenta de usinagem é apresentado e discutido.

2.1 CONCEITUALIZAÇÃO DO GUME

As ferramentas de corte utilizadas no processo de usinagem podem ser classificadas pelas suas diferentes geometrias e funções dentro do processo. Mas todas possuem uma característica em comum, o gume. O gume, mesmo sendo conhecido e documentado há mais de cinquenta anos, apenas nas últimas décadas recebeu a devida importância, sendo destacado como principal responsável por diversos aspectos do processo de usinagem (YUSSEFIAN; KOSHY, 2013). O gume é uma região que se estende do flanco até a face da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 3. Essa região forma um raio, cuja medição é o objeto de interesse deste trabalho. Diferente da ilustração, na maioria dos casos práticos a ferramenta (flanco, gume e face) não pode ser considerada simétrica, devido ao desgaste da ferramenta e ao seu processo de fabricação ou afiação.

Figura 3 – Detalhes do gume



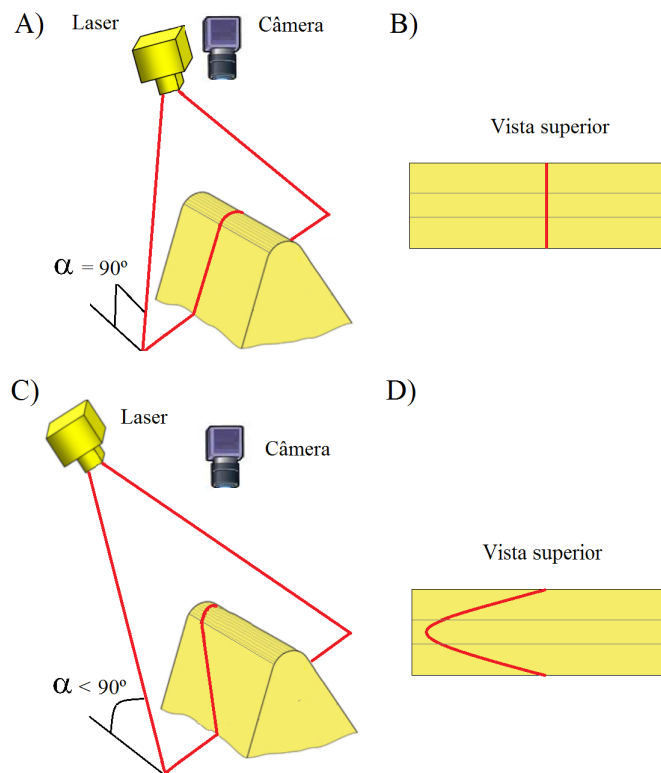
Fonte: (YUSSEFIAN; KOSHY, 2013), adaptado

2.2 VISÃO GERAL DO MÉTODO LMCE

Em (GARCEZ, 2019), é proposto um método para realizar a medição do raio do gume de uma ferramenta de corte. Nesse método é proposta a projeção de um feixe de LASER colimado na forma de uma linha reta sobre o gume da ferramenta, cuja imagem

é capturada por uma câmera e avaliada por um algoritmo de visão computacional. Se o emissor de LASER, neste caso, estiver alinhado com o eixo focal da lente do sistema de aquisição (Figura 4-A), a projeção do LASER será percebida pela câmera sem distorções (Figura 4-B). Sendo o emissor de LASER e a câmera posicionados em ângulos diferentes (Figura 4-C), o feixe sofre uma distorção projetiva (Figura 4-D), que pode ser relacionada com a dimensão do raio do gume.

Figura 4 – Aplicação do LASER

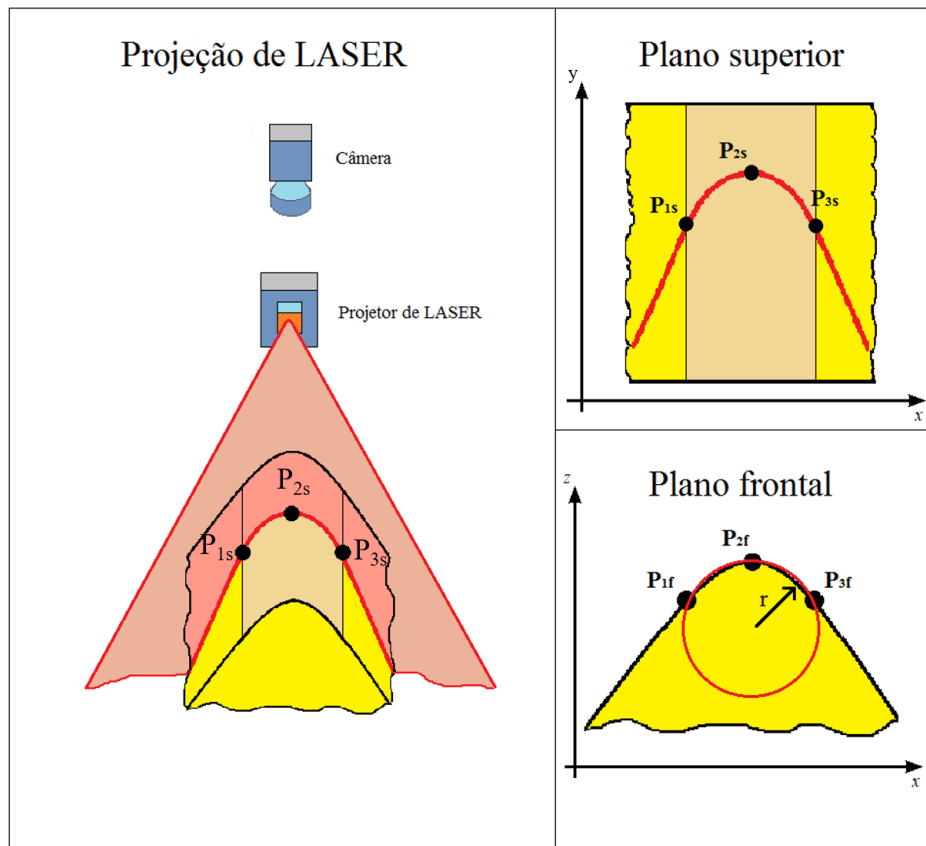


Fonte: (GARCEZ, 2019), adaptado

O método LMCE relaciona a distorção do feixe de LASER com o raio do gume a partir de três pontos a serem identificados na imagem, conforme ilustrado na Figura 5. Os pontos P_1 , e P_3 caracterizam os pontos de transição face-gume e flanco-gume (ver Figura 3). O ponto P_2 caracteriza a amplitude da distorção do LASER (comparar figuras 4-B e 4-D), Esses pontos têm projeções (também ilustradas na Figura 5) nos planos superior respectivamente denotadas por P_{1s} , P_{2s} e P_{3s} e projeções no plano frontal respectivamente denotadas por P_{1f} , P_{2f} e P_{3f} . O plano superior corresponde à imagem vista pela câmera, e os pontos P_{1s} , P_{2s} e P_{3s} podem ser encontrados a partir dela. O plano de frontal corresponde à projeção de interesse, na qual é possível visualizar o perfil do gume e, portanto, medir seu raio. GARCEZ (2019) propõe que o raio do gume seja estimado a partir de P_{1f} , P_{2f} e P_{3f} . Entretanto, esses pontos precisam ser estimados a partir de P_{1s} , P_{2s} e P_{3s} .

Além dessa proposta de configuração do sistema físico e de um algoritmo para medição do gume, em (GARCEZ, 2019) é apresentada uma análise teórica acerca das

Figura 5 – Vista do gume, superior e frontal



Fonte: (GARCEZ, 2019), adaptado

dimensões que o método é capaz de medir. Nessa análise a espessura do feixe de LASER é relacionada com um valor de raio a partir do qual o método proposto comprovadamente não é capaz de medir, ou seja, não é provado que o método é capaz de medir raios maiores que uma determinada dimensão, mas é provado que ele não é capaz de medir raios menores que uma determinada dimensão.

A relação entre o raio a ser medido e a espessura do feixe de LASER é especialmente importante, visto que, com isso, passa a ser possível medir raios tão pequenos quanto se consiga colimar com precisão um feixe de LASER.

2.3 METODOLOGIA DE LMCE

Inicialmente, é necessário encontrar na imagem adquirida os pontos P_{1s} , P_{2s} e P_{3s} . Adquirida a imagem é proposto que inicialmente sejam identificadas as linhas retas que caracterizam o flanco e a face da ferramenta. Para tal identificação GARCEZ (2019) sugere o uso da Transformada de Hough (TH) para detecção de retas, explicada na próxima seção. Em (GARCEZ, 2019) foi utilizada uma implementação proprietária da TH (Matlab®) que já fornece os pontos de início e fim dos segmentos de reta detectados. Os extremos mais próximos entre os segmentos das retas correspondentes ao flanco e à face são identificados

como sendo P_{1s} e P_{3s} . Considerando-se P_{1s} e P_{3s} alinhados sobre o eixo x (eixo das abscissas), P_{2s} corresponde ao ponto de maior ordenada na imagem.

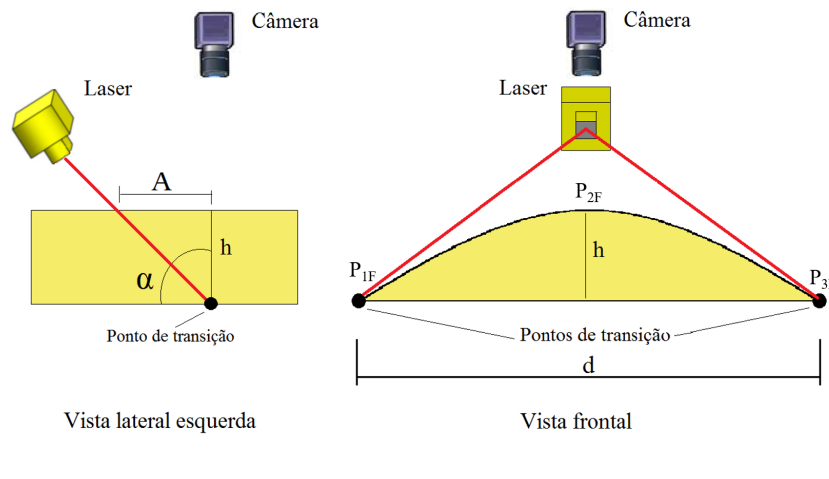
Com um sistema de referência em que o eixo x (ver Figura 5) passe por P_1 e por P_3 , é possível representar os pontos no plano frontal pelo seguinte sistema (GARCEZ, 2019):

$$\begin{cases} P_{1f} = (x_{P_{1s}}, z_0) \\ P_{2f} = (x_{P_{2s}}, z_0 + h) \\ P_{3f} = (x_{P_{3s}}, z_0) \end{cases} \quad (2.1)$$

no qual a coordenada z_0 pode ser estipulada por conveniência e h é uma grandeza do plano frontal (xz) ilustrada na Figura 6, que pode ser relacionada com a amplitude (A) da distorção geométrica do feixe de LASER de acordo com (GARCEZ, 2019):

$$h = A \tan(\alpha) \quad (2.2)$$

Figura 6 – Vista lateral e frontal do gume



Fonte: (GARCEZ, 2019)

A amplitude A pode ser determinada pela equação da distância de um ponto, P_{2s} , à reta que passa por P_{1s} e P_{3s} (ANTON; RORRES, 2013):

$$A = \frac{|(y_{P_{3s}} - y_{P_{1s}})x_{P_{2s}} - (x_{P_{3s}} - x_{P_{1s}})y_{P_{2s}} + x_{P_{3s}}y_{P_{1s}} - y_{P_{3s}}x_{P_{1s}}|}{\sqrt{(y_{P_{3s}} - y_{P_{1s}})^2 + (x_{P_{3s}} - x_{P_{1s}})^2}} \quad (2.3)$$

em que $x_{P_{is}}$ e $y_{P_{is}}$ ($1 \leq i \leq 3$) são as coordenadas dos três pontos no plano xy .

Determinada a amplitude da distorção, A , através de (2.3), o parâmetro h , através de (2.2), e as coordenadas dos três pontos no plano frontal, através de (2.1), nesta ordem, GARCEZ (2019) sugere a utilização de uma ferramenta que dimensione o círculo que interliga esses três pontos (P_{1f} , P_{2f} e P_{3f}). A ferramenta proposta é a Transformada de Hough para círculos, que também é explicado na próxima seção. O raio dessa circunferência corresponde, então, ao raio do gume.

Em (GARCEZ, 2019), é determinada a espessura (máxima) do feixe de LASER a partir da qual é garantida a inviabilidade de medir um determinado raio. Essa relação é dada por:

$$S = \frac{l_{\max}}{r} \quad (2.4)$$

em que S representa a relação entre a espessura máxima do LASER (l_{\max}) em função do raio do gume (r). GARCEZ (2019) conclui que a relação entre espessura do LASER e a dimensão do raio do gume passível de medição é 6,5. Em outras palavras, valores de S superiores a 6,5 correspondem a valores de raios que não podem ser medidos pelo método proposto.

2.4 TRANSFORMADA DE HOUGH

A transformada de Hough é um método proposto por Hough (1962) para identificação de objetos em uma imagem (linhas, círculos e semicírculos) (GONZALEZ; WOODS, 2010). Essa proposta surgiu da necessidade de uma metodologia viável computacionalmente para a época, pois os outros métodos de identificação de objetos acabavam tendo uma elevada quantidade de processamento de dados.

O conceito de aplicação deste método para retas se caracteriza pela identificação de dois pontos no plano xy de uma imagem, (x_i, y_i) e (x_j, y_j) (Figura 7-a). Esses pontos podem ser avaliados utilizando a equação geral da reta:

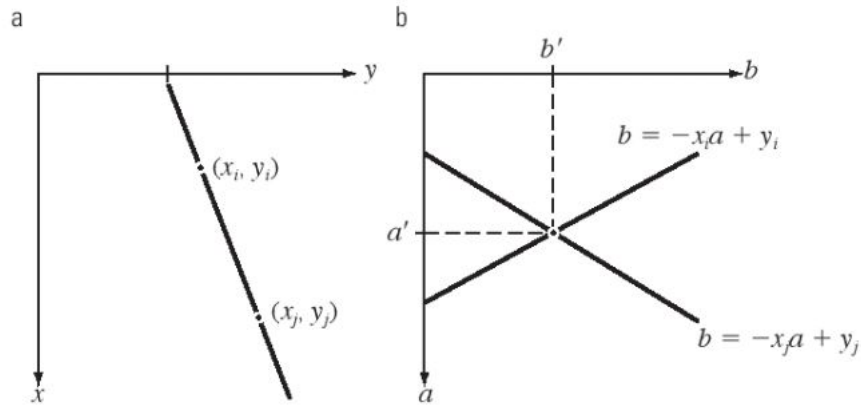
$$y = ax + b \quad (2.5)$$

Como ambos os pontos já têm suas coordenadas conhecidas, os parâmetros a e b que definem a reta que os une podem ser calculados manipulando a equação (2.5):

$$b = -ax + y \quad (2.6)$$

Através da equação (2.6), tendo-se dois valores para o par (x, y) , obtém-se um sistema de duas equações e duas incógnitas (a, b) , que poderia ser resolvido analiticamente. Numericamente, é possível definir todos os valores válidos para os parâmetros a e b para cada um dos pontos, mas os valores correspondentes a reta que interliga ambos os pontos no plano xy é identificada pelo local da intersecção das retas no plano dos parâmetros, conforme ilustrado na Figura 7-b. As coordenadas a' e b' (ponto de cruzamento entre as retas no espaço dos parâmetros) correspondem a valores dos parâmetros (a, b) que atendem às duas equações. Em outras palavras, de todas as retas que podem passar por cada um dos pontos (x_i, y_i) e (x_j, y_j) , o ponto de cruzamento no espaço dos parâmetros indica os coeficientes da única reta que pode passar simultaneamente pelos dois pontos 7-a.

Figura 7 – Gráficos da transformada de Hough



Fonte: (GONZALEZ; WOODS, 2010)

Considerando a metodologia de identificação dos parâmetros, GONZALEZ; WOODS (2010) apresentam uma proposta de etapas para implementação da transformada de Hough. Sobre a imagem original deve ser aplicado um método de detecção de bordas seguido de binarização. Após, faz-se uma varredura *pixel a pixel* na região de interesse, buscando-se pontos na imagem manipulada que correspondam a bordas. Cada ponto encontrado tem suas coordenadas aplicadas à equação (2.6). Para cada um desses pontos, varia-se o parâmetro a e calcula-se b , formando-se retas no espaço dos parâmetros. O espaço dos parâmetros deve ser alocado em memória como sendo um contador (matricial, inicializado com zeros). Para cada reta formada, deve-se incrementar as respectivas células do contador. Depois de processar todos os pontos da imagem original, cada um formando uma reta no espaço de parâmetros, a célula do acumulador que atingir o valor mais alto (com o maior número de cruzamentos) indica os parâmetros da reta mais proeminente na imagem. GONZALEZ; WOODS (2010) sugerem ainda que o espaço de parâmetros seja sub-amostrado, de forma a lidar com não-idealidades na detecção das bordas das imagens.

A implementação da Transformada de Hough para círculos utiliza o mesmo conceito aplicado para retas. Nesse caso é utilizada a equação reduzida da circunferência:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2 \quad (2.7)$$

em que x_c e y_c são as coordenadas do centro e r é o raio da circunferência.

De forma similar à detecção de retas, para cada ponto encontrado em uma imagem binarizada, varia-se os parâmetros x_c , y_c e r , registrando-se os resultados em um acumulador (agora com três dimensões). Ao final, a célula do acumulador com maior valor corresponde aos parâmetros da circunferência mais proeminente na imagem.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são detalhados os passos propostos para a implementação do método formulado em (GARCEZ, 2019).

3.1 HARDWARE

Para aquisição das imagens, neste trabalho será utilizado um sensor óptico¹ com resolução de 25M pixels e tamanho de abertura f-1.7. A projeção do LASER será realizada com um emissor de LASER colimado em linha, da marca LASERLine, modelo LRM-03/650 L, com comprimento de onda de 650 nm (vermelho).

O posicionamento do iluminador LASER é definido pelo ângulo α , sendo que, quanto menor o α (Figura 4) mais evidente a distorção do feixe de LASER a ser medida. Além disso, ângulos elevados demandam profundidades de campo² maiores e, portanto, podem prejudicar o foco do feixe de LASER a ser detectado nas imagens. Neste trabalho é proposto o menor α para o qual a distorção a ser medida e as linhas que representam a face e o flanco fiquem dentro do campo de visão da câmera. Para tanto, aproxima-se o efeito do conjunto de lentes utilizado, pelo modelo de lentes finas ilustrado na Figura 8, para o qual

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{n} + \frac{1}{n'} \quad (3.1)$$

em que f' é a distância focal da lente, $n < 0$ é a distância entre o centro da lente e o objeto e n' é a distância entre o centro da lente e o plano da imagem (sensor). Por relação de triângulos, segue que

$$\frac{z'}{z} = -\frac{n'}{n} \quad (3.2)$$

A razão

$$\beta = \frac{z'}{z} \quad (3.3)$$

é uma relação de ampliação da imagem, que leva a

$$\beta = \frac{t}{c} \quad (3.4)$$

em que c é o campo de visão e t o tamanho do sensor. Segue então de (3.1) e de (3.4) que

$$c = t \left(\frac{n}{f'} - 1 \right) \quad (3.5)$$

¹ Câmera principal de um telefone celular Samsung, modelo SM-A307GT

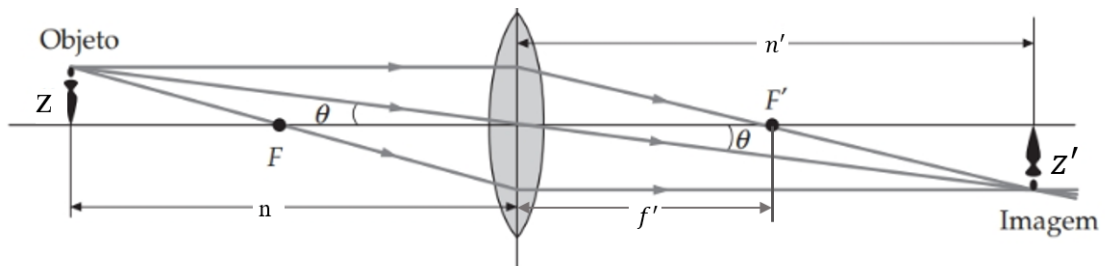
² Profundidade de campo é a distância entre o plano de foco até o ponto de início da perda de nitidez da imagem.

Considerando-se o campo de visão como sendo³ $c = 2A$, segue direto de (2.2) e (3.5) que

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2hf'}{tn - tf'}\right) \quad (3.6)$$

Na determinação de α , deve-se considerar o máximo h dentre os corpos de prova, de forma que nenhuma peça incorra em projeções fora do campo de visão. Sendo t um parâmetro da câmera fixo, apenas as variáveis n e f' definem-se como parâmetros configuráveis no sistema de aquisição, de modo a possibilitar o posicionamento do emissor de LASER com o menor α possível.

Figura 8 – Modelo de lentes finas



Fonte: (TIPLER, 2009), adaptado

Em relação à iluminação, é proposto que as imagens sejam adquiridas sem a presença de outra fonte luminosa que não o LASER. Com isso, busca-se eliminar eventuais interferências e facilitar a segmentação do LASER.

3.2 AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DO LASER

Conforme discutido no final da Seção 2.2, o método proposto vincula o menor raio do gume passível de ser medido à espessura da projeção do feixe de LASER sobre o gume. Sendo assim, faz-se necessário que essa espessura seja medida. Para tanto, é proposto que o LASER seja inicialmente projetado sobre uma superfície plana que esteja na mesma distância de trabalho prevista para o topo do gume. A cena adquirida pela câmera deve conter a projeção de um corpo padrão, de dimensão conhecida, para calibração de dimensional. O feixe de LASER é então segmentado com base no componente de intensidade dos *pixels* e no limiar de Otsu (OTSU, 1979). A espessura do feixe é então comparada visualmente com o tamanho do corpo padrão (em *pixels*), por meio de um editor de imagens.

As medições de calibração devem ser prioritariamente realizadas próximas ao centro da imagem, para reduzir erros oriundos de distorções no conjunto de lentes. De qualquer forma, cabe ressaltar que em função do campo de visão ter dimensões próximas às do

³ Preliminarmente será considerado $c = 2A$, pois estima-se que essa dimensão seja suficiente para detectar a deformação do LASER e as linhas que representam o flanco e a face da peça através da Transformada de Hough.

sensor da câmera (em relação a outras aplicações mais convencionais de fotografia), essas distorções, mesmo nas regiões periféricas da imagem, são substancialmente reduzidas.

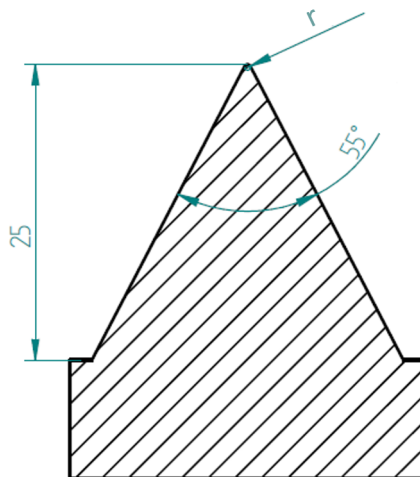
Para medição da espessura do LASER é proposta a aquisição de duas cenas, uma sem o uso de outra fonte de iluminação além do LASER, de forma a facilitar a segmentação, e outra com uma fonte auxiliar, de forma que se obtenha uma boa visualização do padrão de calibração. De posse das dimensões, em *pixels*, do corpo padrão (p_p), das dimensões em milímetros deste mesmo corpo (p_{mm}), e da espessura do LASER (e_p), também em *pixels*, é possível definir a largura do LASER (l_{max}), em milímetros, de acordo com:

$$l_{max} = e_p \frac{p_{mm}}{p_p} \quad (3.7)$$

3.3 ESPECIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com o valor de l_{max} definido em (3.7), é possível determinar o menor raio passível de medição ($r = r_{min}$), através de (2.4), em que $S = 6,5$, conforme determinado em (GARCEZ, 2019). Neste trabalho são utilizados seis gumes com diferentes raios. Os gumes são confeccionados com raios de dimensão $1,25r_{min}$, $1,5r_{min}$, $2r_{min}$, $2,5r_{min}$, $5r_{min}$ e $10r_{min}$. Considerando o mesmo ângulo ρ apresentado na Figura 3 na fabricação de todos os corpos de prova, todos os gumes têm ângulos de 55° entre face e flanco, assim como a altura entre o topo do gume e a base do corpo de prova será igual para todos eles, conforme a Figura 9.

Figura 9 – Modelo corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

O material definido para fabricação dos corpos de provas foi resina *Cibatool*, pois o mesmo possui baixa reflexão de luz, facilitando as aquisições das imagens do LASER sobre os corpos de prova. Utilizando o método proposto na seção anterior para medir a espessura do LASER utilizado neste trabalho, verificou-se que o mesmo possui uma espessura de

1,3mm. Assim, segue direto de (2.4) que

$$r_{min} = 0,2\text{mm} \quad (3.8)$$

Deste modo, os raios dos gumes foram usinados com as dimensões

$$\left\{ \begin{array}{l} 1,25r_{min} = 0,25\text{mm} \\ 1,5r_{min} = 0,3\text{mm} \\ 2r_{min} = 0,4\text{mm} \\ 2,5r_{min} = 0,5\text{mm} \\ 5r_{min} = 1\text{mm} \\ 10r_{min} = 2\text{mm} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

3.4 ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Um sistema de medição pode ser caracterizado como um método para aquisição de uma ou mais grandezas físicas de um determinado modelo. Alguns dos componentes desse método são o instrumento de medição, a técnica de utilização do instrumento, o observador, o ambiente e o modelo a ser medido. Como todos esses componentes podem apresentar variações, a confiabilidade do sistema, por via de regra, demanda uma cuidadosa avaliação.

A análise de um sistema de medição (*Measurement System Analysis* — MSA) é uma técnica estatística amplamente utilizada em sistemas de gestão da qualidade. Com essa ferramenta é possível identificar o grau de variação imposto por cada um dos componentes do sistema de medição, assim como a repetibilidade e precisão do sistema como um todo. Segundo ASTM (2011), a avaliação de repetibilidade simples pode ser realizada com pelo menos duas medições de cada objeto, executadas mediante condições idênticas e pelo mesmo observador. Para tanto, algumas figuras de mérito são estabelecidas a seguir.

O erro de medição (diferença entre uma medida realizada pelo sistema em análise e uma medida padrão realizada por um sistema de referência) é definido como

$$e_{ij} = p_i - k_{ij} \quad (3.10)$$

em que p_i é a medida encontrada pelo método de referência e k_{ij} é o valor da j -ésima medida do i -ésimo objeto, o método de referência utilizado neste trabalho será um projetor de perfil. Após realizadas as medições com o sistema proposto, os corpos de prova serão seccionados para que as medidas de referência sejam obtidas.

A energia do erro de medição (na norma, chamada de variância da repetibilidade) pode ser estimada a partir de (ASTM, 2011)

$$\epsilon^2 = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij}^2}{IJ} \quad (3.11)$$

em que I é a quantidade total de objetos a serem medidos e J é a quantidade total de medições realizadas em cada objeto. A margem de erro das medidas, então, pode ser definido como (ASTM, 2011):

$$\mathcal{M} = \bar{e}_{ij} \pm u \sqrt{\frac{\epsilon^2}{I}} \quad (3.12)$$

em que \bar{e}_{ij} é o erro médio de medição e u é um parâmetro selecionado da distribuição de Student com base no número de corpos de prova avaliados.

Para avaliação do método LMCE, é então realizado um estudo de MSA, verificando o grau de repetibilidade e precisão. Para isso, serão consideradas quatro medições para cada um dos seis corpos de prova e todas sendo realizadas por apenas um observador, totalizando 24 medições, sendo que cada corpo de prova não deve sofrer qualquer variação entre as medições. Após as medições, os valores obtidos serão utilizados nos cálculos das equações (3.11) e (3.12).

3.5 ALGORITMO

O feixe de LASER é segmentado com base na intensidade luminosa. Para tanto, as imagens adquiridas são inicialmente convertidas para tons de cinza e binarizadas com um limiar definido pelo método de Otsu (GONZALEZ; WOODS, 2010). O resultado da binarização é submetido a uma filtragem linear passa-altas, de forma a destacar apenas a envoltória do feixe de LASER.

A Transformada de Hough, discutida na Seção 2.4, é então aplicada para a detecção das linhas que delimitam a face e o flanco, sendo os pontos finais das retas destacados e armazenados. É traçado um segmento de reta entre os dois pontos finais (limites face-gume e flanco-gume) e, a partir do ponto médio deste segmento, em direção perpendicular a ele, é iniciada uma varredura *pixel a pixel* até que se encontre a borda externa do feixe de LASER segmentado. A distância varrida corresponde ao parâmetro A , de (2.2), a partir do qual se obtém h . Esses três pontos são utilizados para aplicação da Transformada de Hough para círculos e o raio do gume é obtido diretamente do resultado da transformada. Por fim, os parâmetros estimados são utilizados para traçar a circunferência estimada sobre as imagens adquiridas, de forma a ilustrar o resultado obtido em cada medição.

4 RESULTADOS

Este capítulo está dividido em duas seções. A primeira apresenta os resultados das medições obtidas pelo método proposto, enquanto a segunda apresenta os resultados da avaliação estatística do método LMCE.

4.1 MEDIÇÕES

Conforme mencionado na Seção 3.1, o ângulo de utilização do feixe de LASER sobre a face do corpo de prova (α) foi definido como o menor ângulo para o qual a distorção a ser medida e as linhas que representam a face e o flanco fiquem dentro do campo de visão da câmera. Como neste trabalho está sendo utilizado um sistema de aquisição que resulta em um campo de visão elevado, o feixe de LASER foi posicionado a 15° em relação a superfície do corpo de prova, dispensando o equacionamento proposto na Seção 3.1. Os seis corpos de prova foram posicionados sob a projeção do LASER e 24 imagens (quatro de cada corpo de prova) foram capturadas. Por fim, uma régua foi posicionada no lugar dos corpos de prova e uma vigésima quinta imagem foi adquirida. Essa imagem teve como objetivo a calibração do sistema de medição por imagens. Uma imagem de cada corpo de prova é ilustrada na Figura 10.

As medidas estimadas pelo algoritmo proposto (k_{ij}) são apresentadas na tabela 1. Comparando-se com o valor de referência (p_i), é possível notar que os resultados apresentam consistência para os corpos de prova com raios de 2mm e de 1mm. Para os demais corpos de prova, os resultados parecem muito similares, indicando uma saturação do sistema de medição (possivelmente em raios de aproximadamente 0,7mm).

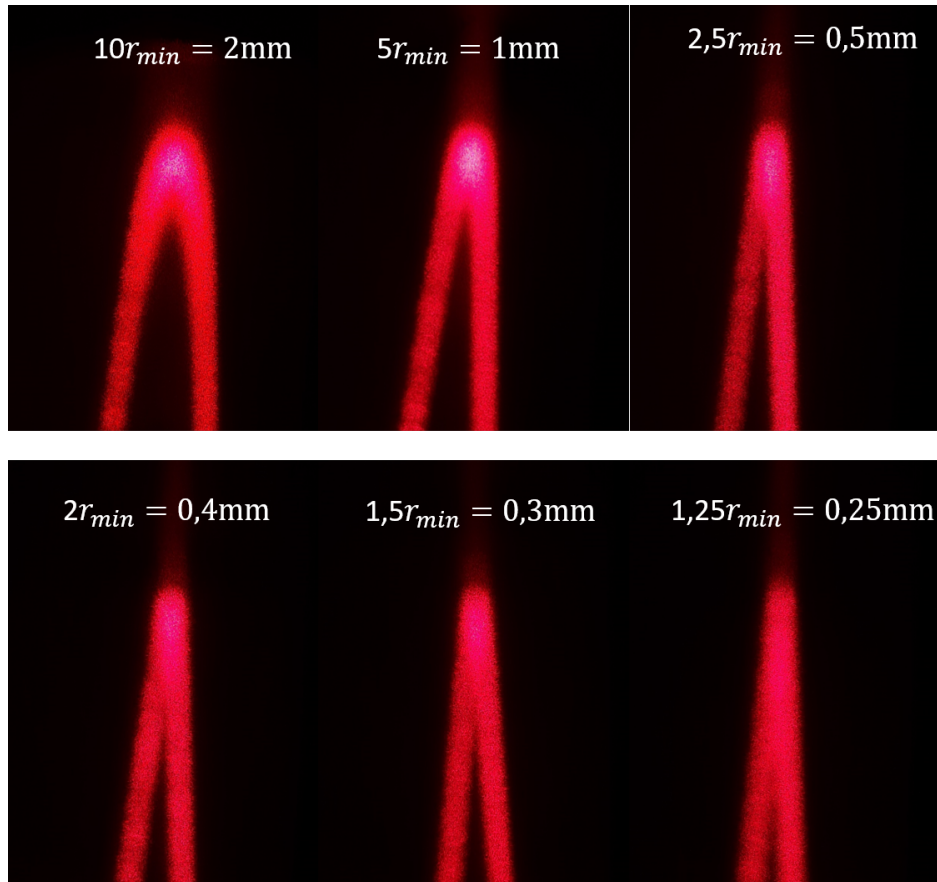
Tabela 1 – Resultados obtidos

i	k_{i1}	k_{i2}	k_{i3}	k_{i4}	p_i
1	1,9968	2,0119	2,1461	2,0988	1,9990
2	0,9392	0,9715	0,9715	0,9714	0,9930
3	0,6854	0,6839	0,6818	0,6744	0,4910
4	0,7025	0,7042	0,7017	0,7013	0,3760
5	0,6581	0,6816	0,6668	0,6750	0,3200
6	0,5946	0,5948	0,5870	0,5796	0,2750

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Para realizar a identificação dos círculos e das retas de flanco e de face nas imagens, os parâmetros da Transformada de Hough foram sintonizados de forma individual, de acordo com as características de cada aquisição. De forma a reduzir o tempo de processamento

Figura 10 – Imagens capturadas



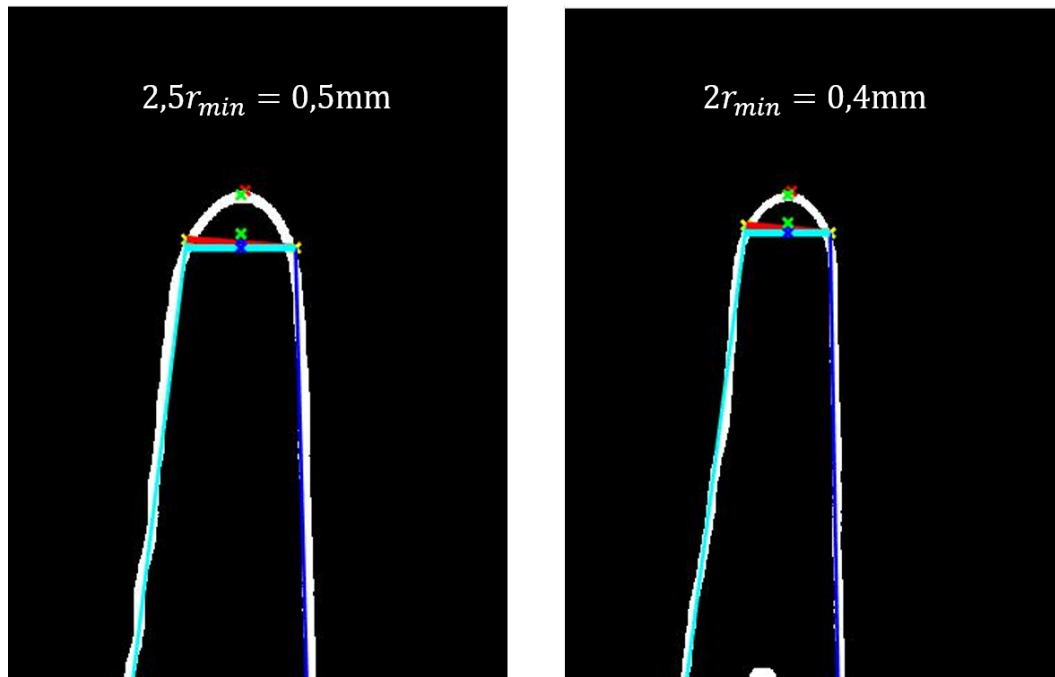
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

e o número de retas e de circunferências encontradas em cada imagem, regiões de busca foram delimitadas em cada imagem, no entorno das bordas de interesse. Resultados de detecção das retas de face e flanco dos corpos de prova com raios de 0,4mm e de 0,5mm são ilustrados na Figura 11. As estimativas dos raios dos gumes desses corpos de prova juntamente com os pontos P_{1f} , P_{2f} e P_{3f} são apresentadas na Figura 12. Esses resultados ilustram uma correta detecção da borda externa da projeção do LASER sobre o gume. Isso sugere que a incapacidade de medir raios com tais dimensões é oriunda da similaridade entre a geometria da projeção do LASER conforme ilustrado na Figura 13 nos dois casos e não do algoritmo de detecção de círculos.

4.2 AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

A partir dos resultados apresentados na tabela 1 e de (3.11), foi calculada a energia do erro de medição do método LMCE, considerando apenas as medições obtidas com os gumes de raio 2mm e 1mm, o que leva a um valor de $\epsilon^2 = 0,0045$. Considerando-se a tabela de *Student*, o nível de confiança bilateral é de 90%, com dois graus de liberdade ($u = 2,92$). Substituindo-se o valor de u em (3.12), é possível determinar o erro médio e a

Figura 11 – Identificação das retas e distância A



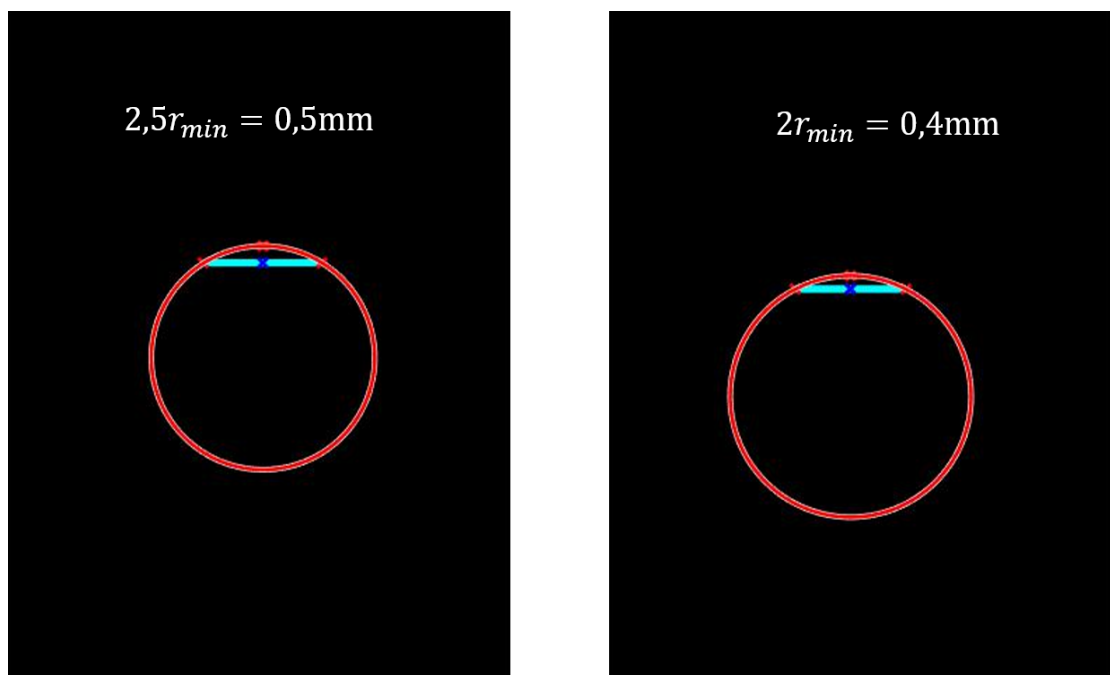
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

margem de erro do método para um intervalo de confiança de 90% como sendo:

$$\mathcal{M} = 0,0173 \pm 0,1386 \quad (4.1)$$

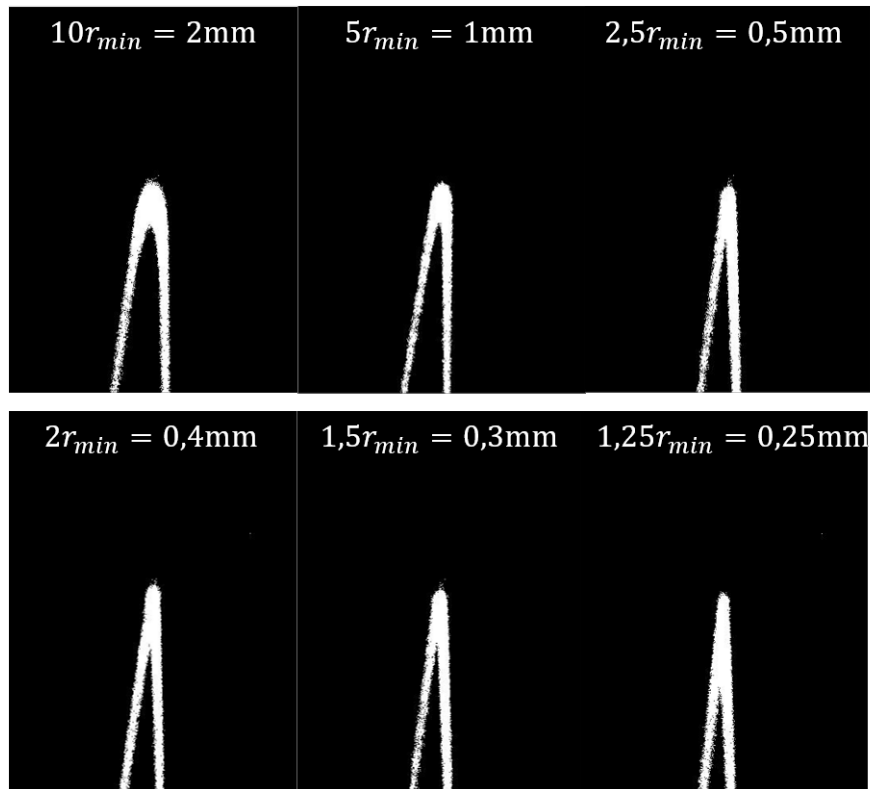
Há de ser considerado que erros médios podem ser compensados pela calibração do sistema (a polarização do erro pode ser compensada por software, *a posteriori*, por

Figura 12 – Identificação dos gumes e pontos P_{1f} , P_{2f} e P_{3f}



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

Figura 13 – Imagens binarizadas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

exemplo). Realizando-se uma avaliação de variância em (3.11), substituindo-se o valor p_i pela média do erro entre as medições de cada corpo de prova (\bar{k}_i), utilizando apenas as medições referentes aos gumes de raio 2mm e 1mm, chega-se em $\sigma_d^2 = 0,0020$.

Da mesma forma, é possível avaliar a margem de erro utilizando (3.12), o que leva a

$$\mathcal{M} = 0,0 \pm 0,0923 \quad (4.2)$$

Na avaliação da variância das medições é possível verificar um valor baixo quando comparada a energia do erro com os valores de referência. Entretanto, o valor da margem de erro é elevada se comparada à margem das medições de referência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi implementado um método de medição de raios de gume. Esse método foi originalmente proposto em (GARCEZ, 2019), como um trabalho integralmente teórico. Nesta implementação, gumes foram simulados em corpos de prova, usinados em resina, e uma avaliação de desempenho foi apresentada, considerando hardware (iluminador LASER e sistema de aquisição de imagens) de baixo custo.

A análise proposta em (GARCEZ, 2019) conclui que raios 6,5 vezes menores que a espessura do LASER não podem ser medidos pelo método em questão. Porém, o autor não garante que raios superiores a esse limite possam ser medidos com o método proposto. Nos experimentos desenvolvidos neste trabalho foi verificada a relação entre raio e espessura do LASER, já que os raios passíveis de medição foram 0,65 e 1,3 vezes menores que a espessura do LASER. O limite de medição foi estimado como sendo raios aproximadamente 1,86 vezes menores que a espessura do LASER.

Como trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de um método de medição com base em processamento estatístico, em vez do processamento morfológico, além de inclusão de condições realistas, como por exemplo a utilização de gumes não simétricos e materiais metálicos na composição dos corpos de prova, o que acarretará em estudos mais complexos na parte de iluminação e aquisição de imagens.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 3002-1: Grandezas básicas em usinagem e retificação**. [S.l.]: ABNT, 2013.
- ANTON, Howard; RORRES, Chris. **Elementary Linear Algebra, Binder Ready Version: Applications Version**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- ASTM. **E2782: Standard Guide for Measurement Systems Analysis (MSA)**. [S.l.]: ASTM, 2011.
- DANZL, Reinhard; HELMLI, Franz; SCHERER, Stefan. Focus variation – a robust technology for high resolution optical 3d surface metrology. **Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering**, Alicona, v. 3, n. 57, p. 245–256, 2011.
- FANG, Ning; SRINIVASA, P.; MOSQUEA, S. A comparative study of sharp and round-edge tools in machining with built-up edge formation: cutting forces, cutting vibrations, and neural network modeling. **Int J Adv Manuf Technol**, Springer-Verlag, v. 53, p. 899–910, 2011.
- GARCEZ, Vangeliz Cavalin. Uma investigação sobre medição do raio de gume de ferramentas de corte por visão computacional. Universidade de Caxias do Sul, 2019.
- GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard C. **Processamento digital de imagens**. [S.l.]: Pearson Education do Brasil Ltda., 2010.
- KURADA, S; BRADLEY, C. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. **Computers in industry**, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 55–72, 1997.
- MACHADO, Alisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. [S.l.]: Edgard Blucher Ltda, 2015.
- OTSU, Nobuyuki. A threshold selection method from gray-level histograms. **Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, IEEE, smc 9, n. 1, p. 62–66, 1979.
- PALUBICKI, Bartosz et al. A method and device for 3d recognition of cutting edge micro geometry. **Drvna Industrija**, Izvorni Znanstveni rad, v. 65, n. 1, p. 11–19, 2014.
- PRASAD, K Nirajan; RAMAMOORTHY, B. Tool wear evaluation by stereo vision and prediction by artificial neural network. **Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 112, n. 1, p. 43–52, 2000.
- TIPLER, Paulo A. **Física para Cientistas e Engenheiros - Vol. 2 - Eletricidade e Magnetismo, Ótica, 6ª edição**. [S.l.]: Grupo GEN, 2009.
- YUSSEFIAN, N.Z.; KOSHY, P. Parametric characterization of the geometry of honed cutting edges. **Precision Engineering**, Elsevier, v. 37, p. 746–752, 2013.