

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
IFSP

MARCIO CORAZZIM

AUTOMATIZAÇÃO DE MEDIÇÃO DE DESGASTE EM INSERTOS DE BROCAS
POR MEIO DE VISÃO COMPUTACIONAL

SÃO PAULO – SP
2018

MARCIO CORAZZIM

**AUTOMATIZAÇÃO DE MEDIÇÃO DE DESGASTE EM INSERTOS DE BROCAS
POR MEIO DE VISÃO COMPUTACIONAL**

Dissertação com o objetivo de obtenção do título de Mestre submetida à banca do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo — IFSP — na área de Automação e Controle de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Aguiar

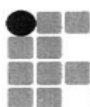
Coorientador: Prof. Dr. Cesar da Costa

SÃO PAULO – SP

2018

Catalogação na fonte
Biblioteca Francisco Montojos - IFSP Campus São Paulo
Dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C787a	Corazzim, Marcio Automatização de medição de desgaste em insertos de brocas por meio de visão computacional / Marcio Corazzim. São Paulo: [s.n.], 2018. 105 f. il. Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Aguiar Co-orientador: Prof. Dr. Cesar da Costa Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2018. 1. Ferramentas de Corte. 2. Monitoramento de Desgaste de Ferramenta. 3. Visão de Máquina. 4. Processamento de Imagens Digitais. 5. Automação Industrial. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título. CDD 629.8
-------	---



INSTITUTO FEDERAL
SÃO PAULO
Campus São Paulo

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS SÃO PAULO
Coordenadoria de Registros Escolares de Pós-Graduação

ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a): Marcio Corazzim

Nome do(a) Orientador(a): Prof. Dr. Cesar da Costa

Nome do(a) Coorientador(a):

Título do Trabalho: "Automatização de medição de desgaste em insertos de brocas por meio de visão computacional"

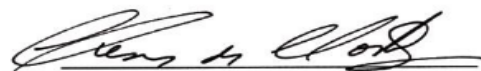
Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Cesar da Costa – Orientador	IFSP – SPO	<i>Aprovado</i>
Prof. Dr. Rômulo Gonçalves Lins – Membro Externo	UFABC	<i>Aprovado</i>
Prof. Dr. Whisner Fraga Mamede - Membro Interno	IFSP – SPO	<i>Aprovado</i>
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Profa. Dra. Luciana Montanari - Membro Externo	EESC-USP	
Profa. Dra. Elaine Inácio Bueno – Membro Interno	IFSP	

Considerando-o: ☒ APROVADO
[] NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 20 de Março de 2018


Presidente da Banca

Rômulo Gonçalves Lins
Membro Externo

Whisner Fraga Mamede
Membro Interno

Observações:

RESUMO

A indústria e a comunidade científica trabalham sobre o monitoramento de desgaste de ferramentas de corte com o intuito de obter redução de custos nos processos e de uso de matéria-prima, assim como a melhoria da qualidade de produtos. Este trabalho desenvolveu um protótipo capaz de medir o desgaste de brocas com três insertos de metal duro. As brocas de 39 milímetros de diâmetro furaram anéis de rolamentos de grande porte em um centro de usinagem CNC. O desgaste nos insertos foi medido por meio de técnicas de visão computacional. As três cadeias de processamento digital de imagens realizaram primeiramente a aquisição das imagens por meio de uma câmera digital de uso industrial. As imagens foram capturadas sequencialmente e armazenadas em um diretório dentro do computador. Após isto, uma cadeia de seleção procurou e selecionou quatro imagens correspondentes às áreas de desgaste. A cadeia de medição foi aplicada sobre as quatro imagens selecionadas. Ela forneceu os desgastes frontais em dois lados do inserto central e mais dois desgastes de flanco nos dois insertos externos. Um programa computacional (Lupa) foi desenvolvido para automatizar o processo. A interface gráfica do usuário permitiu controlar a sequência do processo, parametrizar várias funcionalidades e monitorar o desgaste. O programa controlou as cadeias de processamento de imagens e registrou os valores de desgaste em gráficos de controle. As imagens foram armazenadas no computador para a formação de um histórico e os respectivos valores de desgaste foram guardados em uma base de dados para análises e aplicações futuras.

Palavras-chave: Ferramentas de corte. Monitoramento de desgaste de ferramenta. Visão de máquina. Processamento de imagens digitais. Automação industrial.

ABSTRACT

The industry and the scientific community have been working on the monitoring of wear of cutting tool wear in order to reduce costs in process and use of raw materials, as well as improving the quality of their products. This work proposed a prototype capable of measuring the wear on four carbide inserts. The 39 milimeter diameter drill bits have bored large bearing rings in a CNC machining center. The wear on the inserts was measured by using computer vision techniques. Three algorithms for image processing have been deployed, where the first was responsible for the image acquisition using a digital camera for industrial application. The images are captured sequentially and stored in a directory inside the computer. After that, a selection algorithm searches and selects four images corresponding to the areas of wear. Then, the measurement algorithm developed, process these four selected images and outputs the estimated wear for each insert (two central and two outer). A computer program (Lupa) has been developed to automate the process flow and the graphical user interface allows the engineering team optimize the process, parametrize various functionalities and monitor the wear. The Lupa program controls the image processing algorithms and recorded the wear values in control charts. The images are also stored on the computer to form a historic and the respective wear values are stored in a database for future applications and analysis.

Key-words: Cutting tools. Tool wear monitoring. Machine vision. Digital image processing. Industrial automation.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CSV	<i>Comma-Separated Value</i>
DI	<i>Digital input</i>
DO	<i>Digital output</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LED	<i>Light-emitting Diode</i>
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
PCBN	<i>Polycrystalline Cubic Boron Nitride</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i>
PIXEL	Picture Element
RGB	Red, Blue and Green
RPM	Rotações Por Minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TiN	Nitreto de titânio
TiAlN	Nitreto de titânio de alumínio
USB	Universal Serial Bus
VGA	<i>Video Graphics Array</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	Profundidade de corte
C	Centro óptico
C_t	Desgaste do gume transversal
C_m	Desgaste do gume transversal
f	Avanço de corte
f	Distância focal
FPGA <i>Field-Programmable Gate Array</i>	
η	ângulo efetivo de corte
K_b	Largura do desgaste de cratera
K_t	Profundidade do desgaste de cratera
K_m	Desgaste de cratera
λ	fator de escala óptico
I	Intensidade dos valores da escala de cinza
n_c	Frequência de nível de cinza em uma imagem
p	Sistema de coordenadas da câmera
p'	Coordenada da câmera em <i>pixels</i>
P	Imagem padrão da cadeia de seleção de melhor imagem
π	Plano de projeção de imagem
r	Coefficiente de correlação de Pearson
VB	Desgaste médio
$VB_{m\acute{a}x}$	Desgaste máximo
v_c	Velocidade de corte
W	Desgaste de quina

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico de desgaste de flanco em brocas de aço rápido.....	20
Figura 2 – Gráfico de desgaste de flanco em brocas de metal duro.....	22
Figura 3 – Gráfico de desgaste de flanco em relação ao fluido de corte.....	24
Figura 4 – Brocas com insertos intercambiáveis.....	27
Figura 5 – Profundidade de corte no processo de fabricação.....	29
Figura 6 – Desgaste de Flanco.....	30
Figura 7 – Desgaste de cratera.....	31
Figura 8 – Desgaste do gume transversal.....	31
Figura 9 – Desgaste de quina.....	32
Figura 10 – Componentes de um sistema de visão.....	35
Figura 11 – Estrutura de um pixel.....	36
Figura 12 – Modelo do sistema de coordenadas de uma imagem.....	36
Figura 13 – Identificação dos eixos no sistema cartesiano.....	38
Figura 14 – Centro óptico.....	40
Figura 15 – Modelo de projeção em perspectiva.....	40
Figura 16 – Formação da imagem.....	41
Figura 17 – Relação geométrica para a obtenção de p'	42
Figura 18 – Transformação de coordenadas de imagem para de pixels.....	44
Figura 19 – Faixas do espectro luminoso.....	46
Figura 20 – Histograma de imagem em tons de cinza.....	48
Figura 21 – Arquitetura do protótipo do centro de usinagem.....	52
Figura 22 – Projeto elétrico e pneumático.....	53
Figura 23 – Suporte com ferramenta.....	54
Figura 24 – Broca de 39 mm de diâmetro com 3 insertos de metal duro.....	54
Figura 25 – Furação de rolamento.....	55
Figura 26 – Amostras de insertos com desgaste.....	55
Figura 27 – Caixa de proteção da iluminação.....	56
Figura 28 – Câmera.....	57
Figura 29 – Caixa de proteção da câmera.....	58
Figura 30 – Comunicação entre os programas do computador.....	61

Figura 31 – Fluxograma das cadeias de processamento de imagens.....	63
Figura 32 – Cadeia de processamento de aquisição de imagens.....	64
Figura 33 – Fluxograma da cadeia de aquisição de imagens.....	65
Figura 34 – Imagens capturadas na cadeia de processamento de aquisição.....	65
Figura 35 – Fluxograma da cadeia de seleção da melhor imagem.....	66
Figura 36 – Cadeia de seleção da melhor imagem.....	67
Figura 37 – Imagens padrão da cadeia de seleção.....	67
Figura 38 – Imagens em processamento para seleção da melhor imagem.....	68
Figura 39 – Fluxograma da cadeia de medição de desgaste.....	69
Figura 40 – Medição do desgaste de flanco do inserto externo 1 (P2).....	70
Figura 41 – Região de desgaste de flanco do inserto lateral 1 (P2).....	70
Figura 42 – Região de desgaste de flanco do inserto lateral 1 (P2) normalizada.....	71
Figura 43 – Região de desgaste de flanco do inserto externo 1 (P2) isolada.....	71
Figura 44 – Dados geométricos do desgaste de flanco do inserto lateral 1 (P2).....	72
Figura 45 – Cálculo do desgaste de flanco do inserto lateral 1.....	73
Figura 46 – Desgaste frontal no inserto central (P1) mostrado em detalhe.....	74
Figura 47 – Cadeia de processamento de medição do desgaste frontal (P1).....	74
Figura 48 – Sequência do ciclo automático do processo.....	75
Figura 49 – Tela principal.....	76
Figura 50 – Código do programa Lupa.....	77
Figura 51 – Sequência de operações da medição automatizada.....	79
Figura 52 – Tela de ajustes.....	80
Figura 53 – Tela do Controlador com seus passos automatizados.....	80
Figura 54 – Medição de desgaste de flanco dos insertos laterais 1 (P2).....	83
Figura 55 – Medição de desgaste de flanco dos insertos laterais 2 (P4).....	84
Figura 56 – Medição do desgaste frontal dos insertos centrais do lado 1 (P1).....	85
Figura 57 – Relatório de medição.....	86
Figura 58 – Gráfico de controle de desgaste frontal do lado 1 do inserto central.....	86
Figura 59 – Gráfico de controle de desgaste de flanco do inserto lateral 1.....	87
Figura 60 – Gráfico de controle de desgaste frontal do lado 2 do inserto central.....	87
Figura 61 – Gráfico de controle de desgaste de flanco do inserto lateral 2.....	88
Figura 62 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal após 20 furos.....	103

Figura 63 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 30 furos.....	103
Figura 64 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 40 furos.....	104
Figura 65 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 50 furos.....	104
Figura 66 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 60 furos.....	105
Figura 67 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 70 furos.....	105
Figura 68 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 80 furos.....	106
Figura 69 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 90 furos.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critério de fim de vida de ferramentas de corte.....	30
Tabela 2 – Especificações do anel luminoso.....	56
Tabela 3 – Especificações da câmera de captura de imagens.....	57
Tabela 4 – Especificações da lente.....	58
Tabela 5 – Sinais do processo.....	59
Tabela 6 – Especificações do computador.....	60
Tabela 7 – Resultados da aplicação das cadeias de aquisição e seleção.....	82
Tabela 8 – Medição do desgaste de flanco dos insertos laterais 1 (P2).....	83
Tabela 9 – Medição do desgaste de insertos laterais 2 (P4).....	84
Tabela 10 – Medição do desgaste frontal dos insertos centrais do lado 1 (P1).....	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVO.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3	JUSTIFICATIVAS.....	17
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	MÉTODOS DIRETOS.....	19
2.2	MÉTODOS INDIRETOS.....	21
2.3	AUTOMATIZAÇÃO.....	23
3	CONCEITUAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1	DESGASTE DE FERRAMENTAS.....	26
3.2	VISÃO COMPUTACIONAL.....	34
3.2.1	FORMAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL.....	36
3.2.2	CARACTERÍSTICAS DA IMAGEM DIGITAL.....	37
3.2.3	REPRESENTAÇÃO DE UM CORPO RÍGIDO.....	38
3.2.4	PROJEÇÃO DE UM CORPO RÍGIDO NA CÂMERA.....	39
3.2.5	PARÂMETROS INTRÍNSECOS.....	42
3.2.6	ILUMINAÇÃO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS.....	46
3.2.7	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	48
3.2.8	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....	51
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
4.1	SUORTE E FERRAMENTA.....	53
4.2	ILUMINAÇÃO.....	56
4.3	CÂMERA.....	57
4.4	CENTRO DE USINAGEM.....	59
4.5	MÓDULO DI/DO.....	59
4.6	COMPUTADOR.....	60
4.7	ROBOREALM.....	61
4.8	QT.....	62
4.9	SQLITE.....	62

4.10	CADEIAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	63
4.10.1	CADEIA DE AQUISIÇÃO.....	63
4.10.2	CADEIA DE SELEÇÃO.....	65
4.10.3	CADEIA DE MEDIÇÃO.....	68
4.10.3.1	DESGASTE DE FLANCO.....	69
4.10.3.2	DESGASTE FRONTAL.....	73
4.11	LUPA – PROGRAMA DE AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO.....	75
4.11.1	PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO AUTOMATIZADA.....	79
5	RESULTADOS.....	82
6	CONCLUSÃO.....	89
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A – PROGRAMA DE CÁLCULO DE DESGASTE.....	99
	APÊNDICE B – CADEIA DE MEDIÇÃO DO DESGASTE FRONTAL.....	103

1 INTRODUÇÃO

A indústria e a comunidade científica trabalham sobre o monitoramento de desgaste de ferramentas de corte com o intuito de obter redução de custos nos processos e de uso de matéria-prima, assim como a melhoria da qualidade de produtos. O monitoramento depende de dados que são utilizados em métodos de manutenção corretiva e preditiva.

O problema de aquisição de dados é resolvido por meio de duas abordagens metodológicas. Os métodos indiretos correlacionam um sinal proveniente do processo com o desgaste da ferramenta, tais quais a vibração da máquina, a medição de corrente elétrica do acionamento e temperatura do gume da ferramenta. Os métodos diretos avaliam o desgaste sobre as superfícies da ferramenta de corte por meio de microscópio operado por um humano ou por câmeras.

Um sistema de visão avalia quantitativamente ou qualitativamente o objeto de estudo pelo método direto. Ele realiza a aquisição de imagens, processa as mesmas e fornece dados para o monitoramento instantâneo ou os armazena a fim de formar um histórico. Assim sendo, pode ser utilizado em vários processos industriais como o monitoramento de desgaste de ferramentas de corte utilizados na fabricação de componentes mecânicos.

O Centro de Usinagem que processa os furos de fixação do anel externo do rolamento utiliza brocas com três inserts intercambiáveis de metal duro revestidos de óxido de alumínio (Al_2O_3). A broca é formada por um suporte onde são fixados os inserts intercambiáveis de metal duro.

Os inserts intercambiáveis das brocas sofrem desgaste que diminui a qualidade de forma e posição dos furos, aumenta a força de usinagem e diminui a vida útil tanto do Centro de Usinagem quanto dos inserts.

Os inserts podem até mesmo quebrar o que acarreta a inutilização do suporte e causa prejuízos imediatos que são: tempo de máquina parada, substituição da broca inteira, substituição do suporte de ferramenta avariado, perda da matéria-prima, redução qualidade de forma e posição dos furos. O centro de usinagem pode ser avariado o que gera mais custos de manutenção e diminuição de sua vida útil.

A troca dos inserts antes de sua quebra permite a redução de custos de

produção pelo decréscimo do desperdício de matéria-prima, além de evitar a quebra do suporte da broca e possíveis avarias no centro de usinagem. Assim, a manutenção preditiva é preferida em relação a corretiva ou preventiva.

A manutenção preditiva utilizada atualmente é a inspeção visual do estado da ferramenta que gera dados qualitativos e que obriga o operador a entrar em contato com o cavaco e fluido de corte. A medição direta do desgaste por meio de microscópio também é utilizada e gera dados quantitativos mas acarreta a parada do processo para a retirada dos insertos intercambiáveis. Ambos processos são manuais e dependem da subjetividade do profissional que realiza a inspeção ou medição.

A hipótese para a solução do problema é a implantação de um sistema automatizado que meça o desgaste por métodos diretos dentro do Centro de Usinagem. A ferramenta fica estacionada por 10 segundos enquanto o anel externo é posicionado para a realização do furo seguinte. Neste intervalo, a captura das imagens pode ser executada. O processo de usinagem dura 50 segundos que é o tempo disponível para o processamento das imagens, armazenamento das medições e atualização dos gráficos de controle.

As imagens capturadas seriam processadas e resultariam nos valores de desgaste dos três insertos intercambiáveis de cada broca. Os valores de medição, assim como as suas respectivas imagens, seriam armazenadas em um banco de dados que formaria um histórico.

Os alarmes avisariam o usuário do momento da troca dos insertos de acordo com os critérios estabelecidos. Os gráficos de controle mostrariam a tendência de desgaste dos insertos e permitiriam ao usuário detectar anomalias no processo. Os relatórios de medição dos desgastes seriam gerados a partir do histórico armazenado em uma base de dados para serem utilizados para trabalhos futuros como, por exemplo, no controle estatístico de processo (PCP) ou gerenciamento da manutenção. Este processo automatizado também eliminaria a subjetividade das medições manuais.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral é o desenvolvimento de um protótipo automatizado para

monitoramento, aquisição e armazenamento de dados acerca de desgaste em insertos de brocas. Ele deve ser realizado em tempo real e que simule o processo de furação dos anéis externos dos rolamentos de grande porte em centros de usinagem.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- construir um sistema de visão para aquisição das imagens de desgaste;
- medir o desgaste dos insertos intercambiáveis;
- indicar para o operador o momento de troca dos insertos;
- armazenar os resultados da medição para consulta futura;
- automatizar os processos de medição e de monitoramento.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A empresa multinacional fabricante de rolamentos de grande porte ROBRASA (2017), pertencente ao grupo ThyssenKrupp (2017), requereu um sistema de monitoramento do estado das brocas utilizadas em seus centros de usinagem. Este sistema deve indicar para o operador o momento de troca dos insertos intercambiáveis antes de sua quebra. Assim sendo, serão reduzidos os impactos econômicos e evitar que o desgaste excessivo da broca prejudique a qualidade do produto.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em 6 capítulos: introdução, revisão bibliográfica, conceituação teórica, materiais e métodos, resultados e conclusão.

O capítulo 1, introdução, apresenta o tema, o problema de quebra de insertos e ferramentas de corte, a hipótese de solução do problema, os objetivos e a justificativa do trabalho sobre monitoração do desgaste.

O capítulo 2, revisão bibliográfica, apresenta a discussão sobre trabalhos nas áreas de visão computacional e metodologias para a inspeção e medição de

desgaste de ferramentas de corte.

O capítulo 3, conceituação teórica, disserta primeiramente sobre os conceitos e fundamentos teóricos acerca da formação e medição de desgastes nas arestas de ferramentas de corte. Depois aborda a visão computacional que está dividida em formação da imagem digital, representação do corpo rígido, projeção de imagens sobre a câmera, parâmetros intrínsecos da câmera, iluminação, processamento digital de imagens e o coeficiente de correlação de Pearson.

O capítulo 4, materiais e métodos, apresenta os dispositivos e programas computacionais desenvolvidos para os experimentos. Os algoritmos criados para a medição são detalhados assim como os procedimentos de medição manual e automatizado.

O capítulo 5, mostra os resultados obtidos pela aplicação dos métodos e materiais tanto nas medições manuais como nas automatizadas.

O capítulo 6, conclusão, disserta sobre os resultados alcançados em comparação com os objetivos gerais e específicos. Aqui também propõe-se trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos sobre a medição de desgaste em ferramentas de corte utilizam métodos indiretos e diretos. Os métodos indiretos incluem medições de temperatura, força e até mesmo a evolução da qualidade dos furos. Já os métodos diretos vão desde o uso de microscópio óptico, passando pelo auxílio de computadores e chegando à criação de programas computacionais dedicados. A automatização dos processos de medição é abordado neste capítulo assim como trabalhos relacionados ao desgaste e também aos recursos computacionais que são utilizados para medi-lo.

2.1 MÉTODOS DIRETOS

A visão computacional foi aplicada no trabalho de Feliciano et al (2005) para medir diretamente peças. As técnicas tratadas podem ser aplicadas em processos automatizados tais como de medição, inspeção ou análise de conformidade. Uma proposta com critérios a serem utilizados para a análise de incertezas em medições foi apresentada. A câmera foi calibrada por meio de blocos padrões e os resultados obtidos foram comparados com as medições obtidas por instrumentos convencionais.

Almeida (2010) avaliou a influência dos parâmetros de avanço e velocidade de corte no desgaste das ferramentas revestidas de TiN. Foi medida a rugosidade superficial das peças usinadas e o desgaste da ferramenta foi executado manualmente por meio de um microscópio óptico. O resultado mostra a evolução do desgaste de flanco em diferentes parâmetros de usinagem e foi realizado unicamente em laboratório.

Casarin et al (2013) estabeleceram critérios de fim de vida da ferramenta: falha completa da ferramenta, lascamento do gume, ruído excessivo ou desgaste de flanco de $V_{Bmáx} = 0,15$ mm. Eles trabalharam na avaliação do desgaste de brocas helicoidais de aço rápido que foi realizada com peças de ferro fundido nodular. A máquina-ferramenta utilizada foi um centro de usinagem vertical CNC. As imagens digitais da região de desgaste foram tiradas por uma câmera Moticam 2300 acoplada a um microscópio de ferramentaria. A medição do desgaste foi realizada

por meio do programa Motic Images Plus 2.0 (Motic, 2018). Os resultados são mostrados na figura 1 que relaciona o comprimento usinado pelas brocas, em quatro condições diferentes, com o desgaste de flanco.

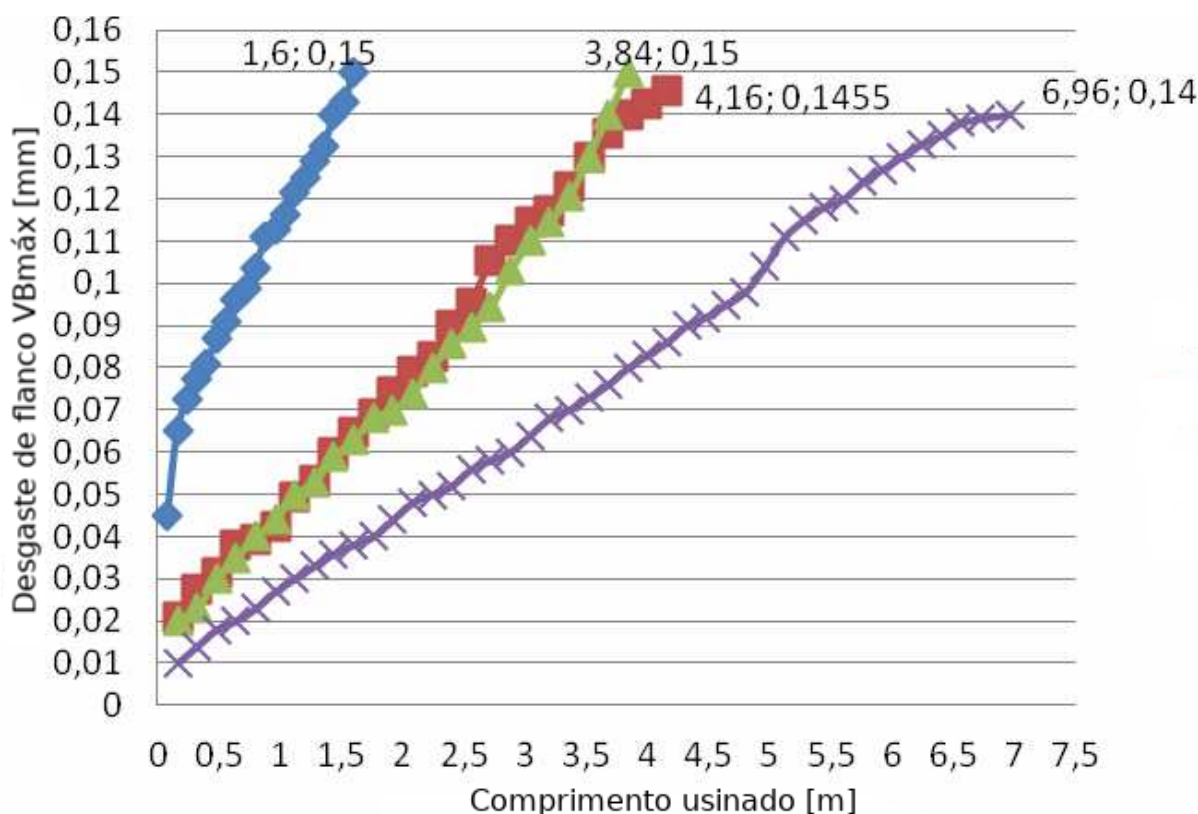


Figura 1 – Gráfico de desgaste de flanco em brocas de aço rápido

Fonte: adaptado (Mikołajczyk et al, 2015)

Silva (2014) utilizou a biblioteca OpenCV (2017) para a contagem de telhas mas foi utilizada a câmera de um dispositivo móvel para a captura das imagens no lugar de uma câmera industrial. O sistema calcula a quantidade de telhas produzidas que se encontram nos caminhões prontas para o transporte. O programa desenvolvido era executado no sistema Android 4.1. O sistema contabilizou corretamente a quantidade de telhas em 3 iterações do total de 20. A menor taxa de acerto foi de 87,5 %.

Baldner (2014) utilizou a visão computacional para a medição dimensional da calibração da metrologia de fluidos. Neste trabalho foi utilizado uma câmera fotográfica digital não industrial. Os parâmetros para a implementação da visão computacional foram investigados e foi proposto um método que mediu o

mensurando a partir de um padrão.

Gonçalves (2017) criou uma técnica para automatizar a detecção de indícios de fraude em assinaturas em documentos digitais. Utilizou-se uma biblioteca de visão computacional (OpenCV, 2017) em linguagem Python (2017). As imagens foram obtidas por um dispositivo de escaneamento.

2.2 MÉTODOS INDIRETOS

Braghini Junior (1998) investigou o desgaste de ferramentas de PCBN e metal duro estudou os mecanismos de desgaste assim como o comportamento da emissão acústica. O desgaste de flanco foi medido em ferramentas de fresagem que usinaram peças em um centro de usinagem horizontal. O monitoramento acústico foi realizada com uma unidade de tratamento de sinal e o programa de aquisição foi desenvolvido com LabView (National Instruments, 2018). O inserto foi retirado da fresa após cada passe e o desgaste de flanco foi medido em um microscópio. Foi estudado a influência da velocidade de corte no desgaste mas não foi realizado estudos correlacionando o desgaste com a emissão acústica.

Castilho (2005) aplicou métodos indiretos para a avaliação do desgaste de brocas de metal duro em furação profunda de ferro fundido cinzento. Foi realizado em uma fresadora CNC de três eixos instalada em laboratório para os experimentos de aquisição de força de avanço. A qualidade dos furos foi avaliada pela medição da rugosidade, do diâmetro, cilindridade e circularidade dos furos. Também foram realizados medições de desgaste por método direto dentro de uma empresa por meio de uma furadeira de carro horizontal. As imagens digitais foram capturadas por uma câmera fotográfica não industrial auxiliada por um sistema de iluminação. As brocas foram retiradas da furadeira, colocadas em um suporte para a medição do desgaste e devolvidas para a continuação do processo em intervalos planejados.

Castilho mediu o desgaste de flanco $V_{B\text{máx}}$ por meio de um programa computacional de CAD sobre as imagens capturadas na fábrica e os resultados são mostrados na figura 2 que relaciona o desgaste de quatro tipos de brocas com o comprimento usinado.

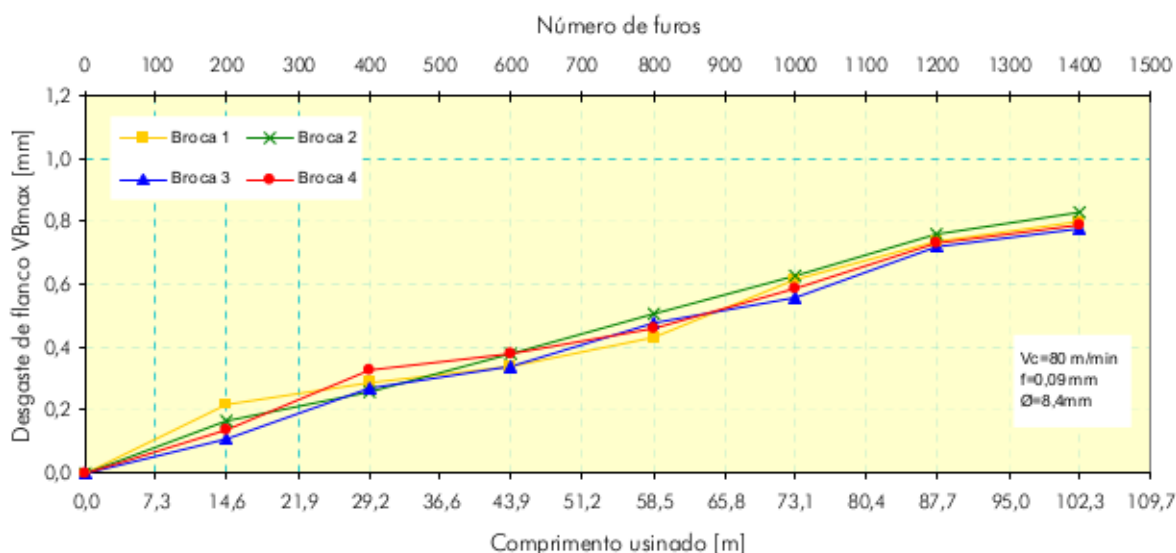


Figura 2 – Gráfico de desgaste de flanco em brocas de metal duro

Fonte: adaptado (Castillo, 2005)

Contrucci (2012) avaliou a qualidade do processo de furação pela aplicação de redes neurais artificiais (Contrucci, 2012) para a predição de diâmetro e rugosidade de furos. O controle de qualidade do processo de furação para instalação de prendedores de estruturas aeronáuticas é mais importante do que a vida útil da ferramenta. Um sistema composto por vários sensores foi acoplado a uma fresadora para captar vários sinais: potência do motor elétrico, emissão acústica, vibração e força de usinagem. Estes sinais alimentaram uma rede neural artificial que estimou a rugosidade e o diâmetro médio dos furos. A predição foi realizada pelo treinamento da rede neural que foi desenvolvida no programa computacional Matlab (MathWorks, 2018). Os resultados medidos e preditos foram então registrados em um único gráfico de controle para análise.

Pimentel (2014) buscou auferir as melhores condições de usinagem para a máxima produção e o mínimo custo do processo de furação. As peças eram blocos de ferro fundido cinzento de compressores herméticos. Os experimentos iniciais dentro da fábrica indicaram que não seria possível determinar a vida das brocas devido a uma limitação técnica no ambiente fabril: não havia equipamento para medição do desgaste de flanco máximo $V_{Bmáx}$. Por isto, ele utilizou um método indireto que foi a medição de circularidade dos furos por meio de um circularímetro instalado junto ao processo. Após o término dos experimentos, criou-se gráficos para a análise econômica em relação à velocidade de corte.

Cardoso (2014) analisou o processo de furação profunda envolvendo profundidades maiores que cinco vezes o diâmetro do furo. O trabalho abordou furos de até 24 vezes o diâmetro no aço SAE 4144M forjado e temperado. A análise de desgaste das ferramentas de revestimento com TiN e TiAlN consideraram os parâmetros velocidade de corte, avanço, temperatura da peça e a forma do cavaco. Foram medidas a força de corte, a temperatura da peça e o desgaste da ferramenta. As peças foram usinadas em centro de Usinagem e o desgaste foi medido por meio de um sistema óptico composto por lentes e câmera de vídeo com um programa computacional dedicado. Também foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura para a detecção do tipo de desgaste. A forma do cavaco foi monitorada durante o experimento. A medição do desgaste era executada após a detecção da mudança da forma do cavaco.

Gomes (2015) mediu o desgaste de flanco $V_{Bmáx}$ em fresas de 20 milímetros de diâmetro com insertos intercambiáveis de metal duro que usinaram peças de aço ferramenta. A rugosidade e a dureza das peças foram medidas a cada sequência de passos. Ele utilizou o critério de fim de vida da ferramenta $V_{Bmáx} = 0,6$ mm. O desgaste foi medido por uma lupa instalada em um suporte colocado junto ao centro de usinagem de uma empresa durante a produção.

2.3 AUTOMATIZAÇÃO

A automatização dos processos de medição direta de desgaste, assim como métodos indiretos, foram objetos de pesquisa de diversos pesquisadores e são abordados a seguir.

Miranda (2003) pesquisou acerca do processo de furação com broca de metal duro sem fluido de corte em aço ABNT 4340. A máquina-ferramenta foi um centro de usinagem vertical instalado em um laboratório. Foram medidos vários parâmetros de usinagem: força, rugosidade da superfície usinada, diâmetro dos furos e desgaste da broca.

O critério de fim de vida da ferramenta foi a quebra da broca ou desgaste das arestas de corte acima de 0,8 mm. Os resultados do desgaste de flanco ($V_{Bmáx}$) são mostrados na figura 3.

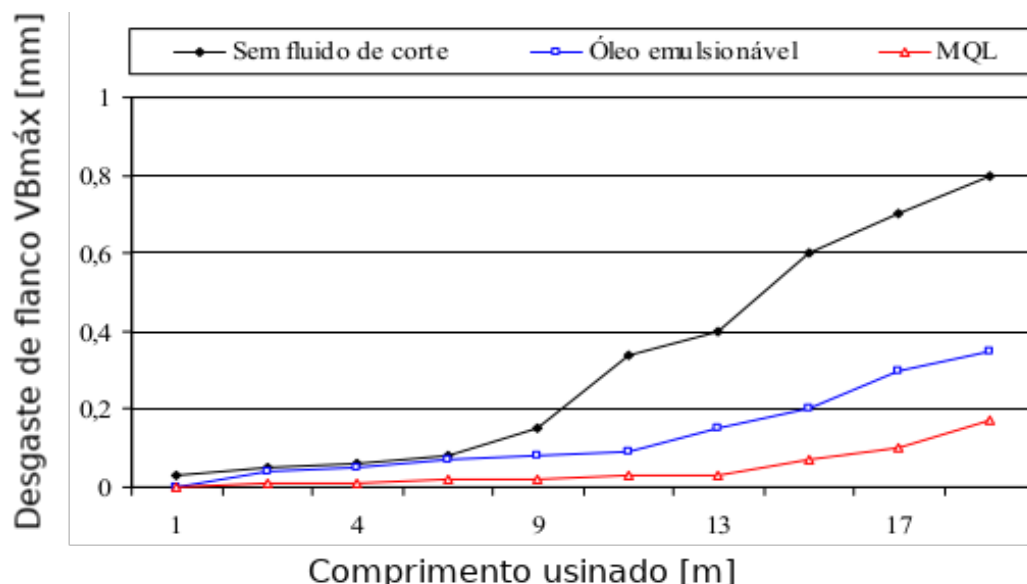


Figura 3 – Gráfico de desgaste de flanco em relação ao fluido de corte

Fonte: adaptado (Miranda, 2003)

Deschamps (2014) trabalhou sobre o sistema Toolspy que é um programa computacional dedicado desenvolvido para monitorar o desgaste de ferramenta de corte pelo método de medição direta em processo de torneamento. A medição foi realizada pelos subsistemas óptico, de iluminação e de cadeia de processamento de imagens. A visão computacional utilizou a biblioteca S2iLib (2017).

O processo possuía um sistema automatizado de manuseio que retirava e colocava a ferramenta do magazine da máquina para o sistema de medição. O objetivo do trabalho foi a modularização do sistema computacional e aumentar os algoritmos da cadeia de processamento de imagens.

O experimento foi realizado com 5 ferramentas de torneamento, 5 ferramentas quebradas e 5 ferramentas não desgastadas para o treinamento da rede neural artificial. A validação foi realizada pela comparação do resultado do sistema com a classificação manual de quebra da ferramenta e a medida de desgaste de flanco $VB_{máx}$. A validação do desgaste foi realizada pela comparação das medidas via o sistema com as medidas de referência que foi realizada por meio de microscópio. O maior erro percentual das medidas foi de 28 %.

Pavim (2005) continuou o trabalho de Deschamps (2004) e contribuiu no desenvolvimento do sistema de visão para detecção, medição e classificação

automática do desgaste de ferramentas de corte em processos de usinagem. O trabalho aprimorou o sistema de iluminação e os algoritmos da cadeia de processamento de imagens Toolspy. A validação foi realizada com 100 ferramentas. O sistema detectou a quebra da ferramenta em 79 % das medições. O erro médio de desgaste de flanco variou em dependência do tipo de ferramenta medida e foi de 0,005 % até 126 %.

A automatização do processo de medição direta de desgaste foi proposto por Hong et al (2005). O sistema de medição de desgaste de flanco era baseado em análise sucessiva de imagens. O sistema era composto de um sensor de fibra óptica, iluminação ajustável de fibra óptica, uma câmera digital de uso industrial, um dispositivo de aquisição de imagens, um dispositivo de disparo com sensor e emissor a laser, 4 marcadores de fita reflexiva e um computador pessoal. A ferramenta era uma fresa com quatro insertos de metal duro cujas posições eram indicadas pelas fitas reflexivas. O sensor a laser disparava um sinal para câmera captar as imagens dos 4 insertos da fresa.

Uma posição específica de captura das imagens foi programada na máquina CNC e a velocidade de rotação da árvore CNC foi ajustada em 20 RPM. Tal velocidade provocou borrões nas imagens que foram compensadas por filtragem.

O processo de captura de imagens foi manual e ocorreu sem a retirada do suporte de ferramentas da máquina CNC. O tamanho do sistema não permitiu o fechamento da porta de segurança durante a usinagem. Os marcadores perderam a adesividade em relação ao suporte e isto afetou os resultados das medições. Os resultados foram validados pelo uso de um microscópio de ferramenteiro e também por medições manuais executadas sobre as imagens capturadas.

Mikołajczyk et al (2015) realizou a automatização da medição de desgaste e o reconhecimento de ferramentas de torno por meio de câmera digital. A câmera possuía resolução VGA e interface USB. As fotos capturadas eram enviadas para um computador pessoal onde era executado um programa computacional desenvolvido para os experimentos. O sistema mediu a posição da ferramenta, seus ângulos e dimensões. A seguir, buscou em um banco de dados a ferramenta correspondente. A identificação ocorreu sem erros.

3 CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo está dividido em desgaste nas arestas de ferramentas de corte e a estrutura de sistemas de visão computacional.

3.1 DESGASTE DE FERRAMENTAS

Os conceitos e fundamentos teóricos sobre a formação e medição de desgastes nas arestas de ferramentas de corte são estudados neste item especificamente em relação às brocas. Também é mostrado um critério de fim de vida de ferramenta e a geometria de corte de ferramentas.

O processo de furação é um dos mais utilizados industrialmente pois a maior parte das peças manufaturadas não possui um furo pronto de outro processo tal qual fundição ou forjamento. As peças geralmente são furadas em cheio ou tem suas dimensões aumentadas por uma ferramenta de corte (Diniz et al, 2006).

O furo é geralmente cilíndrico e é executado por uma ferramenta com múltiplos gumes de corte. A ferramenta ou a peça giram e uma delas é deslocada, simultaneamente ao giro da outra, em uma trajetória retilínea que é coincidente ou paralela ao eixo da máquina. O processo de furação pode ser classificado como nas categorias: furação em cheio, escareamento, furação escalonada, furação de centros e trepanação (Ferraresi, 2008).

Os fatores a serem considerados para os processos de usinagem são principalmente a produção requerida, o diâmetro do furo a ser usinado, sua profundidade, tolerâncias de forma e de posição. A remoção de material através da penetração da broca na peça gera calor na interface entre a peça, a ferramenta e o cavaco devido ao atrito, ao cisalhamento do material cortado e à deformação plástica do material. As temperaturas geradas dependem basicamente dos parâmetros de corte escolhidos, tais como velocidade de corte, avanço e qual o fluido de corte utilizado (Miranda, 2003).

Há uma estimativa de que 60% de todas as aplicações de furação na indústria referem-se a furos curtos, ou seja, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da ferramenta. No entanto, na maioria dessas operações, o furo é usinado utilizando-se duas ou mais brocas para sua completa usinagem. Porém,

com o desenvolvimento de novas máquinas de usinagem, a utilização de novos materiais das ferramentas e a grande competitividade entre as empresas, já é possível a usinagem de furos de grandes dimensões serem realizados por meio do processo de furação em cheio (Arruda et al, 2015). Assim, pode-se utilizar apenas uma ferramenta para sua execução. Este tipo de operação, normalmente requer o emprego de ferramentas e equipamentos especiais (Castillo, 2005).

A furação em cheio é uma operação de usinagem complexa, na qual a qualidade dos furos é fortemente influenciada pela alimentação do fluido de corte pressurizado diretamente para as regiões de corte. Isso ocorre porque o fluido de corte é o principal responsável pelo transporte de cavacos. Assim, a furação em cheio exige condições especiais para ser executada (Stemmer, 2008).

Um dos avanços mais importantes na tecnologia de furação foi o desenvolvimento de brocas com insertos intercambiáveis. Conforme já citado, estudos mostram que aproximadamente 60% de todas as aplicações de furação na indústria mecânica se referem a furos curtos, com uma profundidade de até 2,5 vezes o diâmetro da broca, sendo que muitos desses furos podem ser usinados com brocas de insertos intercambiáveis (Pimentel, 2014).

As principais vantagens das brocas com insertos intercambiáveis são: aumento da produtividade, a redução dos custos e maior versatilidade. Além disto, quando estas ferramentas são utilizadas em máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), tal qual um centro de usinagem, estas brocas trazem a vantagem de não terem suas dimensões alteradas quando os insertos são intercambiados. Assim não é necessário redefinir o comprimento inicial ou modificar o programa de execução, devido à eliminação da operação de reafiação (Rubin et al, 2016).

Um exemplo de broca de inserto intercambiável é mostrado na Figura 4 que permite com as suas partes principais: ponta (1), corpo (2) e haste de fixação (3).

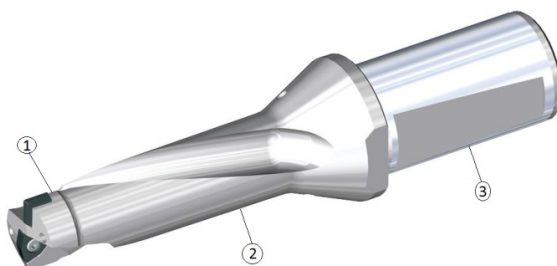


Figura 4 – Brocas com insertos intercambiáveis.
Fonte: Kennametal (2017).

A Ponta é onde são colocados os insertos que formam o gume principal e secundário de corte.

O corpo possui os canais helicoidais por onde o cavaco é retirado.

A haste é utilizada para a fixação da ferramenta e a sua geometria depende do acessório e tipo de fixação. Por exemplo, a haste cilíndrica é utilizada para a montagem em mandril térmico, hidráulico ou pinça.

Os parâmetros de corte definem o desempenho da ferramenta, obtenção de custos competitivos e a qualidade do produto final sendo que para o processo de furação os mais importantes são a velocidade de corte e o avanço.

A velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência do gume de corte da broca, segundo a direção e o sentido de corte, conforme a direção e sentido do avanço. O valor da velocidade de corte é determinado em função tanto do tipo de material da peça quanto do material da broca. As baixas velocidades de corte podem causar o gume postiço na ferramenta que ocasiona desgaste prematuro da broca por arranque de material do gume até o seu colapso. As altas velocidades de corte podem causar desgaste rápido da ferramenta pela excessiva temperatura de corte gerada que provocam a perda da capacidade de corte do gume da broca (Kurt et al, 2009).

O avanço (f) é a trajetória de avanço de cada volta, em milímetros, da broca e alguns critérios fundamentais para a seleção avanço (f) para evitar o colapso ou a quebra da broca. Os altos avanços aliado às altas velocidades de corte podem prejudicar o bom desempenho da broca caso não ocorra o escoamento suficiente do volume de cavaco gerado durante a operação. Em contrapartida, avanços muito baixos, contribuem para um desgaste prematuro, porém, com menor influência quando comparado com a velocidade de corte. Na Figura 6 é mostrado o processo de corte nas duas partes cortantes do gume principal de uma broca. A superfície de corte que surge no furo abaixo da ponta de uma broca é composta de duas hélices equidistantes entre si pela metade do avanço por rotação devido ao avanço contínuo da ferramenta. O movimento principal de corte (rotação) simultâneo ao do avanço define a direção efetiva de corte, que é o ângulo efetivo (η) (Kurt et al, 2009).

A profundidade de corte (a_p) é a profundidade de penetração do gume principal, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. O parâmetro

(ap) do processo de furação é mostrado na figura 5.

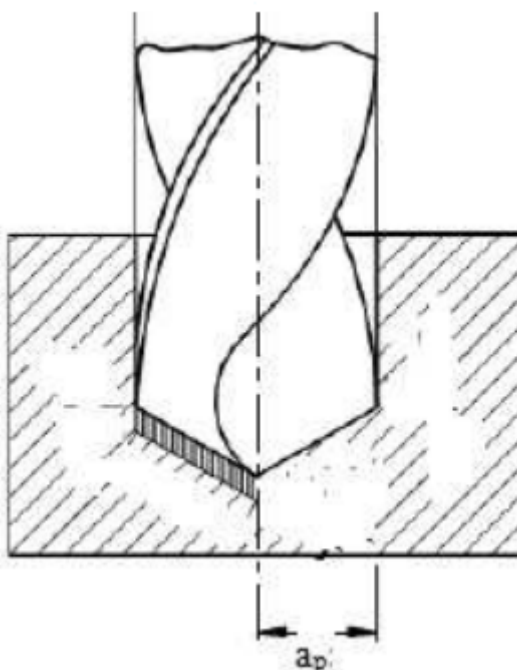


Figura 5 – Profundidade de corte no processo de fabricação.

Fonte: adaptado (Stemmer, 2008).

O uso de fluidos de corte pode aumentar a vida da ferramenta, a eficiência de remoção de material, melhorar o acabamento de superfície e reduzir a força e a potência de corte. As suas funções básicas são refrigeração, lubrificação, proteção contra corrosão, arrastamento dos cavacos e eliminação do gume postiço. A redução de custos de usinagem ocorre pela redução do desgaste da ferramenta e melhora da superfície do componente fabricado (König; Klocke, 1997).

Os três parâmetros influenciam a vida útil da ferramenta de corte. Os critérios de fim de vida são definidos e utilizados para determinar o momento da troca de uma ferramenta no processo de usinagem. O critério de fim de vida na furação depende de fatores como, por exemplo, os relacionados ao desgaste ou avaria encontrado na broca, desvios das tolerâncias de dimensão do furo, perda de qualidade superficial da peça, aumento nos níveis de vibrações ou esforços no processo e aumento da temperatura.

O termo vida útil da ferramenta significa o tempo que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente

estabelecido. A ferramenta deve ser reafiada ou substituída quando este tempo é atingido. A classificação dos critérios de fim de vida de ferramentas de corte constantes na norma ISO 3685 (1993) é mostrada na Tabela 1.

Critério	Valor
Desgaste médio	$VB = 0,3 \text{ mm}$
Desgaste máximo	$VB_{\text{máx}} = 0,6 \text{ mm}$
Profundidade da cratera	$K_t = 0,06 + 0,3f$
Falha catastrófica	N/A

Tabela 1 – Critério de fim de vida de ferramentas de corte.

Fonte: adaptado (ISO 3685, 1993)

O monitoramento do estado da ferramenta de corte permite, por exemplo, detectar a quebra da ferramenta para reduzir os impactos econômicos. A troca pode ser providenciada antes que o desgaste cause perdas na qualidade do produto manufaturado.

O conhecimento acerca dos detalhes das principais formas de desgaste, dos tipos de avarias sobre as ferramentas de corte e como as avarias são medidas é necessário para definir as técnicas de processamento de imagens.

A norma ISO 3685 (1993) define o desgaste como a perda microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte e são classificadas como desgaste frontal, de cratera, de gume transversal e de quina.

O desgaste frontal, também conhecido como de flanco, ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causado pelo contato entre ferramenta e a peça. O desgaste médio VB e o máximo $VB_{\text{máx}}$ nos flancos de uma broca são mostrados na figura 6.

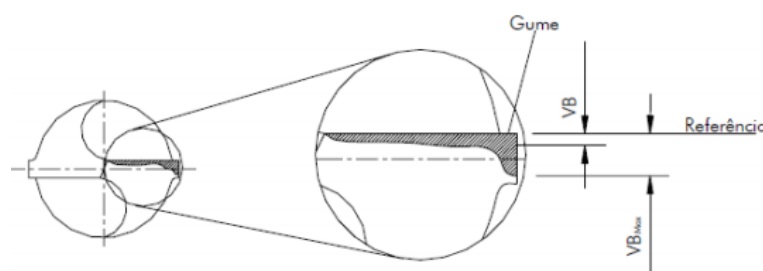


Figura 6 – Desgaste de Flanco.

Fonte: adaptado (ISO 3685, 1993).

A medição pode ser realizada com microscópio com aumento de 10 a 50 vezes. Mesmo quando houver deformação plástica ou desgaste do gume, ou seja, retração do mesmo, A marca de desgaste deve ser medida em relação à posição original do gume, por meio de uma referência, até mesmo se existir deformação plástica ou desgaste que provoque a retração deste.

O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte e é causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco. O parâmetro K_m , que é a medida do centro da cratera até a aresta de corte, é mostrado na figura 7. A profundidade da cratera é indicada por K_t e a largura da cratera é K_b .

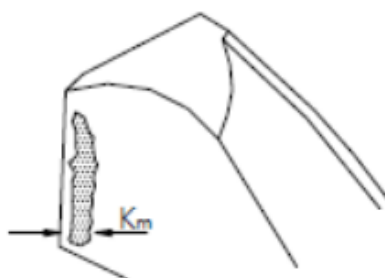


Figura 7 – Desgaste de cratera.

Fonte: adaptado (ISO 3685, 1993).

O desgaste do gume transversal de corte ocorre desde o primeiro contato da ferramenta com a peça. As solicitações mecânicas são simultâneas às velocidades de corte que tendem a zero no centro da ferramenta e desgastam por esmagamento do material. Os parâmetros C_t e C_m são mostrados na figura 8. Os esforços podem causar lascamento, caldeamento e finalmente a quebra da ferramenta.

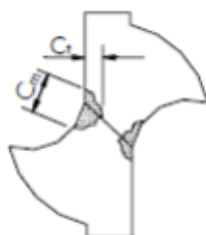


Figura 8 – Desgaste do gume transversal.

Fonte: adaptado (ISO 3685, 1993).

O desgaste de quina ocorre sobre os gumes principais, pelo atrito dos cavacos contra a superfície de saída e o atrito das guias da ferramenta contra a parede do furo. O desgaste de quina (W) é mostrado na figura 9. Nasquinas predominam as solicitações térmicas devidas à maior velocidade de corte, ao corte dos gumes principais e ao calor gerado pelo atrito dos cavacos contra a superfície de saída, assim como o atrito das guias da ferramenta contra a parede do furo.

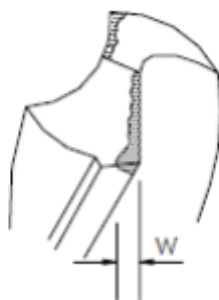


Figura 9 – Desgaste de quina.

Fonte: adaptado (ISO 3685, 1993).

Os mecanismos de desgastes são classificados como abrasão, difusão, oxidação, adesão e solicitações térmicas e mecânicas.

A abrasão ocorre na superfície de incidência na formação do desgaste de flanco e também atua na face de saída do desgaste de cratera. O desgaste por abrasão é causado pela presença de partículas duras no material usinado. A temperatura do corte reduz a dureza da ferramenta e fenômenos tribológicos ocorrem na interface dos materiais em movimento relativo (Stemmer, 2008).

A difusão é um fenômeno de transferência de átomos de um material para outro no estado sólido e é dependente da temperatura, do tempo e da afinidade química entre os materiais envolvidos. A difusão tem grande influência no desgaste de cratera formado na face em função da afinidade química do cavaco com o material da ferramenta. Os fenômenos tribológicos são responsáveis pelo desgaste por difusão na região da cratera (Diniz et al, 2006).

A oxidação ocorre em altas temperaturas e na presença de ar ou água contida nos fluidos de corte que geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto, por exemplo, formam filmes de óxidos nas superfícies da

ferramenta que são facilmente conduzidos para fora da região de corte por abrasão durante a usinagem (Diniz et al, 2006).

A adesão ocorre pela aderência de partículas microscópicas do material usinado nas superfícies da ferramenta por causa da afinidade química entre os materiais envolvidos e o movimento entre o cavaco e peça. Fragmentos microscópicos são arrancados das superfícies da ferramenta e arrastados pelo fluxo de material. A adesão predomina em baixas velocidades de corte e explica a formação de gume postiço (Diniz et al, 2006).

As solicitações térmicas e mecânicas ocorrem no gume da ferramenta. As tensões de cisalhamento na interface entre o cavaco e a ferramenta podem deformar plasticamente o gume. As altas temperaturas próximas à interface podem reduzir a resistência ao escoamento do material da ferramenta. A cratera é formada pela retirada de material da superfície da ferramenta.

3.2 VISÃO COMPUTACIONAL

Os conceitos teóricos estudados neste item abordam a formação da imagem digital, representação do corpo rígido, projeção de imagens sobre a câmera, parâmetros intrínsecos da câmera, iluminação, processamento digital de imagens e o coeficiente de correlação de Pearson.

A redução do preço de câmeras e microprocessadores permitiram a aplicação da visão computacional na indústria. A extração de dados por meio de visão é estudada há anos mas apenas nas últimas décadas foi possível desenvolver aplicações práticas. A visão computacional processa imagens cruas para se extrair alguma informação.

A visão computacional e a computação gráfica são complementares e se, de um lado busca-se obter informações a partir de imagens, do outro lado busca-se obter imagens a partir de informações. Em ambos os casos, são aplicados modelos que descrevem a geometria do sistema de projeção de câmeras e do ambiente. A visão computacional também estuda a utilização de imagens para medição de alguma característica de um processo de fabricação.

O sistema de visão computacional integra várias tecnologias diferentes para obter as informações utilizando-se de uma mesma arquitetura. O sistema de visão computacional é estruturado em componentes que são interligados para a organização de sistemas de processamento de imagens (Gonzales; Woods, 2008).

Um sistema de visão possui vários componentes (Gonzales; Woods, 2008) que são subsistemas: óptico, iluminação, aquisição, transmissão de dados, processamento de dados.

Segundo (Jähne et al, 1999), um sistema de visão computacional é dividido em subsistemas que integrados formam um sistema conforme é mostrado na Figura 10.

O sistema óptico direciona e dimensiona as informações, que são os feixes luminosos, provenientes do objeto para o sensor óptico.

O sistema de Iluminação projeta luz sobre o objeto de estudo que é refletida para o sensor óptico. Note que os objetos também podem emitir luz própria que é necessária para o sensor óptico.

O sistema de aquisição contém o sensor óptico que transforma o sinal

luminoso refletido pelo objeto de estudo para um sinal elétrico que será transmitido para a entrada do sistema de processamento de dados.

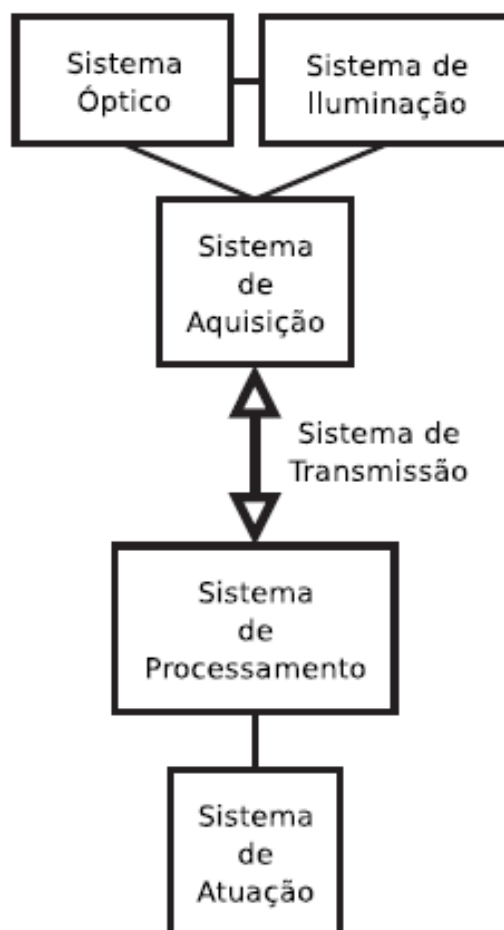


Figura 10 – Componentes de um sistema de visão.

Fonte: adaptado (Jähne et al, 1999).

O sistema de transmissão transporta os dados do sistema de aquisição para o sistema de processamento e também os sinais de comando do sistema de processamento para os sistemas óptico, de iluminação, de aquisição e de atuação.

O sistema de processamento de dados recebe sinais dos outros componentes e envia sinais de comando para o sistema de atuação. Ele deve possuir uma interface com o usuário para monitoração, parametrização e controle do processamento das imagens.

O sistema de atuação age sobre o ambiente do objeto de estudo tal como ligar a iluminação ou abrir uma proteção do sistema óptico.

3.2.1 FORMAÇÃO DA IMAGEM DIGITAL

O *pixel* (*picture element*) é a unidade estrutural de uma imagem digital e corresponde a uma área definida por a_p e b_p . Uma imagem está associado a um valor médio de brilho e de luz que é refletida conforme mostrado na Figura 11.

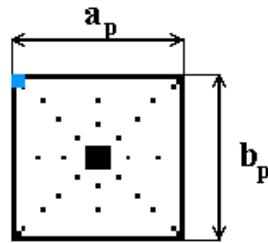


Figura 11 – Estrutura de um pixel.

Fonte: Gonzales e Woods (2008).

O *pixel* contém o valor que representa um determinado nível de intensidade da iluminação percebida pelo sensor óptico da câmera e pode-se denotar a imagem (Gonzales; Woods, 2008) fazendo,

$a_{ij} = f(a_p = i, b_p = j = f(i, j))$ na forma,

$$A = \begin{vmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} \cdots & f(0, u_p - 1) \\ a_{1,0} & a_{1,1} \cdots & f(1, u_p - 1) \\ f(v_p - 1, 0) & f(v_p - 1, 1) \dots \dots & f(v_p - 1, u_p - 1) \end{vmatrix} \quad (1)$$

Os *pixels* são ordenados de forma matricial na imagem sendo que as suas coordenadas (u_p, v_p) são dadas relativamente ao canto superior esquerdo da imagem que é a origem do sistema de coordenadas da imagem, ou seja, o ponto de coordenadas $(0,0)$, conforme é mostrado na Figura 12.

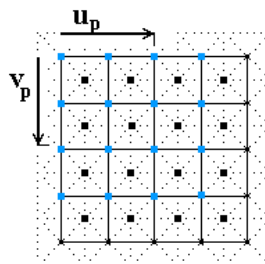


Figura 12 – Modelo do sistema de coordenadas de uma imagem.

Fonte: Gonzales e Woods (2008).

Uma imagem digital é representada conforme mostrado na equação 2:

$$f(u,v) = \begin{vmatrix} f(0,0) & f(0,1) \dots\dots & f(0,u_p-1) \\ f(1,0) & f(1,1) \dots\dots & f(1,u_p-1) \\ f(v_p-1,0) & f(v_p-1,1) \dots\dots & f(v_p-1,u_p-1) \end{vmatrix} \quad (2)$$

A captura de imagem é uma amostragem de pares ordenados de elementos (u,v) do produto cartesiano Z^2 , onde Z é o conjunto dos valores inteiros. Então, $f(u,v)$ é uma imagem se (u,v) são valores inteiros em Z^2 e f é uma função que associa um valor de intensidade pelo símbolo I como o nível de cinza para cada ponto em uma imagem monocromática. As imagens monocromáticas e coloridas possuem características distintas.

3.2.2 CARACTERÍSTICAS DA IMAGEM DIGITAL

A representação numérica armazenada em *pixels* representam as informações de um ambiente. As imagens são classificadas como: binárias, níveis de cinza e coloridas indexadas (Gonzales; Woods, 2008).

A imagem binária contém apenas dois valores discretos para cada *pixel*. O valor 0 (zero) representa o preto e o valor 1 (um), o branco. A imagem binária é utilizada na análise morfológica sobre objetos na qual a presença de cores ou texturas não importam.

A imagem indexada contém *pixels* que são representados por índices I em um mapa de cores primárias: o vermelho, o verde e o azul. Estas cores formam o sistema RGB que são as iniciais das cores primárias em inglês: *Red*, vermelho; *Green*, verde; *Blue*, azul.

O mapa de cores é formado por uma matriz de dimensão $m \times 3$, onde cada linha m especifica as quantidades dos componentes em vermelho, verde e azul do *pixel*. Ele é armazenado junto com a imagem e automaticamente carregado quando ela é manipulada.

A imagem em Níveis de Cinza contém valores de intensidade I em escala de cinza para cada *pixel*. Este tipo de imagem não utiliza um mapa de cores e cada *pixel* contém a intensidade representada de 0 (zero) a 1 (um). O valor 0 representa o preto, o 1 representa o branco e os valores intermediários entre 0 e 1 representam

níveis de cinza.

A imagem RGB contém *pixels* que possuem valores pertencentes a três planos de cores primárias, que identificam os componentes em vermelho, verde e azul (*Red*, *Green* e *Blue*). A imagem RGB não usa paleta de cores e cada cor é uma matriz que representa um dos três planos de cores e que gera uma imagem $M \times N \times 3$. A cor é formada pela combinação dos valores de cada plano da imagem. Uma imagem RGB normalmente usa 24 bits, totalizando cerca de 16 milhões de cores. Este tipo de imagem também é chamado de *truecolor* (cor verdadeira) porque o ser humano não consegue distinguir as suas variações, tal qual acontece no mundo real.

Os tipos de imagens são utilizados de acordo com a necessidade da aplicação. A automação geralmente utiliza imagens em tons de cinza ou binárias cujo tamanho em *bytes* diminuem o esforço computacional. As aplicações em tempo real são favorecidas por conta do tamanho menor das imagens em tons de cinza e binárias quando comparadas com as imagens *truecolor*.

3.2.3 REPRESENTAÇÃO DE UM CORPO RÍGIDO

O espaço tridimensional é representado analiticamente por um sistema cartesiano de coordenadas onde cada ponto $P \in R^3$ possui três coordenadas $X = [X_1, X_2, X_3]^T$, ou na forma $[X, Y, Z]^T$. A identificação dos eixos cartesianos é mostrada na figura 13.

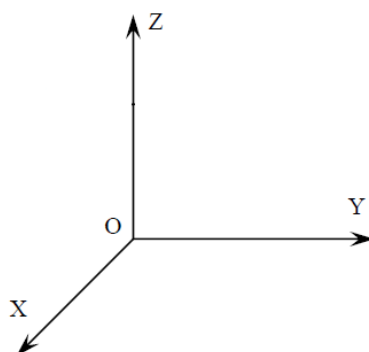


Figura 13 – Identificação dos eixos no sistema cartesiano.

Fonte: Coelho e Lourenço (2001).

A trajetória descrita para cada partícula de um objeto em movimento que é

capturada por uma câmera, representa a trajetória do objeto considerado na sua totalidade.

O objeto é denominado de corpo rígido quando a distância entre pontos quaisquer deste corpo não varia com o movimento (Ma et al, 2001). O movimento do corpo rígido é um mapeamento que descreve como as coordenadas de cada ponto variam e que satisfaça a condição:

$$\|X(t) - Y(t)\| = d \quad (3)$$

Onde $X(t)$ e $Y(t)$ são coordenadas de dois pontos quaisquer sobre o objeto especificados em função do tempo, da distância d constante e $t \in \mathbb{R}$. O mapeamento entre a configuração inicial e a final é:

$$g: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3; X \rightarrow g(X) \quad (4)$$

O mapeamento g que mantém a distância entre os pontos é denominado movimento de corpo rígido ou transformação euclidiana espacial. A norma e o produto cruzado entre dois vetores têm seus valores mantidos (Ma et al, 2001). Um objeto pode ser associado a um sistema de eixos e seu movimento de corpo rígido pode ser especificado pelo movimento deste sistema de eixos. Um objeto enquadrado em uma imagem digital pode então ser matematicamente modelado para depois ser processado.

3.2.4 PROJEÇÃO DE UM CORPO RÍGIDO NA CÂMERA

As câmeras são representadas por modelos que descrevem os objetos do ambiente tal qual eles são visualizados. Os modelos definem a transformação de um dado ponto no espaço de coordenadas tridimensionais $P=(X,Y,Z)$ para uma representação bidimensional $p(x,y)$ da imagem formada pela câmera. As câmeras podem ser representadas por meio de modelos tais como: modelo de projeção em perspectiva (*perspective projection*), perspectiva fraca (*weak perspective*), modelo afim (*affine projection*) e modelo ortográfico (*orthographic projection*) (Forsyth; Ponce, 2012).

O modelo de projeção em perspectiva, também denominado modelo *pinhole*,

é utilizado para processar imagens que visam medir objetos. A hipótese simplificadora é que a luz se propaga em linha reta e todos os raios de luz captados pelo centro da câmera convergem para o centro óptico C , como é mostrado na Figura 14.

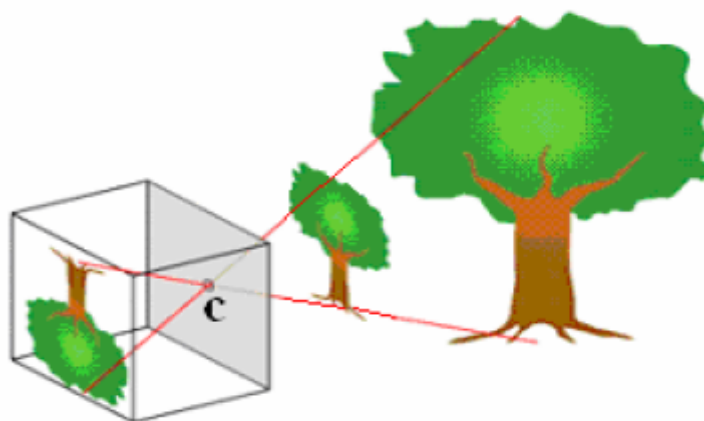


Figura 14 – Centro óptico

Fonte: adaptado (Forsyth; Ponce, 2012).

Uma imagem no ponto P que passa pelo centro óptico da câmera é projetada no plano invertido π e origina o ponto p , como é mostrado na Figura 15.

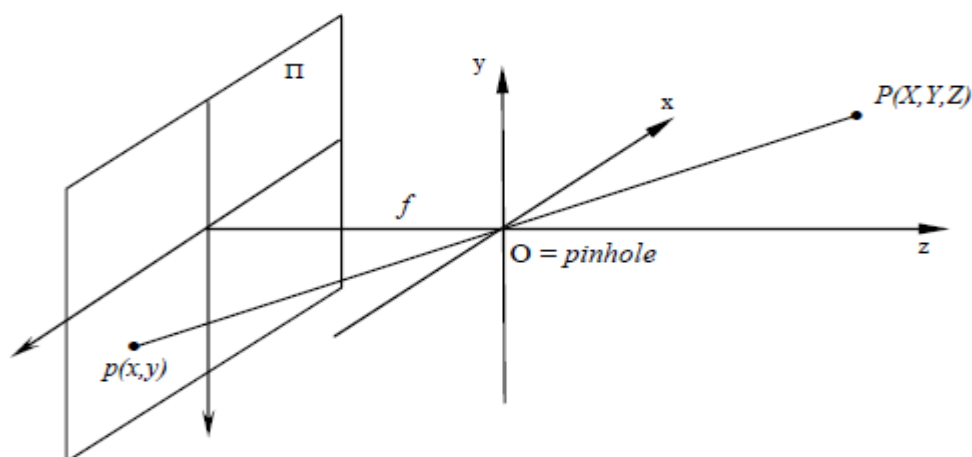


Figura 15 – Modelo de projeção em perspectiva.

Fonte: adaptado (Forsyth; Ponce, 2012).

O modelo de projeção em perspectiva é representado pela matriz de transformação T e é dada por:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

O modelo proposto para este trabalho é mostrado na figura 16 e consiste do plano π (plano de imagem) e um ponto O em 3D que é denominado de centro de projeção. A distância f entre os planos π e O é denominado de distância focal. A linha que passa através de O e é perpendicular a π é denominada de eixo óptico. O ponto p' é O ponto em que a linha reta entre P e O intercepta o plano π . O sistema de coordenadas 3D é dado por $P=[X,Y,Z]^T$ e o sistema de coordenadas da câmera $p'=[x',y',f]$. Note que em p' , o componente z' é sempre igual à distância focal f .

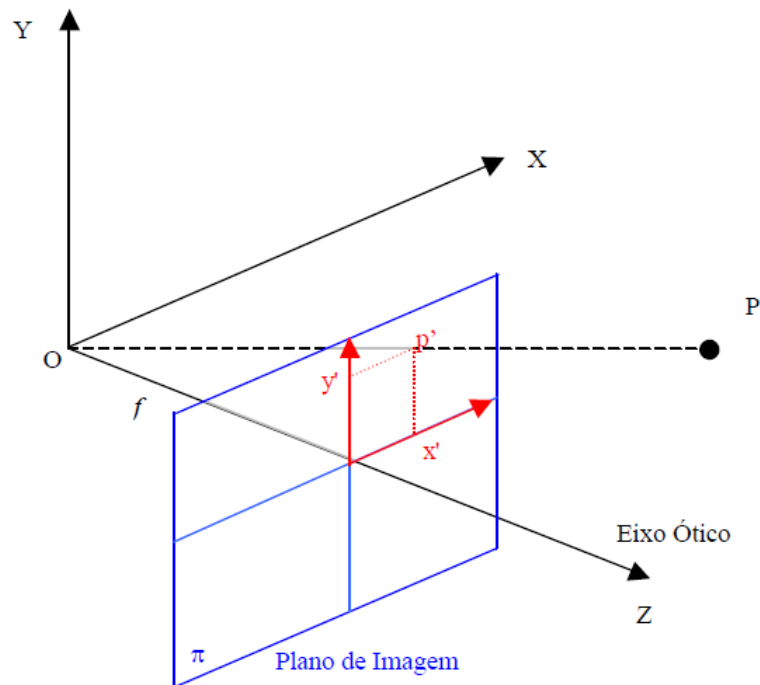


Figura 16 – Formação da imagem.

Fonte: adaptado (Lins et al, 2015).

A posição da projeção do ponto $P=[X,Y,Z]$ no plano de imagem pode ser

obtida por semelhança de triângulos como é mostrado na Figura 17.

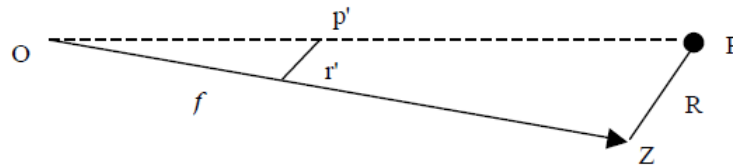


Figura 17 – Relação geométrica para a obtenção de p' .

Fonte: adaptado (Jain et al, 1995).

Da figura 17, obtém-se:

$$\frac{f}{Z} = \frac{r'}{R} \quad e \quad \frac{x'}{X} = \frac{y'}{Y} = \frac{r'}{R} \quad (6)$$

Combinando as duas expressões, tem-se:

$$\frac{x'}{X} = \frac{f}{Z} \quad e \quad \frac{y'}{Y} = \frac{f}{Z} \quad (7)$$

Assim, a posição do ponto $P = [X, Y, Z]$ é dada por:

$$x' = \frac{f}{Z} X \quad e \quad y' = \frac{f}{Z} Y \quad (8)$$

A equação 8 representa a transformação de um ponto no plano no espaço 3D para coordenadas 2D. As posições de x e y são relativas ao referencial da câmera em coordenadas métricas. Qualquer análise sobre a imagem depende da posição do ponto (em pixels) dado por $p'(x', y')$, como mostrado na Figura 17.

3.2.5 PARÂMETROS INTRÍNSECOS

Os parâmetros intrínsecos fornecem as características digitais, ópticas e geométricas de uma câmera. O modelo de projeção em perspectiva utiliza a distância focal f , a transformação entre os sistemas de coordenadas da câmera p , a coordenada dos pixels p' e a distorção geométrica das lentes (Ma et al, 2001).

A projeção de uma câmera ideal considera um ponto P , de coordenadas $P_0 = [X_0, Y_0, Z_0]^T \in R^3$ que é relativo ao sistema de referência. As coordenadas do mesmo ponto P relativo ao sistema de referência da câmera são dadas pela transformação de corpo rígido, como apresentado na equação 9.

$$P = R P_0 + T \quad (9)$$

O ponto P é projetado sobre o plano de imagem representado por p no modelo de projeção em perspectiva, como mostrado na equação 10.

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (10)$$

A equação 10 é representada em coordenadas homogêneas como mostrado na equação 11.

$$Z_p = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde, $P = [X, Y, Z, 1]^T$ e $p = [x, y, 1]^T$. Decompondo-se a equação 11 em duas matrizes ela passa a ser mostrada como na equação 12,

$$K_f = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad e \quad \pi_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

A perspectiva de uma câmera ideal tem o seguinte formato como mostrado na equação 13.

$$\lambda \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Onde λ é um fator de escala representado por um valor escalar positivo e

a profundidade Z de P é desconhecida.

A especificação entre o sistema de coordenadas do plano de imagem dado por p em relação à matriz de *pixels* de coordenadas (u_p, v_p) da imagem é necessária para o processamento computacional da equação 13.

O plano de imagem π da figura 16 pode ser representado por uma matriz de *pixels* como mostrado na Figura 18.

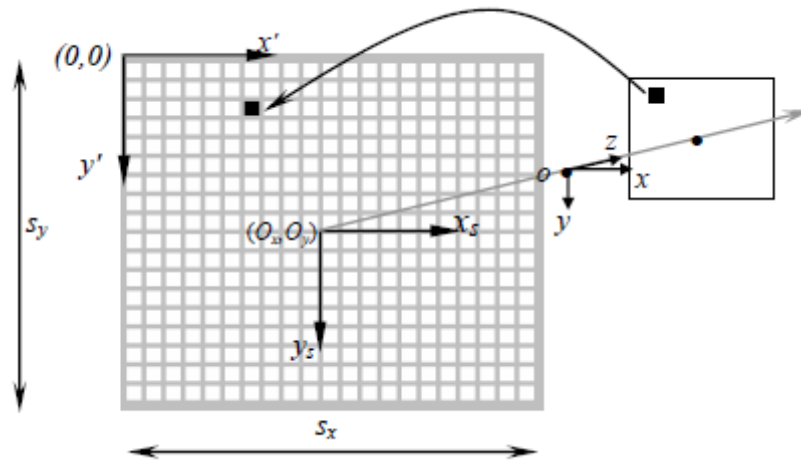


Figura 18 – Transformação de coordenadas de imagem para de pixels.

Fonte: adaptado (Ma et al, 2001).

A coordenada (x, y) no plano de imagem é especificada em unidades métricas enquanto que, (x_s, y_s) são coordenadas em *pixels*. A transformação depende do tamanho do *pixel* na direção x e y , dados por s_x e s_y , respectivamente. Para obter a transformação das coordenadas da imagem p' com as coordenadas p do mesmo ponto da câmera é obtida como mostrada na equação 14 (Trucco; Verri, 1998).

$$x' = (x_s + o_x) \text{ e } y' = (y_s + o_y) \quad (14)$$

Onde o_x e o_y são coordenadas em *pixel* do centro do plano de imagem, e s_x e s_y representam o tamanho do pixel em milímetro, respectivamente na direção horizontal e vertical. A representação de forma matricial é mostrada na equação 15 (Ma et al, 2001).

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (15)$$

O sistema em coordenadas homogêneas é definido, a partir das equações 14 e 15, como p' e é mostrado na equação 16.

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Onde,

$$A = \begin{bmatrix} s_x & 0 & o_x \\ 0 & s_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

A matriz K de parâmetros intrínsecos é dada pela combinação da matriz K_f com a matriz K_s como mostrada na equação 18.

$$K = K_s K_f = \begin{bmatrix} s_x & s_\theta & o_x \\ 0 & s_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} fs_x & fs_\theta & o_x \\ 0 & fs_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

O *pixel* não retangular é representado por uma matriz formada por um parâmetro adicional s_θ , denominado de *skew factor*, que possui um valor próximo de zero.

Assim, um ponto em coordenadas espaciais é relacionado para coordenadas em *pixel* da imagem, como apresenta a equação 19.

$$\lambda \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fs_x & fs_\theta & o_x \\ 0 & fs_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A matriz K da equação 18 reúne os parâmetros intrínsecos de uma câmera e é denominada de calibração.

3.2.6 ILUMINAÇÃO PARA AQUISIÇÃO DE IMAGENS

A iluminação projeta luz sobre o objeto de estudo que não emita a luz própria necessária para o sensor óptico. A luz neste trabalho é qualquer faixa do espectro luminoso e não se limita a aquela que é visível ao olho humano. Há aplicações que requerem a aplicação de luz em faixas não visíveis do espectro luminoso. A faixa total do espectro luminoso é mostrada na figura 19.

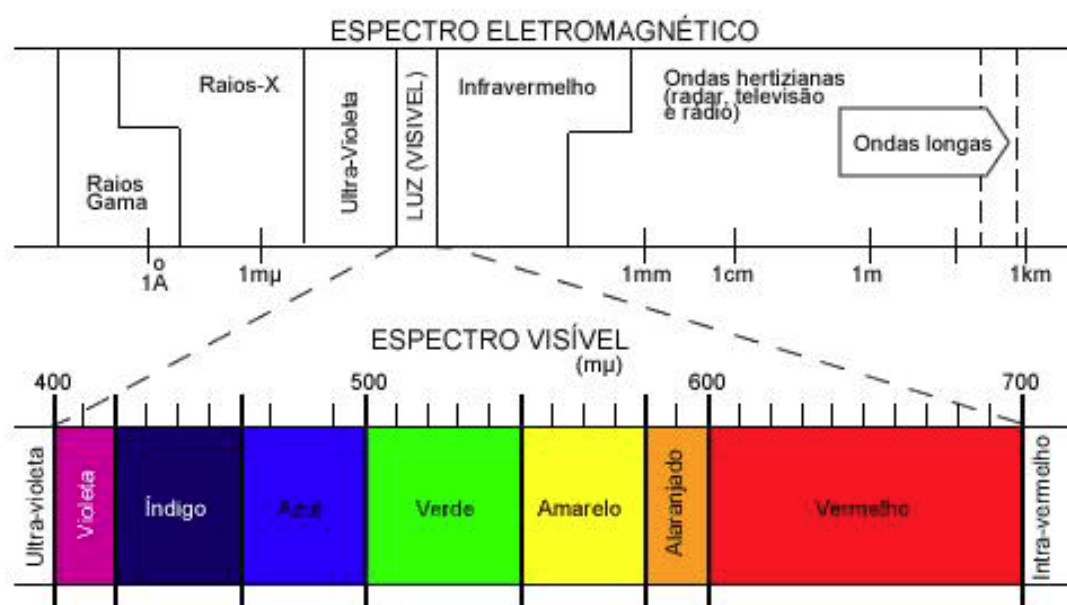


Figura 19 – Faixas do espectro luminoso.

Fonte: adaptado (Lopes, 2013).

A iluminação para o ambiente da aplicação destaca o objeto de estudo em relação às demais informações da cena e facilita as etapas de processamento das informações (Erhardt; Ferron, 2000). A seleção da fonte luminosa e da técnica de iluminação é determinada pelas características superficiais do objeto de estudo: geometria, estrutura, cor, transparência, refletância. O objetivo é incidir sobre a superfície do objeto uma iluminação homogênea e constante ao longo do tempo (Jähne et al, 1999).

As fontes de iluminação são classificadas como naturais ou artificiais (Jähne et al, 1999). A radiação solar é uma fonte de iluminação natural enquanto que as lâmpadas incandescentes, fluorescentes, LEDs e laser são artificiais (Erhardt; Ferron, 2000), (Jähne et al, 1999).

A Luz natural é normalmente a opção mais econômica mas não costuma ser apropriada para aplicações de visão. O processamento de imagens é dificultado ao utilizar-se luz natural por causa das variações da sua cor e intensidade luminosa ao longo dos dias, períodos do ano e com as condições temporais. Pode também ser fonte de ruído para aplicações que utilizam outras fontes de iluminação porque a luz solar contém todas as frequências do espectro luminoso e possui grande potência. É necessário prover algum tipo de encapsulamento do ambiente.

As lâmpadas incandescentes podem causar interferências quando a taxa de aquisição de imagens é múltipla da frequência da rede elétrica (50 ou 60 Hertz). As câmeras lineares podem gerar imagens com interferência (linhas claras escuras), devido à diferença entre as frequências da rede e de aquisição. A resposta das lâmpadas incandescentes ao controle de sua intensidade luminosa possui inércia dependente da temperatura atual de seu filamento de tungstênio. Elas emitem luz visível e também radiação infravermelha.

Os LEDs permitem um controle da intensidade luminosa sem inércia e por isto também são próprios para aplicações estroboscópicas. Eles são pequenos, leves e maior tempo de vida em relação às lâmpadas incandescentes. Emitem pouco calor, perturbação acústica, vibração ou ruídos. Trabalham em baixa tensão e são arranjados em diversas geometrias para criação de diferentes módulos de iluminação. A faixa de frequência luminosa varia desde o azul até infravermelho. Os sistemas iluminados por fibras ópticas podem ser alimentados por LED.

Os lasers possuem uma grande concentração de potência por unidade de área. As antigas e grandes unidades de laser foram substituídas por módulos de diodos laser por questões de segurança. Eles são pequenos e integram-se em sistemas com espaços limitados da mesma forma que os LEDs. Geram projeções de linhas, pontos, círculos, matrizes e outras formas geométricas de iluminação. Os sistemas iluminados por fibras ópticas podem ser alimentados por lasers.

A técnica de iluminação deve ser selecionada de acordo com o ambiente e o tipo de aplicação a ser desenvolvida depois da seleção da fonte de iluminação. As principais técnicas de iluminação são: direcional, multidirecional, anel, campo escuro, luz de fundo, cúpula, difusa e estruturada (Yoder, 2008).

3.2.7 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

As técnicas de processamento de imagens são utilizadas para destacar, melhorar ou alterar uma imagem e não extraem as informações. O objetivo é remover erros e informações inúteis para o resultado desejável como, por exemplo, retirar o borrão de uma imagem de um objeto em movimento.

O processamento de imagem é classificado em subprocessos: análise de histograma, limiarização, detecção de bordas e segmentação.

O histograma de uma imagem traduz a distribuição estatística dos seus níveis de cinza. É uma representação gráfica do número de *pixels* associado a cada nível de cinza presente em uma imagem e pode ser expressa como uma percentagem do número total de *pixels* na imagem (Rencz, 1999). Dada uma imagem digital $f(x, y)$ com M linhas e N colunas, seu histograma $H_f(C)$ é definido por:

$$H_f(C) = \frac{n_c}{M \cdot N} \quad (20)$$

Sendo n_c a frequência do nível de cinza C na imagem. Operações para processamento de imagens podem ser realizadas a partir do histograma em tons de cinza: inversão da escala de tom de cinza, expansão de contraste, filtragem espacial, operação morfológica e segmentação e limiarização. Um exemplo de histograma em tons de cinza é mostrado Figura 20.

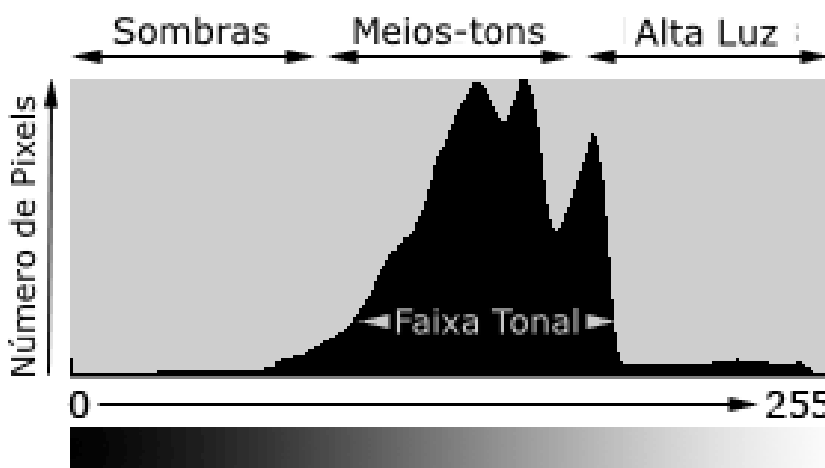


Figura 20 – Histograma de imagem em tons de cinza.

Fonte: adaptado (Gonzales; Woods, 2008)

A inversão da escala de tom de cinza gera o negativo de uma imagem capturada por uma câmera. Isto possibilita discriminar melhor os alvos em determinadas imagens (Ma et al, 2001).

A expansão de contraste pode compensar a iluminação deficiente no instante da aquisição da imagem, abertura insuficiente do diafragma da câmera, tempo de exposição demasiadamente curto ou outros problemas no processo de digitalização de imagens (Gonzales; Woods, 2008). A redução no contraste de uma cena dificulta o discernimento de seus componentes. A expansão de contraste redistribui os tons de cinza dos *pixels* de uma imagem para elevar o contraste da imagem.

A filtragem espacial é uma operação de convolução entre uma máscara, conhecida em inglês por *mask*, *kernel* ou *template*, com a imagem a ser filtrada. A máscara é um arranjo matricial de dimensões inferiores às da imagem a ser filtrada e geralmente é quadrada. Os valores de cada elemento da matriz são definidos como fatores de ponderação (pesos) a serem aplicados sobre os *pixels* da imagem (Acharya; Ray, 2005).

As imagens possuem respostas espectrais diferentes em áreas que são delimitadas por regiões estreitas que são denominadas de bordas. As bordas ocorrem entre objetos ou áreas distintas na imagem e podem também representar o contato entre áreas com diferentes condições de iluminação que ocorrem em função dos ângulos formados entre a radiação incidente e os planos da cena imageada. As bordas representam, em imagens monocromáticas, alterações bruscas entre intervalos de níveis de cinza (Gonzales; Woods, 2008) e a sua representação gráfica é caracterizada por altos valores de gradientes.

Os altos valores de gradientes correspondem a espectros de alta frequência como encontradas em limites entre áreas iluminadas e sombreadas. Também são observadas em redes naturais como as de drenagem ou em redes artificiais como as de transporte.

Os baixos valores de gradientes correspondem a espectros de baixa frequência como os alvos que variam uniformemente com a distância.

A operação morfológica é uma modelagem que descreve ou analisa a forma de um objeto digitalizado. O modelo morfológico para a análise de imagens extrai informações a partir da álgebra booliana e na teoria dos conjuntos e reticulados. O princípio de morfologia digital é considerar a imagem um conjunto de pontos

elementares (*pixels*) que formam subconjuntos bidimensionais ou tridimensionais. Os subconjuntos e a inter-relação entre eles formam a morfologia da imagem. As operações básicas da morfologia digital são: a erosão e a dilatação.

A erosão remove os *pixels* da imagem que estejam fora de um padrão dado. A dilatação altera uma área relacionada a um pixel para um padrão dado. A definição destas operações é alterada a depender do tipo de imagem a ser processada: preto e branco, tons de cinza ou colorida. As outras operações e transformações são baseadas nos operadores de conjuntos, algumas interativas, e nos dois operadores básicos da morfologia matemática (Dougherty; Lotufo, 2003);

A segmentação é uma metodologia analítica que extrai medidas, características ou informação. Ela é geralmente o primeiro processo da análise de imagem (Gonzales; Woods, 2008) e consiste na subdivisão da imagem em partes ou objetos constituintes. Algoritmos de segmentação podem identificar diferenças entre dois ou mais objetos e também discriminar partes entre si ou entre uma parte e o fundo da imagem. A segmentação de imagens monocromáticas utiliza algoritmos de descontinuidade e de similaridade dos níveis de cinza. A descontinuidade consiste no particionamento da imagem em regiões caracterizadas por mudanças bruscas dos níveis de cinza geralmente para detectar pontos isolados como linhas e bordas da imagem. A similaridade consiste na limiarização e no crescimento de regiões.

A limiarização é uma abordagem para a segmentação da imagem e é fundamentada na análise da similaridade de níveis de cinza. Ela extrai objetos de interesse mediante a definição de um limiar T que agrupa objetos em níveis de cinza da imagem. Uma das dificuldades do processo reside na determinação do valor mais adequado de limiarização, ou seja, do ponto de separação dos *pixels* da imagem considerada. A análise do histograma da imagem possibilita estabelecer um valor para T na região do vale situado entre picos que caracterizam regiões de interesse na imagem. Há diversos tipos de limiarização.

A limiarização mais simples é a do particionamento do histograma da imagem por um único limiar T . A imagem é varrida e cada pixel é rotulado como pertencente a um objeto ou ao fundo em função da relação entre o valor do pixel e o valor do limiar. O método é mais eficaz quanto mais bem definidas estão as massas de *pixels* no histograma da imagem a ser segmentada.

3.2.8 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r) é utilizado em análises estatísticas, reconhecimento de padrões e processamento de imagens. Ele compara duas imagens com o propósito de registro de imagens, reconhecimento de objetos e medida de disparidades. Para imagens em tons de cinza, o coeficiente de correlação de Pearson é definido pela equação 21:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\sqrt{\sum_i (x_i - x_m)^2} \sqrt{\sum_i (y_i - y_m)^2}} \quad (21)$$

Onde x_i é a intensidade do i -ésimo *pixel* da imagem 1, y_i é a intensidade do i -ésimo *pixel* da imagem 2, x_m é a média das intensidades da imagem 1 e y_m é a média das intensidades da imagem 2. O coeficiente de correlação r recebe o valor 1 se as duas imagens forem exatamente iguais, recebe o valor 0 se as duas imagens forem totalmente diferentes e recebe o valor -1 se uma imagem for o negativo da outra (Miranda Neto et al, 2007).

Distorções na imagem, *pixels* com ruído, pequenas variações do objeto em relação à câmera e outros fatores podem produzir um valor de r menor que 1, mesmo se o objeto não tiver sido movido ou se ele não sofreu nenhuma alteração (Yen; Johnston, 1996).

O coeficiente de correlação de Pearson condensa a comparação de duas imagens em um simples escalar r e é invariante às transformações lineares em x e y . Variações no brilho ou contraste de uma imagem não afetam o resultado de r (Yen; Johnston, 1996).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho possui duas fases que são o desenvolvimento das cadeias de processamento de imagens para a medição de desgaste e, a seguir, a automatização deste processo.

O sistema de medição é constituído de subsistemas: o suporte da ferramenta, a iluminação, a câmera e o computador.

As imagens capturadas pela câmera são enviadas para o computador que processa as imagens. O algoritmo para a medição do desgaste dos insertos foi desenvolvido em três cadeias de processamento de imagens: aquisição, seleção e medição.

Após a validação dos experimentos das cadeias de processamento de imagens, criou-se uma arquitetura para automatizar o processo de medição composto dos seguintes subsistemas: o centro de usinagem, a iluminação, os atuadores, a câmera e o computador. A arquitetura mostra os subsistemas e como eles se comunicam entre si tal qual na figura 21.

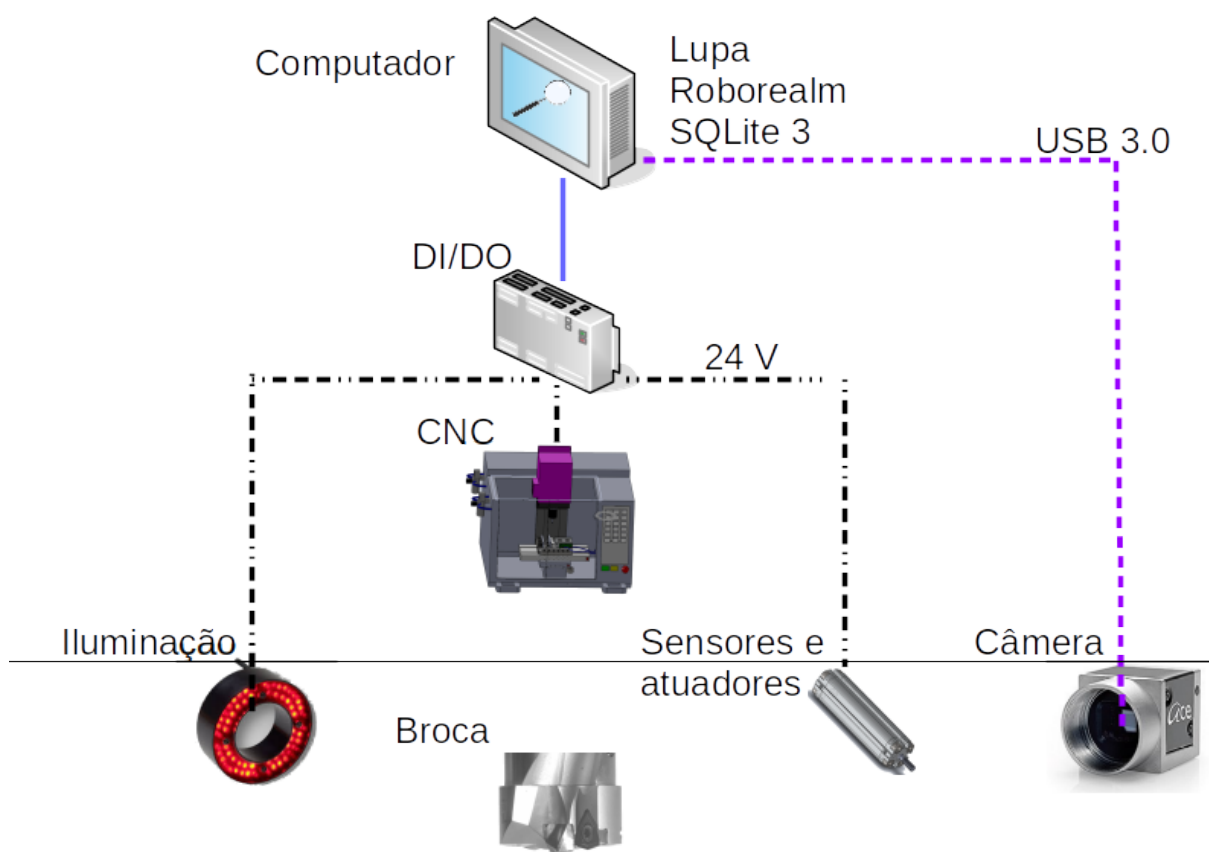


Figura 21 – Arquitetura do protótipo do centro de usinagem

Depois da arquitetura validada, foi elaborado o projeto elétrico e pneumático como mostrado na figura 22.

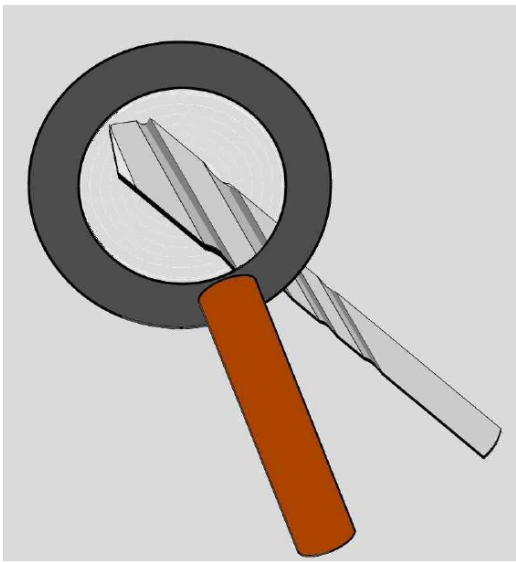
Projeto: Lupa - Mandriladora Ibermia - Unidade 2													
	Sumário:												
	1 Arquitetura 2 Estrutura 3 Lista de materiais elétricos e pneumáticos 4 Painel 5 Unifilar 6 Caixa de proteção - Circuito pneumático 7 Caixa de proteção - Circuito pneumático 8 Caixa de proteção - Circuito pneumático 9 Caixa de proteção - Circuito pneumático 10 Alimentação 11 Módulo de aquisição 12 Módulo de aquisição 13 DI - Mandriladora CNC 14 DI - Caixa de proteção 15 DI - Reservados 16 DO - Caixa de proteção 17 DO - Limpeza da broca 18 DO - Iluminação 19 DO - Reservados 20 Conector de passagem, =M001 +A -XT1 21 Conector de passagem, =M001 +A -XT1 22 Lista de conexões 23 Lista de conexões 24 Lista de conexões												
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Folha de Rosto</td> <td colspan="2">=M001</td> </tr> <tr> <td>Auto</td> <td>Auto</td> <td>Auto</td> <td>Auto</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> </table>		Folha de Rosto		=M001		Auto	Auto	Auto	Auto	1	2	3	4
Folha de Rosto		=M001											
Auto	Auto	Auto	Auto										
1	2	3	4										

Figura 22 – Projeto elétrico e pneumático

Após a aquisição dos componentes, o projeto mecânico foi desenvolvido e a instalação do sistema foi implementado no laboratório como um protótipo que simula uma mandriladora CNC da empresa.

São descritos a seguir os principais componentes utilizados na arquitetura mostrada anteriormente, assim como os protocolos e interfaces de comunicação. A metodologia de medição está descrita no item das cadeias de processamento de imagens. A automatização do processo e o seu procedimento de medição estão descritos no item do programa Lupa.

4.1 SUPORTE E FERRAMENTA

O suporte permite que a broca seja girada manualmente tal como se estivesse na posição de estacionamento dentro do centro de usinagem para mostrar

as arestas desgastadas dos insertos a serem medidos. O suporte com a ferramenta é mostrado na figura 23.



Figura 23 – Suporte com ferramenta

A ferramenta é uma broca composta de três insertos fabricados de metal duro que são revestidos de óxido de alumínio (Al_2O_3) como mostrado na figura 24.

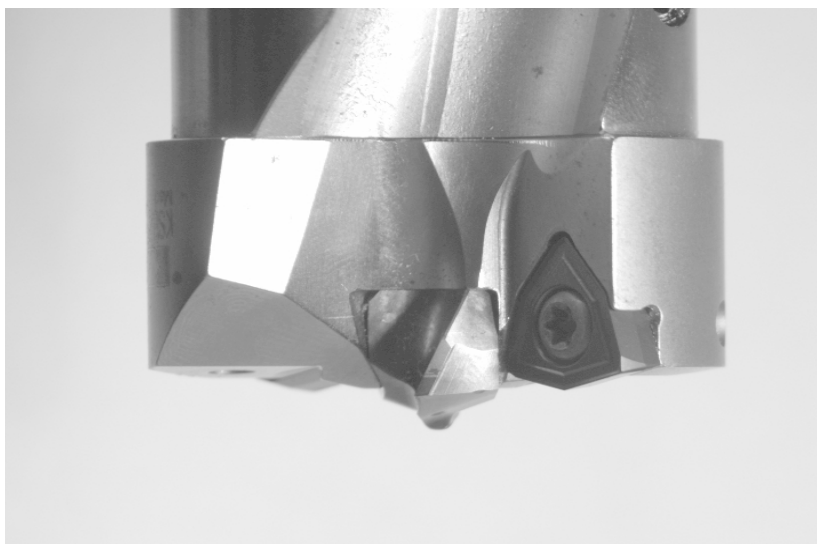


Figura 24 – Broca de 39 mm de diâmetro com 3 insertos de metal duro

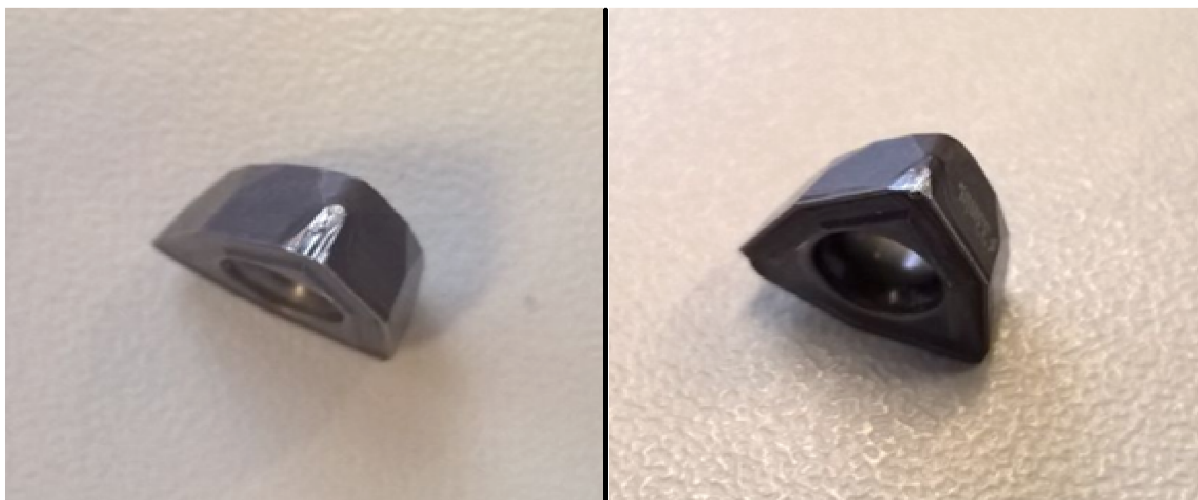
As cadeias de processamento de imagens mediram o desgaste em insertos que furaram flanges de 80 furos nos anéis externos de rolamentos como mostrado na figura 25. Os anéis são de aço composto aproximadamente de 1% de carbono e 1,5 % de cromo.



Figura 25 – Furação de rolamento

Fonte: Lins (2016).

Os insertos utilizados no experimento se originaram do processo de furação e foram tocados com 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 furos usinados. Isto gerou nove conjuntos de três insertos que furaram vários flanges. Amostras são mostrados na figura 26.



(A)

(B)

Figura 26 – Amostras de insertos com desgaste

4.2 ILUMINAÇÃO

A iluminação é composta de um anel luminoso de LEDs cuja intensidade e posição da luz projetada sobre a broca é ajustada manualmente até que as imagens capturadas tenham o contraste adequado para o processo de medição. O modelo utilizado é o RL4260, da Dark Field, e as suas principais especificações são mostradas na tabela 2.

Nome	Especificação
Modelo	RL4260
Fabricante	Dark Field
Quantidade de LEDs	60
Diâmetro interno [mm]	55
Diâmetro externo [mm]	100
Campo de visão (FOV) [mm]	175
Comprimento do cabo [m]	1,5

Tabela 2 – Especificações do anel luminoso

A iluminação foi acondicionado em uma caixa que proteção contra o fluido de corte e o cavaco para o caso da instalação dentro de um centro de usinagem. Os LEDs são acesos ou apagados em sincronismo com o processo de captura de imagens. O desenho da caixa de proteção é mostrado na figura 27.

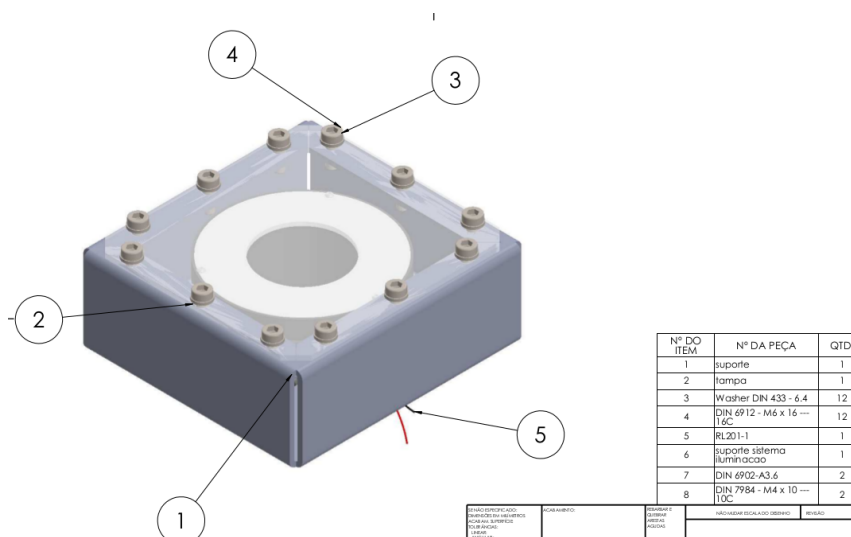


Figura 27 – Caixa de proteção da iluminação

Fonte: adaptado (Lins, 2016)

4.3 CÂMERA

A câmera é composta de lente, sensor e interface. O modelo da câmera utilizado é acA1920-155um, da Basler Ace (2017), como mostrado na figura 28.



Figura 28 – Câmera

Fonte: Blaster Ace (2017)

O sensor selecionado é monocromático pois texturas e cores não importam na análise morfológica das cadeias de processamento de imagens. As especificações da câmera e do sensor são mostradas na tabela 3.

Nome	Valor
Resolução H x V [pixels]	1920 x 1200
Círculo de imagem máximo [pol]	1/1,2"
Tipo de sensor	CMOS
Tamanho de pixel H/V [μm]	5,86 x 5,86
Modelo	acA1920-155um
Fabricante	Basler Ace
Velocidade de quadros [FPS]	164
Interface	USB 3.0
Profundidade de pixel [bit]	10 ou 12
Tamanho do sensor [mm]	11,33 x 7,13
Lente	5018M3M, da Azure Photonics

Tabela 3 – Especificações da câmera de captura de imagens

A lente utilizada na câmera é o modelo 5018M3M, da Azure (2017) cuja abertura e distância focal é ajustada para que a imagem projetada sobre o sensor seja nítida.

As especificações da lente são mostradas na tabela 4.

Nome	Especificação
Modelo	5018M3M
Fabricante	Azure
Distância focal [mm]	50
Ângulo de visão	11.52°x6.86°x9.14°

Tabela 4 – Especificações da lente

As imagens são capturadas pelo sensor monocromático IMX174LLJ-C, da Sony. As imagens são transmitidas via a interface USB 3.0 (USB, 2017) para o processamento digital no computador.

A câmera foi acondicionada dentro de uma caixa de proteção de aço cujo projeto é mostrado na figura 29. Um atuador pneumático abre a caixa da câmera para a aquisição das imagens e garante o fechamento para a proteção da câmera contra o ambiente dentro de um centro de usinagem tal qual a iluminação.

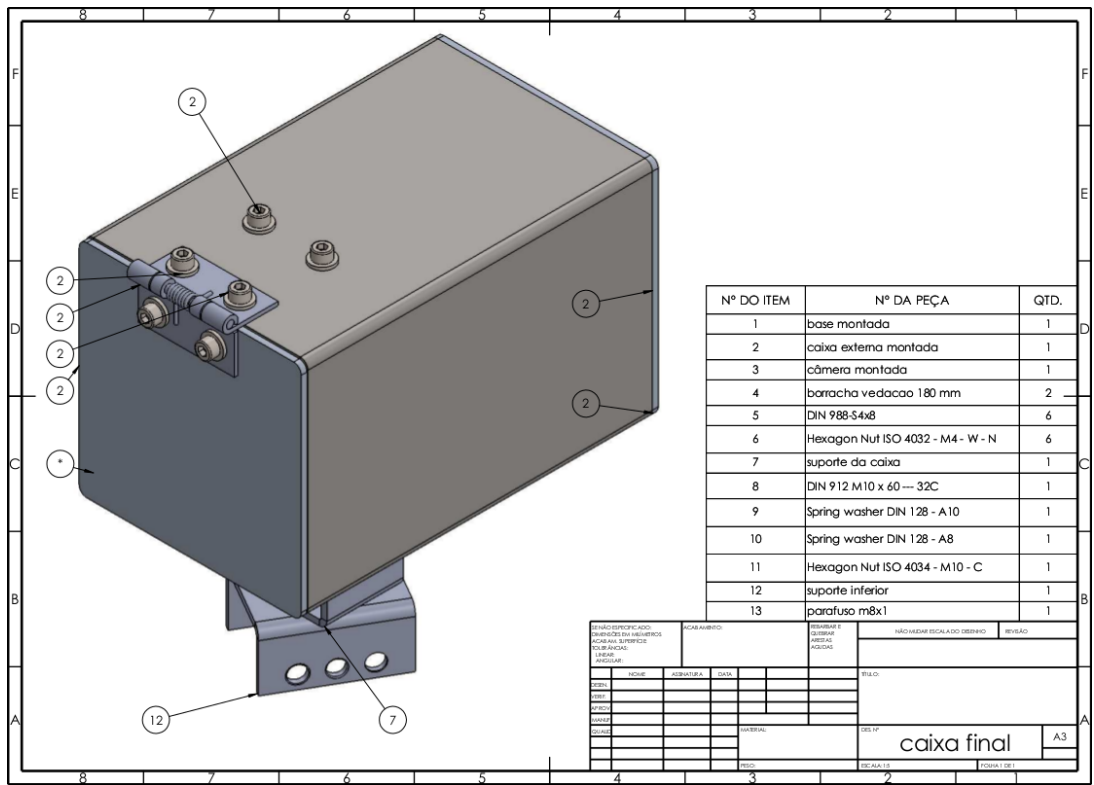


Figura 29 – Caixa de proteção da câmera

Fonte: Adaptado (Lins, 2016)

Há 2 sensores acoplados à porta que enviam sinais de caixa de proteção aberta e fechada, respectivamente.

4.4 CENTRO DE USINAGEM

O protótipo do centro de usinagem CNC utilizou ferramentas e insertos que usinaram os flanges de anéis externos dos rolamentos da empresa patrocinadora.

O comando do CNC envia 2 sinais de 24 V em corrente contínua: máquina pronta e ferramenta pronta. Para o protótipo foram utilizados dois botões para simular estes sinais. O sinal de máquina pronta indica que o centro de usinagem está em funcionamento, mas não necessariamente usinando.

O sinal de ferramenta pronta é enviado quando a ferramenta está na posição de estacionamento girando a 20 RPM. O anel então gira e é posicionado para a próxima operação de furação. Neste intervalo, a câmera captura as imagens.

4.5 MÓDULO DI/DO

O módulo DI/DO possui entradas digitais (DI – *Digital input*) e saídas digitais (DO – *Digital output*) que estão ligados aos seguintes dispositivos descritos anteriormente: iluminação, caixa de proteção da câmera e comando do centro de usinagem CNC. Os sinais de processo e a sua ligação elétrica ao módulo são descritos na tabela 5.

Sinal	Comentário
DI0	=1, mandrilhadora CNC pronta
DI1	=1, broca em posição de medição
DI3	=1, caixa de proteção da câmera fechada
DI4	=1, caixa de proteção da câmera aberta
DO4	=1, abrir caixa de proteção da câmera
DO5	=1, fechar a caixa de proteção da câmera
DO6	=1, soprar ar sobre a broca; =0, parar
DO7	=1, ativar iluminação; =0, desativar

Tabela 5 – Sinais do processo

O módulo selecionado é o modelo ADAM-6052, da Advantec (2017). Ele envia e recebe os sinais do processo para o computador via o protocolo Modbus (2018) por meio de uma interface Ethernet (2018) conforme mostrado na arquitetura da figura 21.

4.6 COMPUTADOR

O computador executa os programas de processamento de imagens computacionais e também o de monitoração e controle: Roboreal[®] (2016) e Lupa respectivamente. O programa de gerenciamento da base de dados SQLite também é executado e está integrado no programa Lupa. As especificações do computador são mostrados na tabela 6.

Nome	Valor
Processador	I7, da Intel
Frequência [GHz]	2,5
Memória RAM [GB]	16
Resolução do Monitor [pixel]	1280 x 1024
Interface USB	3.0
Interface Ethernet	Gigabit
Adaptador de vídeo	GeForce 930M, da NVIDIA
Sistema operacional	Windows 7
Programa de processamento de imagens	Roboreal versão 2.86

Tabela 6 – Especificações do computador

A comunicação entre os programas Lupa, SQLite e as cadeias de processamento de imagens do Roboreal[®] é realizada por meio do conjunto de protocolos TCP/IP.

As mensagens XML conectam Lupa com o Roboreal e os comandos SQL conectam Lupa com a base de dados gerenciada pelo SQLite 3. Os detalhes da comunicação são mostrados na figura 30 e no texto a seguir.

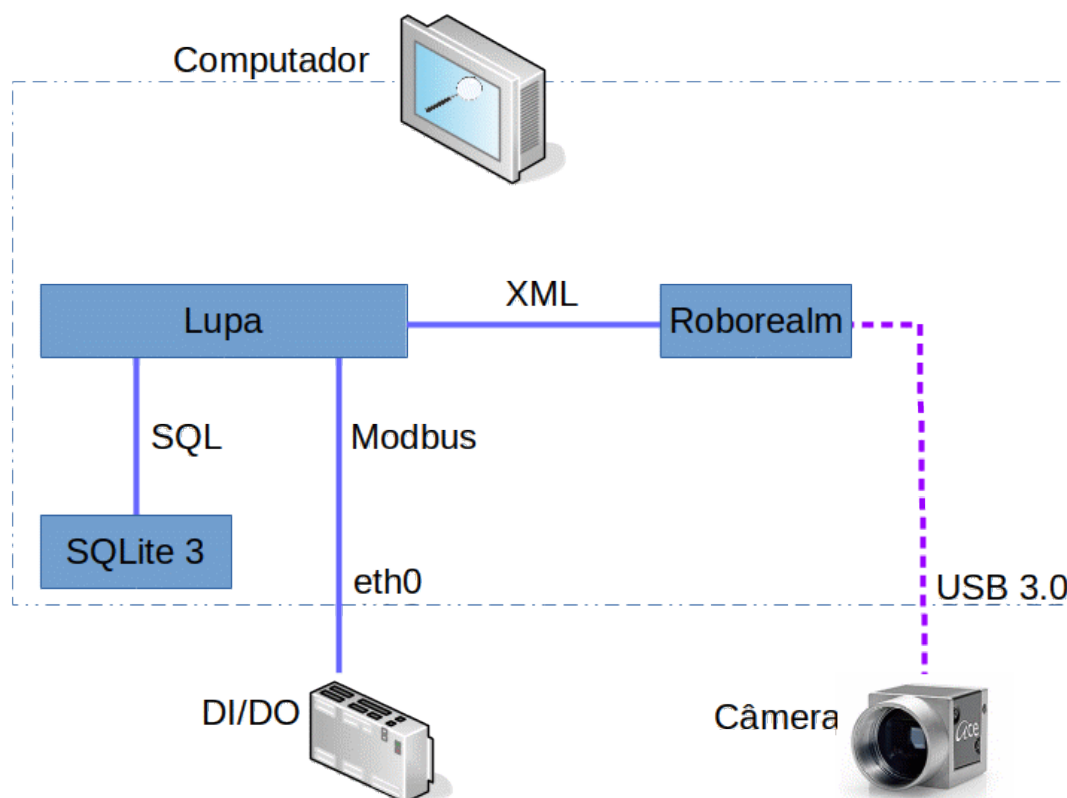


Figura 30 – Comunicação entre os programas do computador

As imagens transmitidas pela câmera são recebidas via a interface USB 3.0 para o processamento das cadeias. A edição, parametrização, programação das cadeias de processamento de imagens e visualização dos resultados são mostrados na tela por meio da interface gráfica do usuário do Roboreal®.

O monitoramento dos gráficos de controle e o controle do processo são executados pela interface do usuário do Lupa. O histórico das medições são armazenados em uma base de dados e as suas respectivas imagens em uma pasta. A sequência do processo é controlada pelo Lupa. A comunicação entre os dispositivos do processo com o computador ocorre pelo protocolo Modbus via a interface Ethernet (eth0) a 100 Mbps.

4.7 ROBREALM

O programa computacional Roboreal® é executado no computador e foi adquirido pois possui as ferramentas de aquisição, processamento da cadeia de imagens e o protocolo de comunicação eXtensible Markup Language (XML, 2016).

A aquisição das imagens é executada pela câmera que é configurada e controlada via mensagens emitidas a partir do Roborealml por meio da interface USB (2017) do computador.

As mensagens XML (2016) são enviadas pelo programa Lupa para o Roborealml que as executa. Após o processamento das mensagens é enviado uma resposta para o Lupa. As mensagens XML são transmitidas e recebidas por meio do conjunto de protocolos TCP (*Transmission Control Protocol*) e IP (*Internet Protocol*) sobre a interface Ethernet (2018) do computador.

As cadeias de processamento das imagens digitais que foram capturadas foram desenvolvidas por meio da interface gráfica disponível no Roborealml. A seguir são explicadas as cadeias de processamento de imagens de aquisição, seleção e medição que foram desenvolvidas no Roborealml.

4.8 QT

O programa Lupa foi desenvolvido em C++ sobre a plataforma de desenvolvimento Qt (Blanchette; Summerfield, 2008) que é capaz de criar aplicações com interface gráfica de usuário para diversos sistemas operacionais como Linux, Windows, MacOS e Android. Com o conceito de “programe uma vez, execute em qualquer lugar”, a aplicação pode ser proprietária ou de código aberto conforme a licença utilizada. Este trabalho desenvolveu o programa computacional Lupa em código aberto que pode ser compilado para Linux, MacOS ou Windows com a versão Qt 5.8.

4.9 SQLITE

O gerenciador de base de dados utilizado SQLite 3 (2017) foi utilizado para armazenar os quatro valores de medição de desgaste. Os valores são armazenados na base de dados por mensagens que contém comandos no protocolo SQL. As mensagens contém os valores de desgaste assim como a data, hora, minuto e segundo da captura das imagens.

O SQLite 3.0 está embutido na instalação do Qt (2017).

4.10 CADEIAS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS

As cadeias de processamento de imagens de aquisição, de seleção da melhor imagem e de medição dos desgastes foram desenvolvidas no programa Roboreal.

A sequência do processamento das cadeias é mostrado no fluxograma da figura 31.

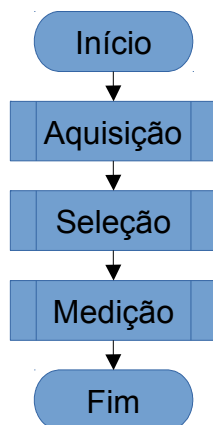


Figura 31 – Fluxograma das cadeias de processamento de imagens

4.10.1 CADEIA DE AQUISIÇÃO

A cadeia de aquisição da imagem armazena as imagens no computador para processamento posterior do histórico como é mostrado na figura 32.

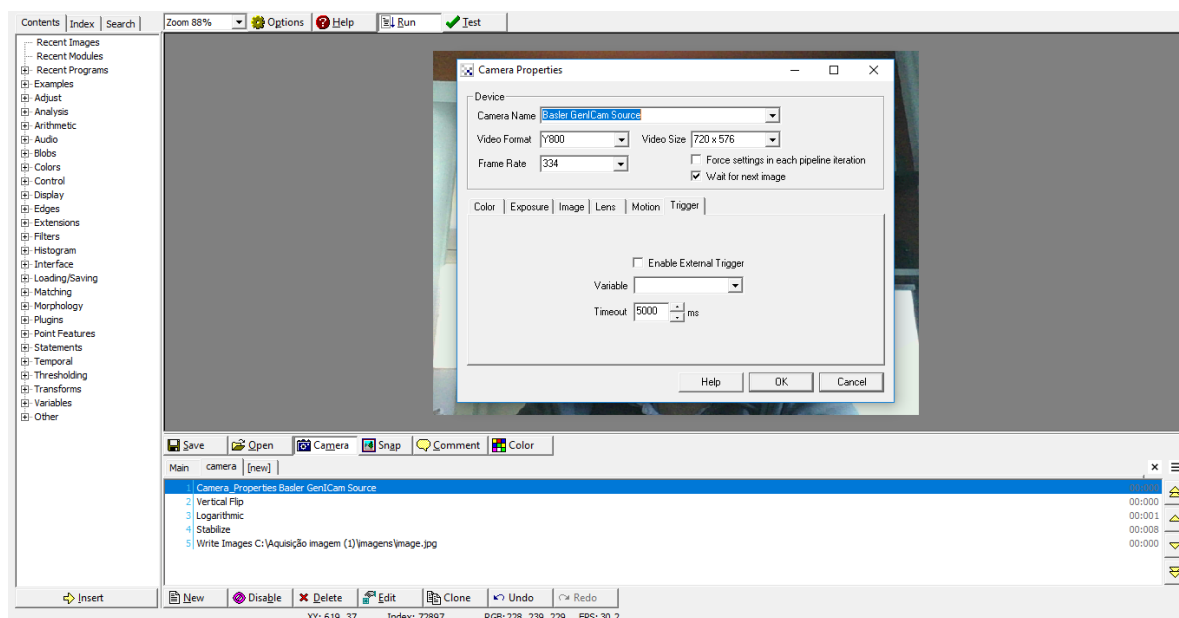


Figura 32 – Cadeia de processamento de aquisição de imagens

A sequência dos módulos que compõem o algoritmo desenvolvido no Roborealm é mostrado na figura 33.

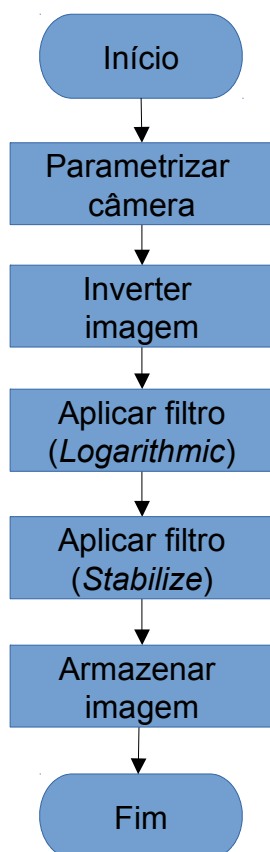


Figura 33 – Fluxograma da cadeia de aquisição de imagens

A cadeia de aquisição é iniciada por um comando para configuração da câmera a ser utilizada que define o nome da câmera instalada (Basler GeniCam), o formato do vídeo, o tamanho do vídeo e a taxa de aquisição (máximo de 334 quadros por segundo).

A seguir é executado um comando para girar a imagem capturada em 180°, pois a câmera fornece uma imagem invertida. Depois é executado o realce da imagem pelo filtro de transformação de intensidade logarítmica. Este filtro foi escolhido porque ele ressaltou a região de desgaste com a melhor qualidade entre as opções testadas e disponíveis no Roborealm. Um comando para a estabilização da imagem é utilizado para diminuir borrões que aparecem decorrentes do movimento de rotação da ferramenta.

O comando “*write images*” salva a imagem capturada pela câmera em uma pasta. As imagens da ferramenta em rotação são capturadas e armazenadas para

posterior processamento ao final da execução da cadeia de processamento de aquisição que durou 10 s. Uma amostra da sequência de imagens capturadas pela cadeia de aquisição é mostrada na figura 34.



Figura 34 – Imagens capturadas na cadeia de processamento de aquisição

4.10.2 CADEIA DE SELEÇÃO

A cadeia de processamento de seleção é executada para selecionar a melhor imagem. O algoritmo compara as imagens capturadas com uma imagem padrão e seleciona aquela que é a mais similar com o padrão. A melhor imagem em termos de similaridade será utilizada para a medição do desgaste do inserto. A sequência da cadeia de seleção é mostrada na figura 35.

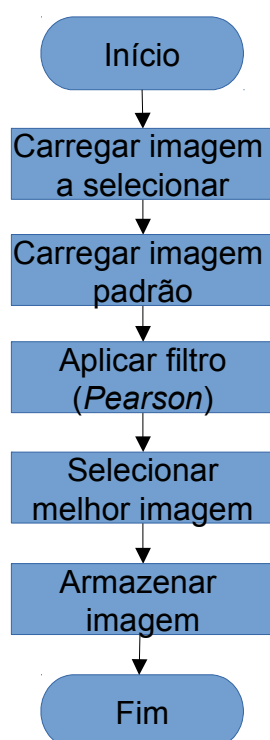


Figura 35 – Fluxograma da cadeia de seleção da melhor imagem

O algoritmo é baseado em uma técnica estatística que utiliza o coeficiente de correlação de Pearson (r) como parâmetro para estabelecer a similaridade entre duas imagens.

O coeficiente de correlação r recebe o valor 1 se o objeto não sofrer alteração ou recebe um valor menor que 1 se ocorrer algum movimento ou alteração.

A cadeia de processamento de seleção desenvolvido para a escolha da melhor imagem utilizado para a medição é mostrado na Figura 36.

A cadeia de processamento de seleção inicia a leitura das imagens capturadas pela câmera por meio do comando “Load Image” que recebe o parâmetro de endereço da pasta utilizada na cadeia de aquisição.

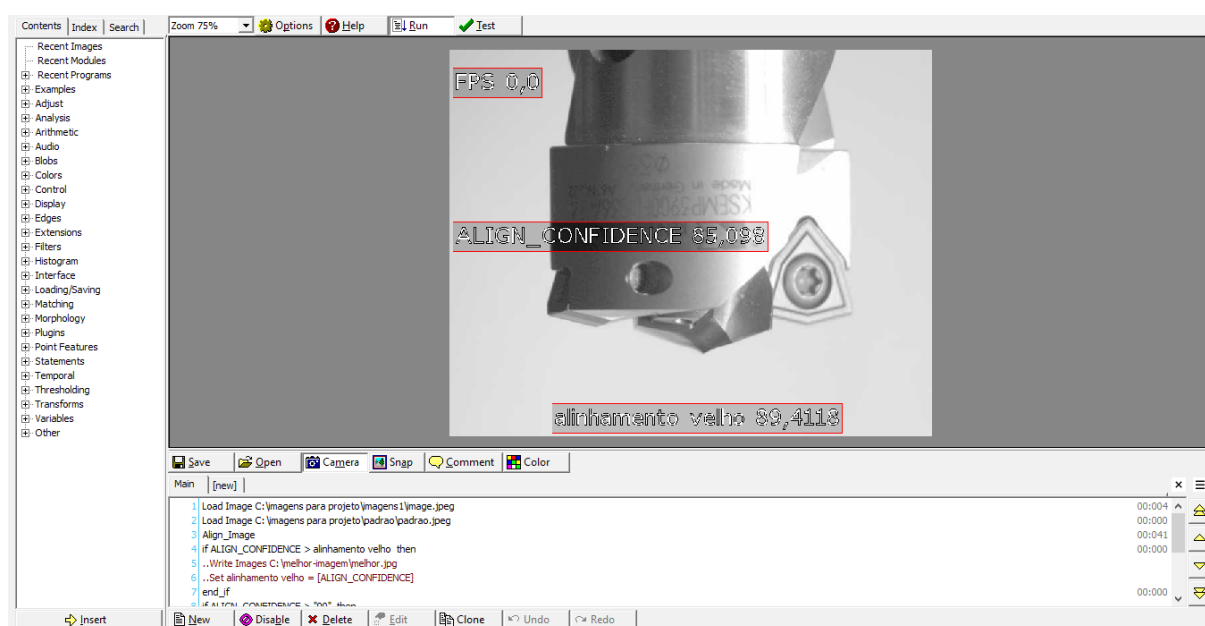


Figura 36 – Cadeia de seleção da melhor imagem

O programa carrega a sequência de imagens resultantes do movimento rotacional da ferramenta e inicia a seleção das melhores imagens para a medição das arestas frontais e de flanco dos insertos laterais da broca pela comparação com as imagens padrão. As imagens padrões utilizadas na cadeia de processamento de seleção são mostradas na figura 37.

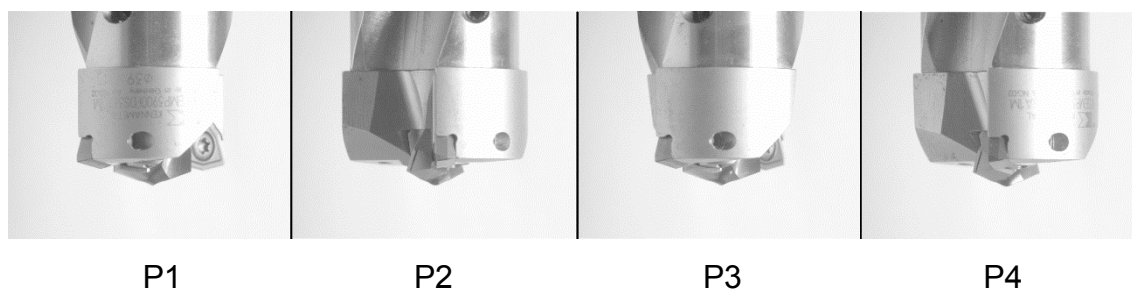


Figura 37 – Imagens padrão da cadeia de seleção

A cadeia de processamento carrega a sequência de imagens com a ferramenta em rotação e as compara com as imagens padrão por meio do algoritmo de correlação do coeficiente de Pearson (r). Uma sequência de imagens em processamento para a seleção da melhor imagem é mostrada na figura 38. A imagem padrão para a identificação da aresta do inserto central (A) é comparada com a sequência de imagens capturadas (B) e resulta na seleção da melhor imagem em comparação com a imagem padrão (C).

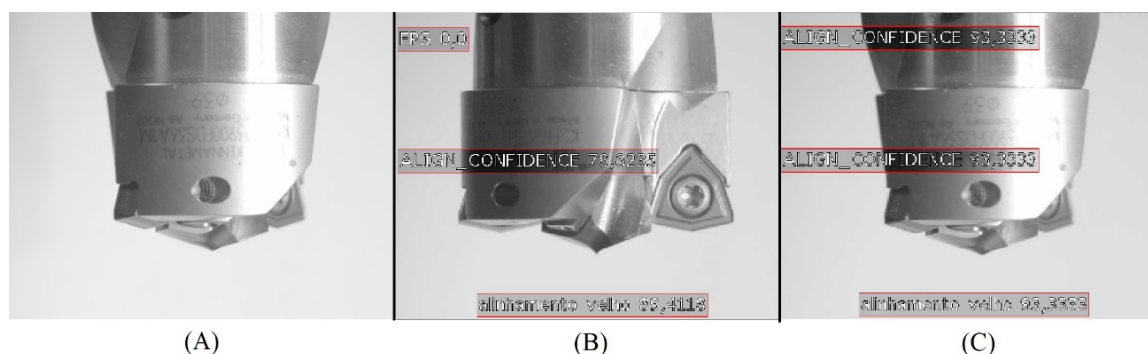


Figura 38 – Imagens em processamento para seleção da melhor imagem

Cada imagem da sequência é carregada durante o processamento e comparada com a imagem padrão. O algoritmo calcula o coeficiente de correlação de Pearson r e mostra na tela o valor da variável “Align_Confidence” calculada. O valor calculado atual é armazenado e utilizado na comparação da imagem capturada seguinte. Se o valor atual é maior que o anterior, o valor atual é armazenado e sobrescreve o anterior. Este laço se repete até que todas as imagens da sequência de captura tenham sido comparadas com a imagem padrão.

A imagem com o coeficiente de Pearson mais próximo de 1 é selecionada como a melhor e salva em uma pasta para estar disponível para a cadeia de processamento de medição. Note porém que a interface do Roborealm® mostra o

coeficiente variando de 0 % a 100 %.

A validação do algoritmo foi executada abrindo-se as duas imagens relacionadas ao desgaste na tela do computador. Depois, elas foram comparadas uma com a outra a olho nu. Este procedimento foi realizado para cada um dos quatro desgastes.

4.10.3 CADEIA DE MEDIÇÃO

A partir da seleção das melhores imagens, a cadeia de medição é executada sobre as quatro regiões de interesse nos três insertos. A sequência da cadeia de medição é mostrada na figura 39.

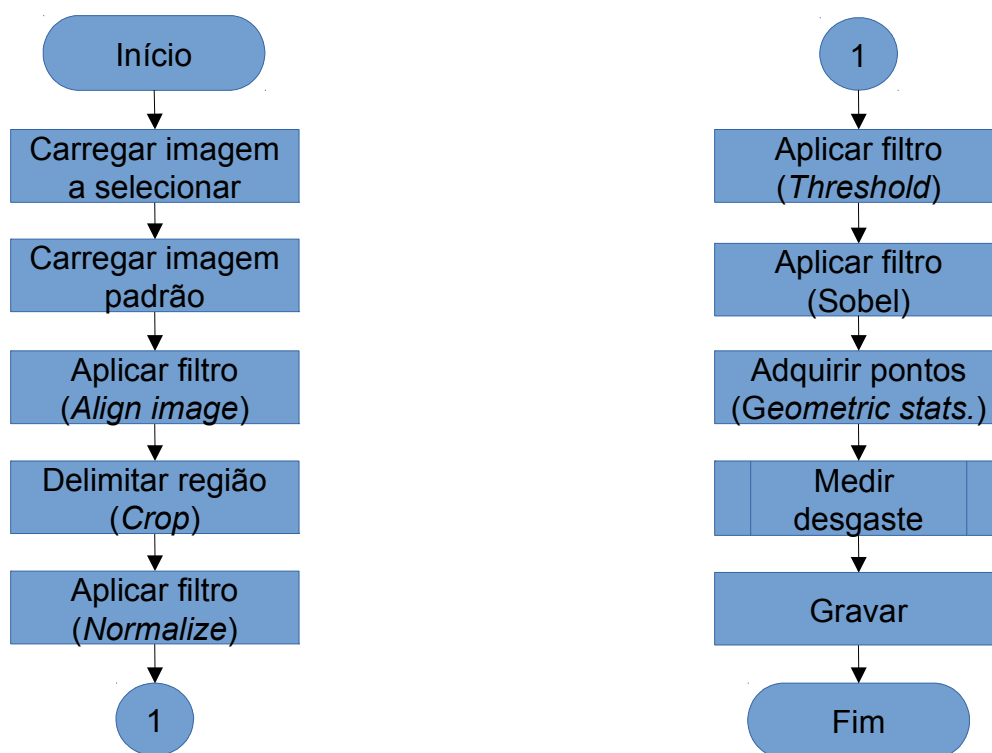


Figura 39 – Fluxograma da cadeia de medição de desgaste

Os algoritmos são diferentes para a medição do desgaste de flanco e frontal como é mostrado a seguir.

4.10.3.1 DESGASTE DE FLANCO

O desgaste de flanco foi medido nos insertos laterais 1 e 2 que se referem

respetivamente às imagens padrões P2 e P4. A cadeia de medição de desgaste de flanco do inserto lateral 1 (P2) sendo executada é mostrada na figura 40.

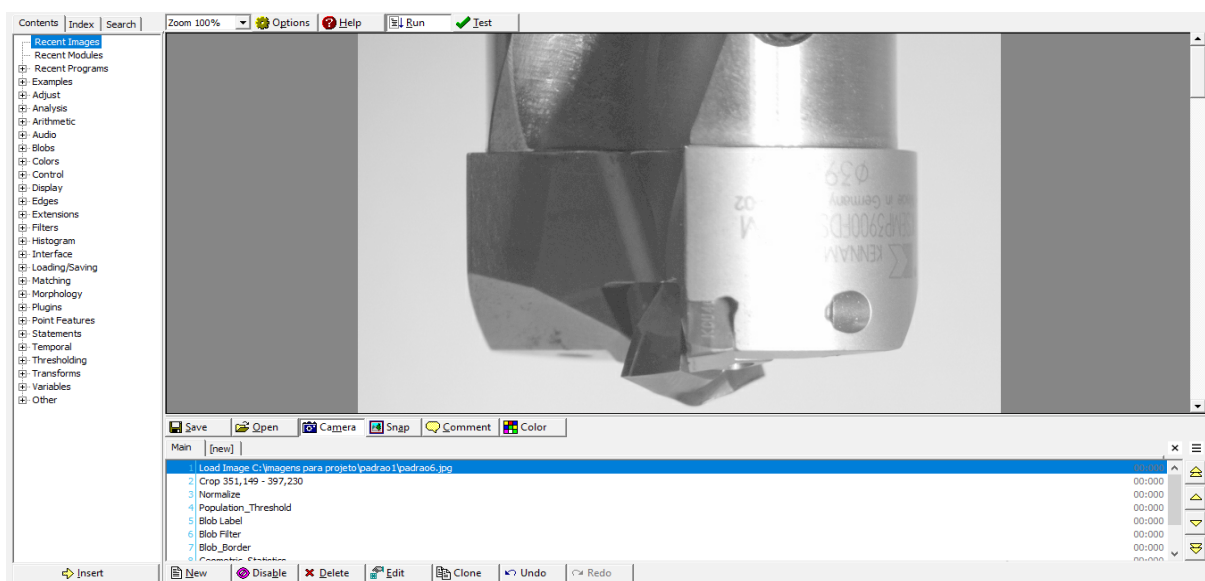


Figura 40 – Medição do desgaste de flanco do inserto externo 1 (P2)

A cadeia de medição recorta a região de desgaste de interesse. O recorte de um inserto após a usinagem de 80 furos é mostrada na figura 41.



Figura 41 – Região de desgaste de flanco do inserto lateral 1 (P2)

Um filtro de realce é então aplicado para destacar o desgaste em relação ao fundo da imagem. A técnica de normalização de histograma dos níveis de cinza melhora o contraste da imagem como é mostrado na figura 42.

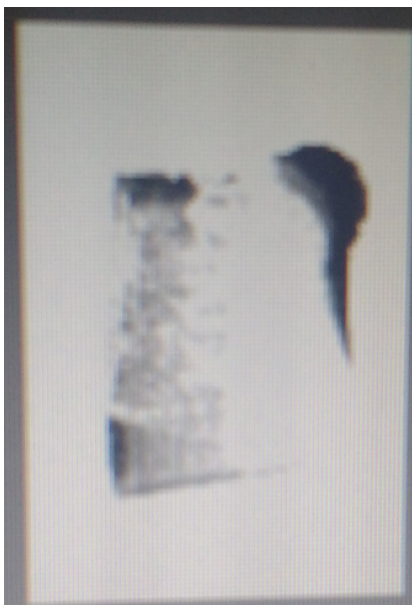


Figura 42 – Região de desgaste de flanco do inserto lateral 1 (P2) normalizada

A separação da região de desgaste das outras regiões foi necessária e para tanto foi aplicada a limiarização populacional. Um filtro de borrão foi então aplicado e resultou no isolamento da região de desgaste da ferramenta como mostrado na figura 43.

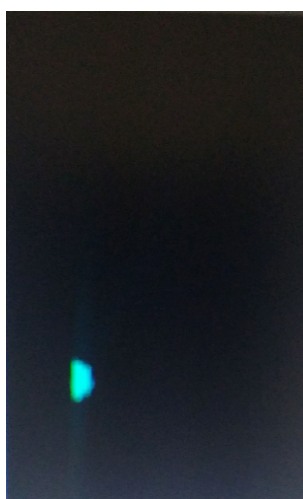
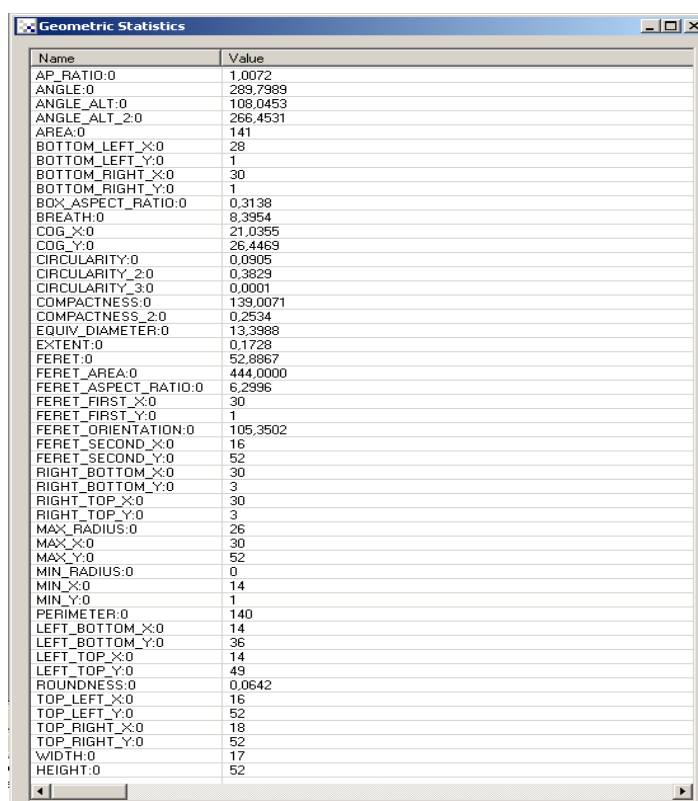


Figura 43 – Região de desgaste de flanco do inserto externo 1 (P2) isolada

A cadeia de processamento calcula valores de dados geométricos da região desgastada como mostrado na figura 44.



Name	Value
AP_RATIO:0	1,0072
ANGLE:0	289,7989
ANGLE_ALT:0	108,0453
ANGLE_ALT_2:0	266,4531
AREA:0	141
BOTTOM_LEFT_X:0	28
BOTTOM_LEFT_Y:0	1
BOTTOM_RIGHT_X:0	30
BOTTOM_RIGHT_Y:0	1
BOX_ASPECT_RATIO:0	0,3138
BREATH:0	8,3954
COG_X:0	21,0355
COG_Y:0	26,4469
CIRCULARITY:0	0,0905
CIRCULARITY_2:0	0,3829
CIRCULARITY_3:0	0,0001
COMPACTNESS:0	139,0071
COMPACTNESS_2:0	0,2534
EQUIV_DIAMETER:0	13,3988
EXTENT:0	0,1728
FERET:0	52,8867
FERET_AREA:0	444,0000
FERET_ASPECT_RATIO:0	6,2996
FERET_FIRST_X:0	30
FERET_FIRST_Y:0	1
FERET_ORIENTATION:0	105,3502
FERET_SECOND_X:0	16
FERET_SECOND_Y:0	52
RIGHT_BOTTOM_X:0	30
RIGHT_BOTTOM_Y:0	3
RIGHT_TOP_X:0	30
RIGHT_TOP_Y:0	3
MAX_RADIUS:0	26
MAX_X:0	30
MAX_Y:0	52
MIN_RADIUS:0	0
MIN_X:0	14
MIN_Y:0	1
PERIMETER:0	140
LEFT_BOTTOM_X:0	14
LEFT_BOTTOM_Y:0	36
LEFT_TOP_X:0	14
LEFT_TOP_Y:0	49
ROUNDNESS:0	0,0642
TOP_LEFT_X:0	16
TOP_LEFT_Y:0	52
TOP_RIGHT_X:0	18
TOP_RIGHT_Y:0	52
WIDTH:0	17
HEIGHT:0	52

Figura 44 – Dados geométricos do desgaste de flanco do inserto lateral 1 (P2)

A validação dos experimentos foi levado a cabo pela comparação das medidas de referência realizadas com microscópio com aquelas obtidas pelas cadeias de processamento de imagens.

O desgaste de flanco dos insertos laterais 2 (P4) foram medidos pela mesma metodologia aplicada para os insertos do tipo P2.

Um programa computacional desenvolvido em linguagem C (CScript) processa os dados geométricos e calcula, em milímetros, o tamanho do desgaste da ferramenta. O programa sendo executado é mostrado na figura 45.

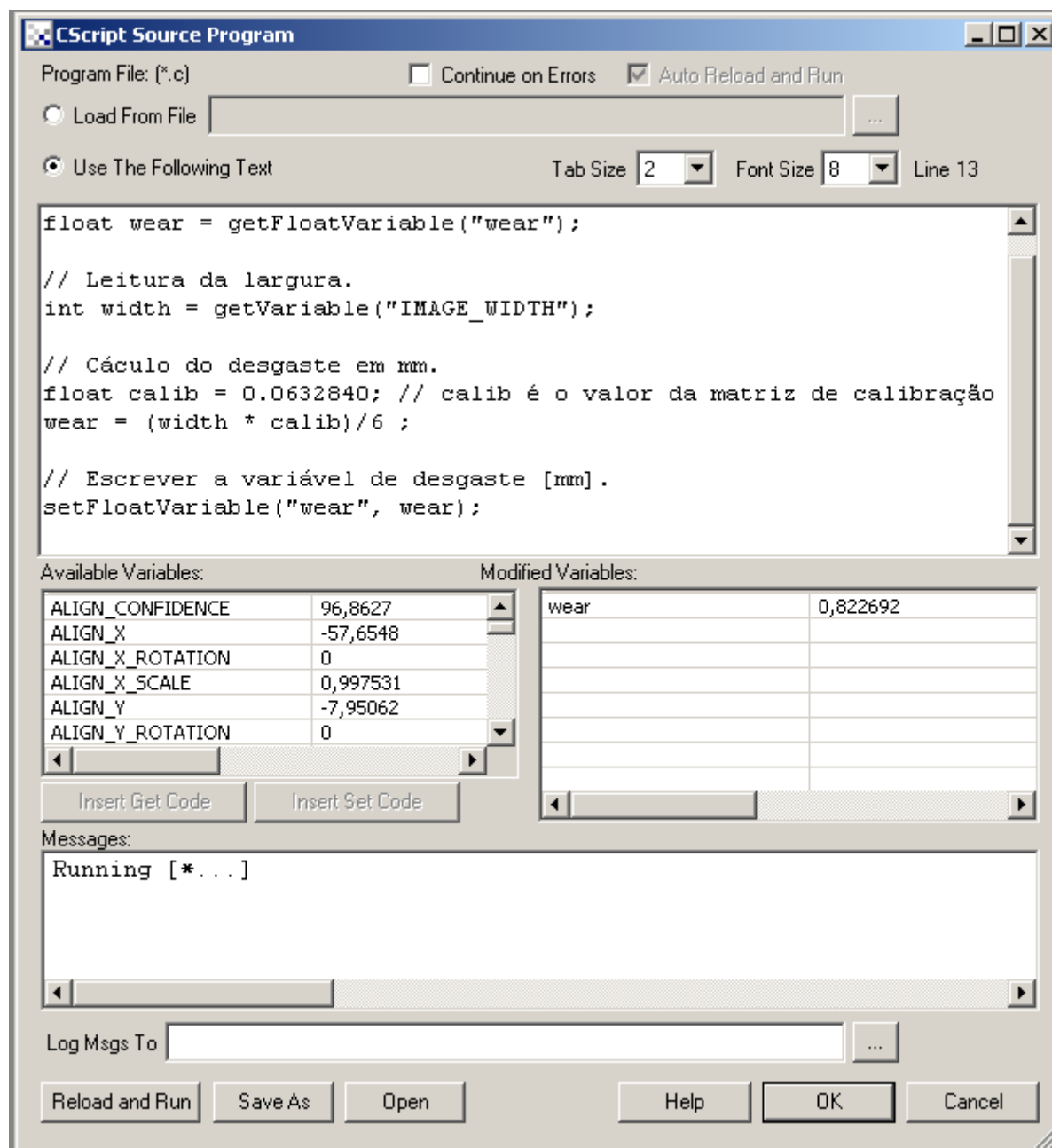


Figura 45 – Cálculo do desgaste de flanco do inserto lateral 1

4.10.3.2 DESGASTE FRONTAL

A medição do desgaste frontal dos insertos centrais foi realizado para os lados 1 e 2 que se referem respectivamente às imagens padrões P1 e P3. A metodologia de medição para o desgaste frontal é a mesma aplicada ao desgaste frontal mas acrescentado-se um filtro de sobel para o realce da área desgastada. O desgaste causado pela usinagem de 90 furos é mostrado no detalhe da figura 46.

4.11 LUPA – PROGRAMA DE AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO

O programa computacional criado para prover a automatização do processo, monitoração e controle do processo de medição de desgaste foi denominado Lupa. Ele comanda o módulo DI/DO, a sequência do processo de medição e o gerenciador de banco de dados SQL 3. Além disso, disponibiliza a interface gráfica do usuário para monitoramento e comando do processo. A sequência dos estados do ciclo automático do processo é mostrada na figura 48.

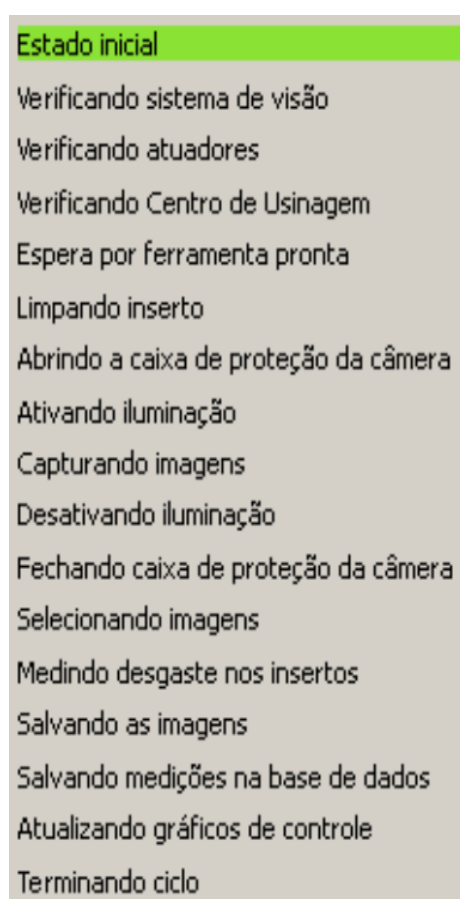


Figura 48 – Sequência do ciclo automático do processo

Os objetivos específicos foram analisados como requisitos do usuário (Sommerville, 2011) e definiram as funcionalidades do programa. O programa não interfere no processo de furação e sua tela principal é mostrada na figura 49.

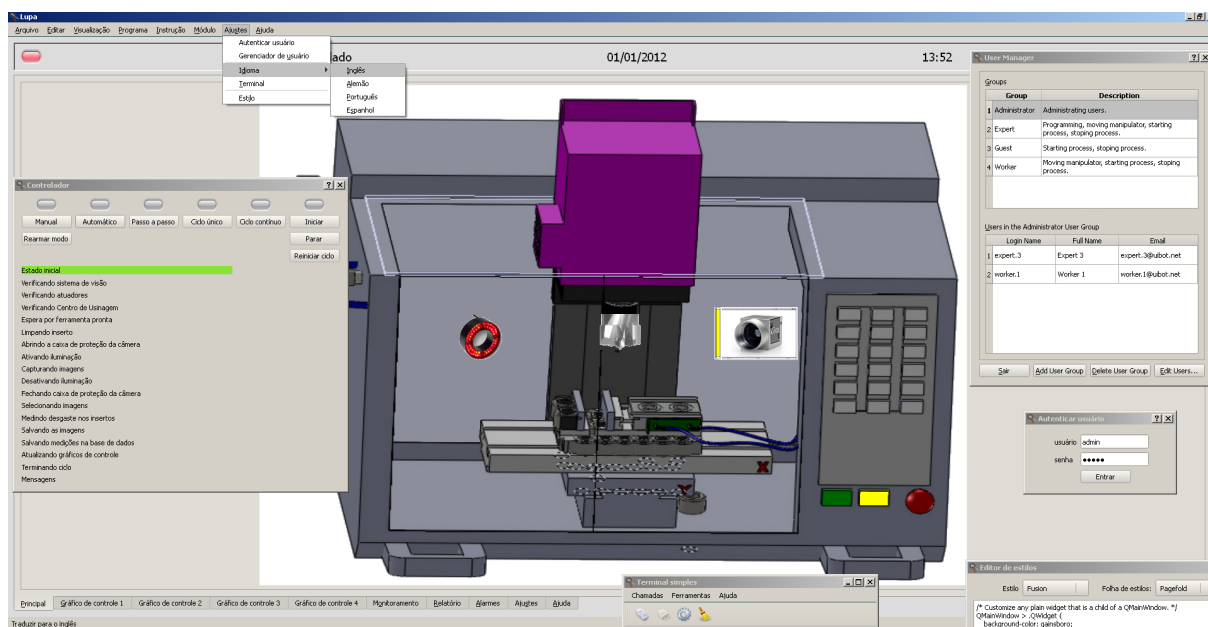


Figura 49 – Tela principal

A comunicação entre o módulo DI/DO e Lupa ocorre via o protocolo Modbus sobre o protocolo TCP/IP. A interface Ethernet (eth0) do computador é ligada à respectiva interface do módulo DI/DO. O código do programa que inicia a comunicação Modbus entre o Controlador do Lupa e o módulo DI/DO é mostrado a seguir:

```
// Create device.
device = new QModbusTcpClient(this);
setModbusIp( m_modbusIp);
setModbusPort( m_modbusPort->toInt() );
setModbusSlaveId( m_modbusSlaveId );
connectToModbus();
connect(device, &QModbusClient::errorOccurred, [this]
QModbusDevice::Error);
```

O Lupa requisita a leitura e escrita de dados do processo do módulo DI/DO após a comunicação ter sido estabelecida. O código do programa que envia o comando de abertura da caixa de proteção da câmera é mostrado a seguir:

```
if( actuatorsStates == ActuatorsStates::TURNINGLIGHTSON )
{
    value2YP1 = 0; // =1, open camera box.
    value2YP2 = 0; // =1, close camera box.
    value2YP3 = 0; // =1, blow air for cleaning tool;=0,
close.
    value2K1 = 1; // =1, turn lights on;=0, off.
```

```

    processFinished = true;
}

```

As cadeias de processamento de imagens desenvolvidas no Roboreal[®] são comandadas pelo Lupa por meio de mensagens XML. O ambiente de desenvolvimento e uma amostra do código é mostrado na figura 50.

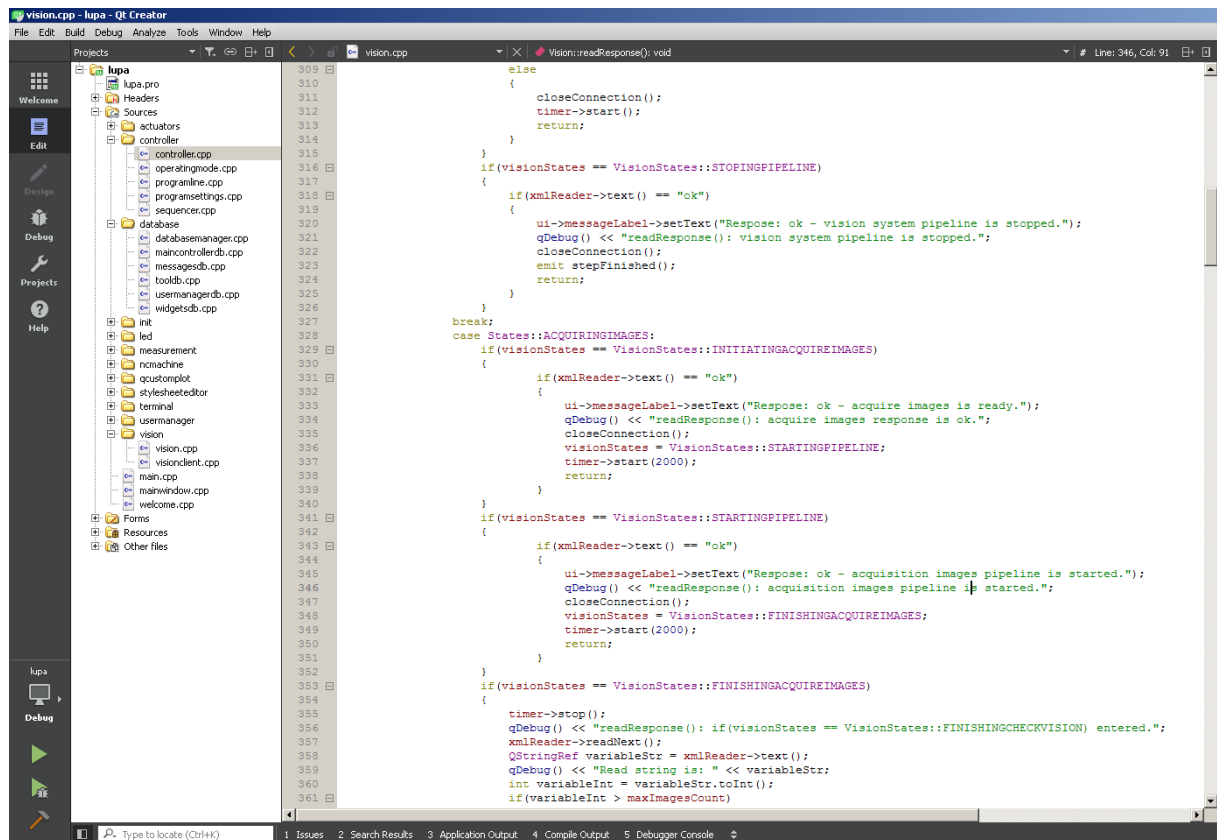


Figura 50 – Código do programa Lupa

A comunicação entre o programa Lupa e o Roboreal é estabelecida via mensagens XML sobre o protocolo TCP/IP. As mensagens requisitam a execução e o estado das cadeias de processamento do Roboreal. O código do programa que inicia a comunicação entre o Controlador do Lupa e o Roboreal é mostrado a seguir:

```

ui->setupUi(this);
states = States::NONE;
VisionStates visionStates;
tcpSocket = new QTcpSocket;
xmlWriter = new QXmlStreamWriter;
xmlReader = new QXmlStreamReader;

```



```

timer = new QTimer(this);
connect( timer, SIGNAL(timeout()), this,
SLOT(connectToRoborealmServer()) );

```

O controlador do Lupa requisita a execução das cadeias de processamento de imagens desenvolvidas no Roborealm e espera a confirmação de sucesso antes de realizar outro passo da sequência do processo automatizado. O código do programa que envia a mensagem XML para a leitura dos quatro valores de desgaste é mostrado a seguir:

```

xmlReader->readNext();
xmlReader->readNext();
xmlReader->readNext();
wear      = xmlReader->text();
vb[i]     = wear.toString();

QDebug() << "Vision::readResponse(): measure wear vb1 string
value is " << vb[0];

```

O controlador do Lupa requisita ao SQLite a gravação dos quatro valores medidos pela cadeia de processamento do Roborealm. A leitura ocorre para a atualização dos gráficos de controle e para gerar os relatórios de medição. O código do programa Lupa que envia a requisição de transação para a gravação dos valores de medição é mostrado a seguir:

```

vb[i] = vb[i].replace(',', '.');
query.prepare("INSERT INTO measurement (date, time, vb, image,
insertfeatureid, note)
VALUES(:date, :time, :vb, :image,
:insertfeatureid, :note)");
QDebug() << "Vision::readResponse() - query.exec()
returned" << query.lastError() << "for inserting into table
measurement.";
query.bindValue(":date", currentDate);
QDebug() << "Vision::readResponse() - query.exec()
returned" << query.lastError() << "for inserting into table
measurement.";
query.bindValue(":time", currentTime);
QDebug() << "Vision::readResponse() - query.exec()
returned" << query.lastError() << "for inserting into table
measurement.";
QDebug() << "Vision::readResponse() - VB value of insert "
% QString::number(i+1) % " is " % vb[i];
query.bindValue(":vb", vb[i]);

```

```

image    =    "img" % QDateTime % QString::number(i + 1)
% ".jpg";
query.bindValue(":image",          image);
query.bindValue(":insertfeatureid", QString::number(i + 1));
query.bindValue(":note",          "Ok");
queryIsOK    = query.exec();

```

4.11.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO AUTOMATIZADA

O procedimento para a colocação em funcionamento da medição automatizada é iniciado e terminado pelo usuário. A sequência dos passos do processo de medição automatizada é mostrada na figura 51.

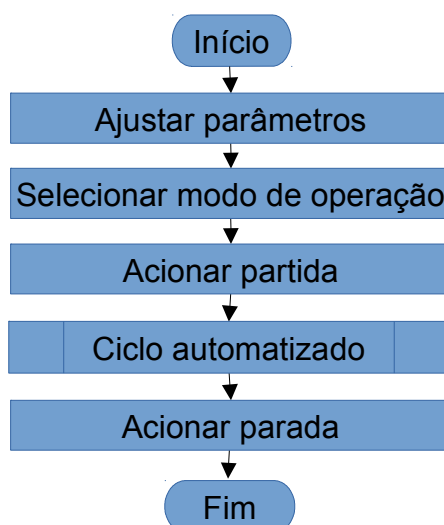


Figura 51 – Sequência de operações da medição automatizada

O usuário primeiramente modifica os parâmetros do processo na tela de ajustes tais como os limites dos quatro gráficos de controle de desgaste, o tempo de sopro do ar comprimido de limpeza e os endereços dos escravos da rede Modbus. A tela de ajustes é mostrada na figura 52.

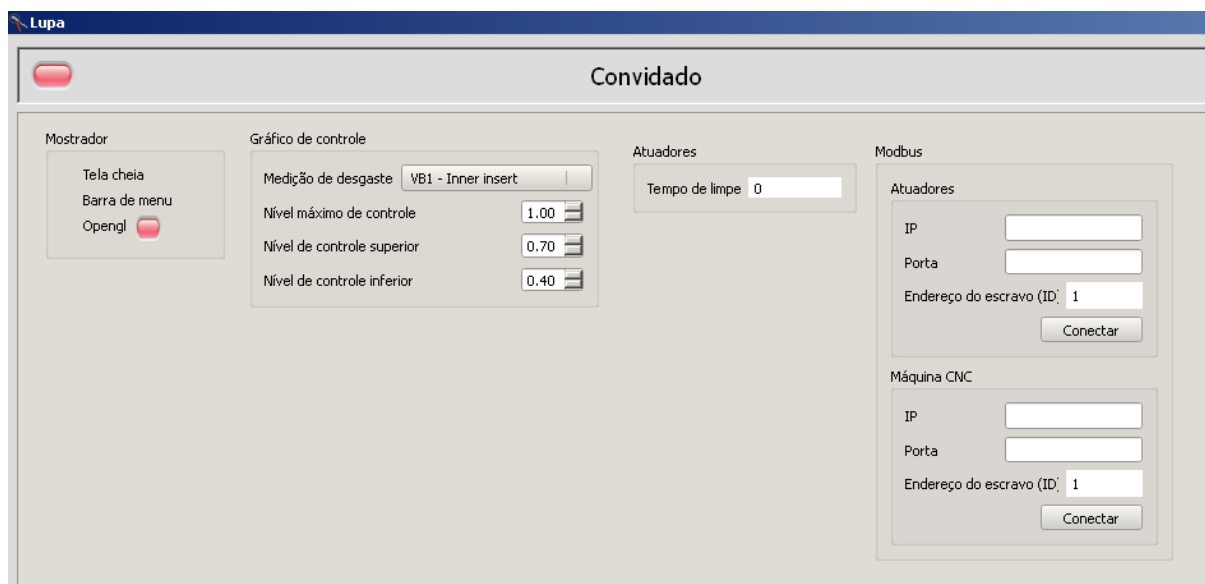


Figura 52 – Tela de ajustes

A seguir, o processo automatizado de medição é iniciado pelo usuário pela tela de controlador que é mostrado na figura 53.

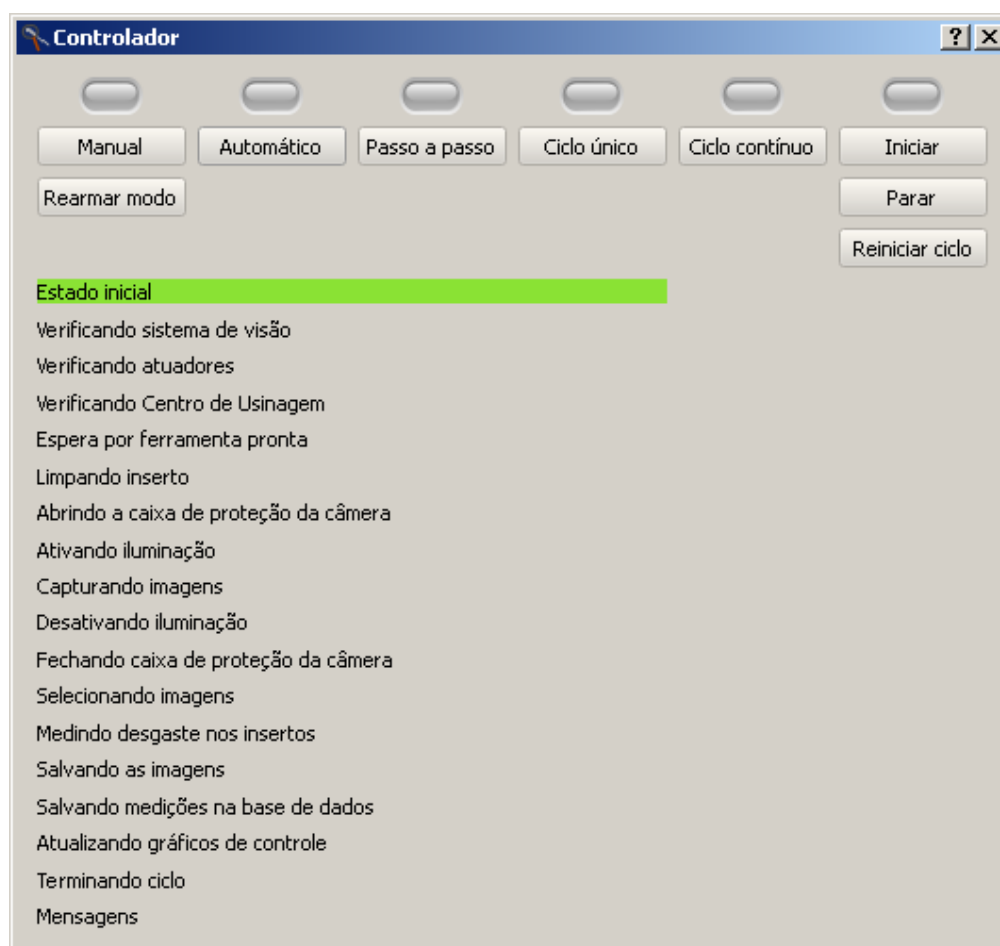


Figura 53 – Tela do Controlador com seus passos automatizados

O usuário seleciona um modo de operação e aciona o botão “iniciar”. O acionamento do botão “parar” interrompe o processo.

O ciclo automatizado é monitorado pela tela do controlador. O estado corrente processo aparece destacado em verde. A sequência executada é: verificar sistema de visão, verificar atuadores, abrir a porta de proteção da câmera, ligar a iluminação, iniciar aquisição de imagens, desligar a iluminação, selecionar a melhor imagem, medir o desgaste, fechar a porta de proteção, salvar as imagens medidas, armazenar dados de medição e atualizar gráfico de controle.

A sequência de funcionamento pode ser acompanhada no painel do controlador que é iniciado quando o sistema de visão estiver pronto, ou seja, o Roboreal[®] confirma por meio de uma mensagem XML que a câmera está pronta. A seguir são verificados os sinais dos sensores da porta de proteção da câmera e do CNC respectivamente.

A linha “Espera por ferramenta pronta” é ativada e a válvula de ar comprimido é aberta para a limpeza do inserto após a ferramenta estacionar.

Após o tempo definido na tela de ajustes, o ar comprimido de limpeza é fechado e a caixa de proteção da câmera recebe o comando de abertura. Quando os sensores da caixa confirmarem a abertura, a iluminação será ativada

A seguir, a cadeia de aquisição é executada.

A iluminação é então desativada e o comando de fechar a caixa de proteção é enviado. Quando os sensores da caixa confirmarem o fechamento, a cadeia de seleção será executada.

Depois da cadeia de seleção armazenar as melhores imagens nas respectivas pastas, a cadeia de medição será executada.

As imagens são então armazenadas em pastas enquanto os valores de desgaste medidos são armazenados na base de dados.

Os valores de desgaste podem ser monitorados nas telas dos gráficos de controle.

Os relatórios de medição podem ser visualizados na respectiva tela e, opcionalmente, podem ser exportados no formato PDF (*Portable Document Format*) ou CSV (*Comma-Separated Value*).

Caso o modo em ciclo contínuo tenha sido selecionado, o processo de medição continuará até o botão “parar” ser acionado.

5 RESULTADOS

Os resultados das medições manuais e automatizadas são mostrados neste capítulo. Os resultados da aplicação manual das cadeias de processamento de aquisição e seleção são mostrados na Tabela 7.

Furos usinados	<i>r</i>				Número de imagens	Resultado
	1	2	3	4		
0	0,988	0,984	0,983	0,985	2312	Certo
10	0,975	0,972	0,967	0,968	3239	Falhou
20	0,938	0,941	0,937	0,932	3020	Certo
30	0,937	0,941	0,938	0,932	2602	Certo
40	0,943	0,947	0,937	0,933	2939	Certo
50	0,941	0,945	0,945	0,947	2992	Certo
60	0,953	0,967	0,968	0,958	2989	Certo
70	0,981	0,972	0,968	0,976	2674	Certo
80	0,973	0,972	0,983	0,972	2139	Certo
90	0,98	0,976	0,976	0,979	4142	Certo

Tabela 7 – Resultados da aplicação das cadeias de aquisição e seleção

O campo “Furos usinados” da Tabela 7 é a quantidade de operações executadas durante o processo de furação no centro de usinagem do inserto avaliado. O campo *r*, são os valores adimensionais de correlação de Pearson mais próximos de 1. Eles foram obtidos com as imagens dos insertos respectivos às imagens padrões “P1”, “P2”, “P3” e “P4”. O campo número de imagens, é a quantidade de imagens capturadas pela câmera durante a rotação da broca.

O campo Resultado, mostra o acerto ou falha do algoritmo para encontrar a imagem melhor correlacionada entre as amostras e a sua respectiva imagem padrão. Houve um erro na seleção da melhor imagem no registro do inserto de 10 furos atribuída à dificuldade de posicionar a luz para a obtenção de nitidez.

Os resultados da cadeia de medição e do microscópio são mostrados na tabela 8. O campo “Furos” se refere à quantidade de furos usinadas pelo inserto até a sua retirada e envio ao laboratório para medição. “Cadeia” se refere ao resultado da medição via a cadeia de processamento de imagens. “Microscópio” é o resultado da medição de referência. “Erro” é o erro percentual de medição entre o valor medido pela cadeia de processamento de imagens e o valor de referência.

O desgaste dos insertos que usinaram dez e vinte furos não foram suficientemente altos para serem identificados pela cadeia de medição e portanto, os seus valores não aparecem na tabela 8.

Furos	Cadeia [mm]	Microscópio [mm]	Erro [%]
90	0,65565	0,66528	1,44751
80	0,50995	0,58550	12,9035
70	0,29140	0,29587	1,51080
60	0,21855	0,23608	7,42545
50	0,29140	0,29587	1,51080
40	0,21855	0,22800	4,14474
30	0,14570	0,16357	10,9250
20	-	-	-
10	-	-	-
Erro Médio [%]			5,69540
Desvio padrão [%]			4,79182

Tabela 8 – Medição do desgaste de flanco dos insertos laterais 1 (P2)

O valor do erro médio foi de 5,70 % com um desvio padrão de 4,80 %. A relação entre o desgaste e a quantidade de furos é mostrado no gráfico da figura 54.

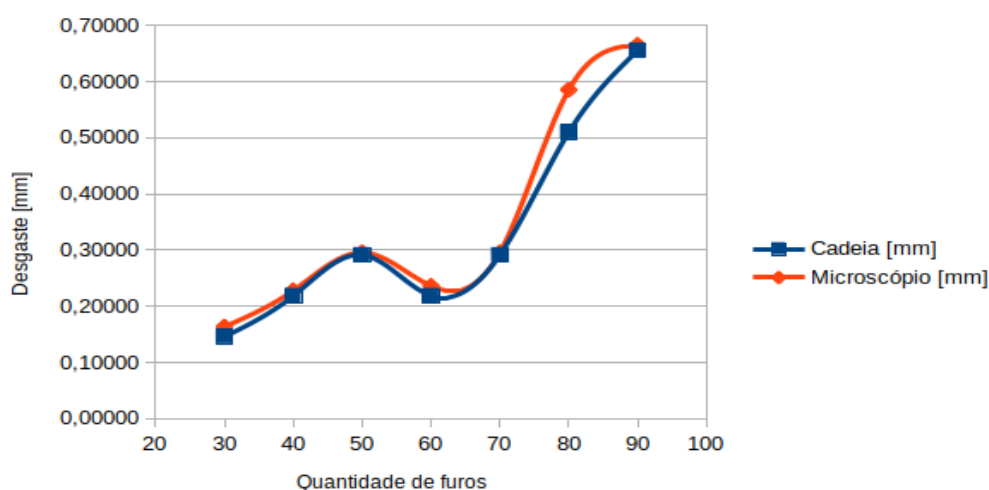


Figura 54 – Medição de desgaste de flanco dos insertos laterais 1 (P2)

O erro médio foi calculado sem os valores referentes ao desgaste causado por 10 e 20 furos pois estes foram baixos demais para serem detectados. Por isto,

recomenda-se que a medição na fábrica ocorra a partir de 30 furos. O processamento da cadeia de medição do desgaste frontal para dos insertos utilizados nos experimentos são mostrados no apêndice B.

O resultado das medições do desgaste de flanco dos insertos laterais 2 (P4) usou a mesma metodologia aplicada sobre os insertos laterais 1 (P1). O resultado é mostrado na tabela 9.

Furos	Cadeia [mm]
90	0,72850
80	0,65565
70	0,50995
60	0,43710
50	0,36425
40	0,21855
30	0,14570
20	-
10	-

Tabela 9 – Medição do desgaste de insertos laterais 2 (P4)

A relação entre a quantidade de furos e o desgaste dos insertos laterais 2 (P4) é mostrado no gráfico da figura 55.

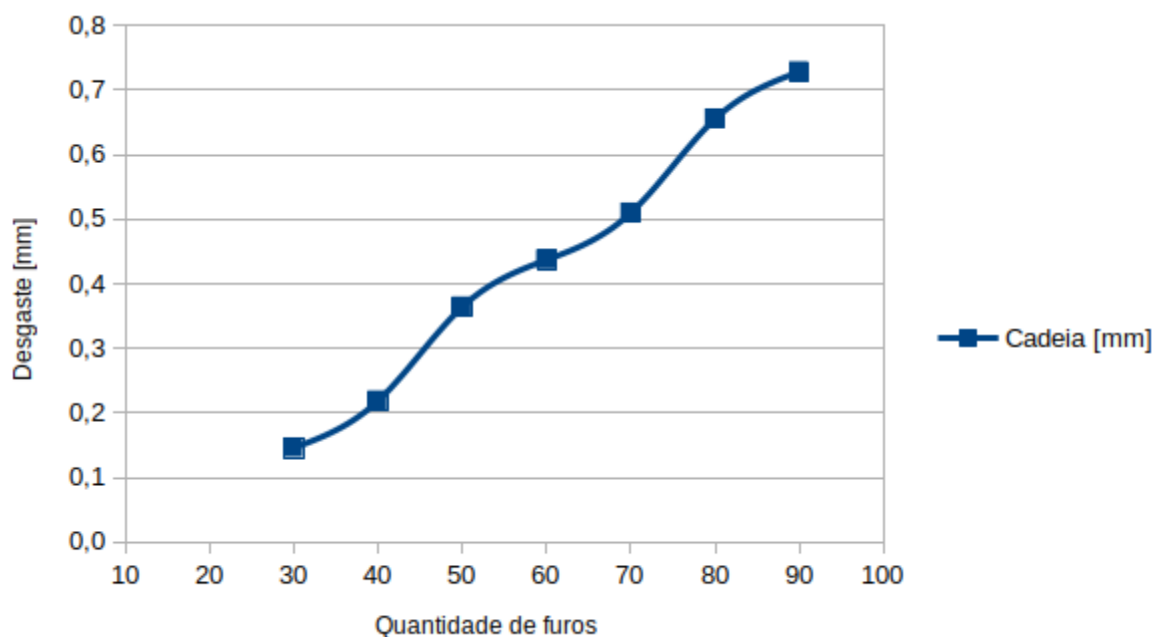


Figura 55 – Medição de desgaste de flanco dos insertos laterais 2 (P4)

O resultado da cadeia de medição de desgaste frontal do lado 1 do inserto central (P1) é mostrado na tabela 10.

Furos	Cadeia [mm]
90	0,375641
80	0,441245
70	0,465029
60	0,337567
50	0,321891
40	0,186581
30	0,106738
20	-
10	-

Tabela 10 – Medição do desgaste frontal dos insertos centrais do lado 1 (P1)

O gráfico que relaciona a quantidade de furos com o desgaste é mostrado na figura 56.

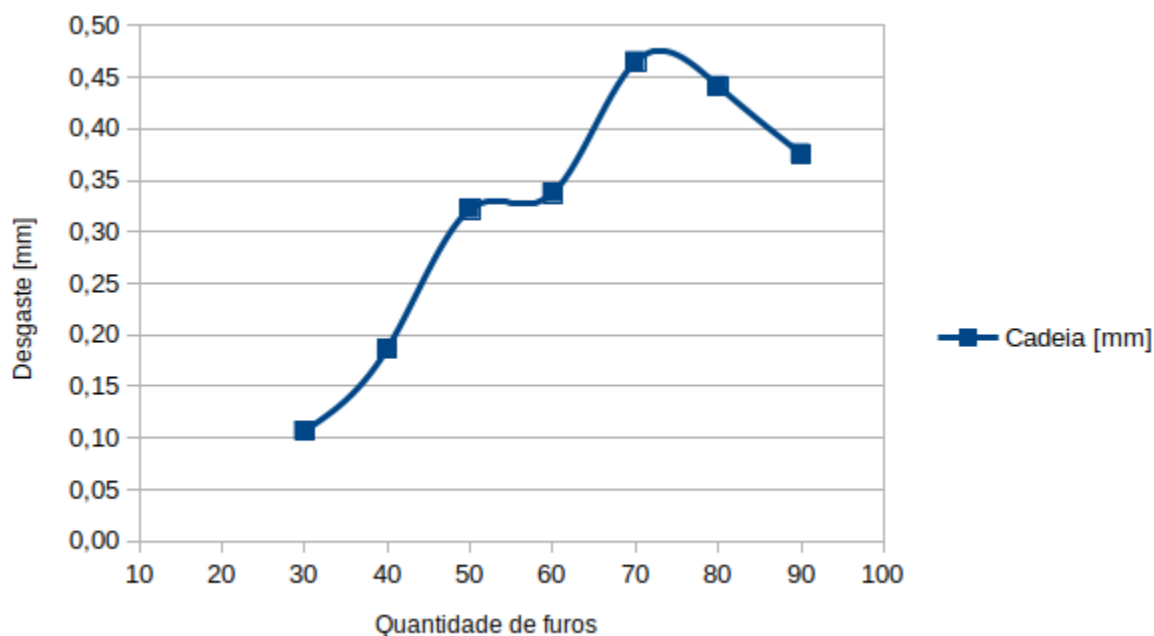
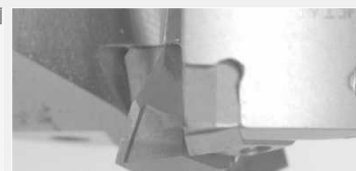


Figura 56 – Medição do desgaste frontal dos insertos centrais do lado 1 (P1)

O relatório de medição gerado a partir do histórico armazenado pelo sistema automatizado na base de dados é mostrado na figura 57.

Date	Time	VB [mm]	Image name	Insert position	Note
2018-02-19	16:23:08	0.3247	img2018021916...	3	Ok
2018-02-19	16:23:08	0.69612	img2018021916...	4	Ok
2018-02-19	16:25:03	0.36091	img2018021916...	1	Ok
2018-02-19	16:25:03	0.75941	img2018021916...	2	Ok
2018-02-19	16:25:03	0.3247	img2018021916...	3	Ok
2018-02-19	16:25:03	0.69612	img2018021916...	4	Ok
2018-02-19	16:31:58	0.36091	img2018021916...	1	Ok
2018-02-19	16:31:58	0.75941	img2018021916...	2	Ok
2018-02-19	16:31:58	0.3247	img2018021916...	3	Ok
2018-02-19	16:31:58	0.69612	img2018021916...	4	Ok
2018-02-21	09:57:38	0.36091	img2018022109...	1	Ok
2018-02-21	09:57:38	0.75941	img2018022109...	2	Ok
2018-02-21	09:57:38	0.3247	img2018022109...	3	Ok
2018-02-21	09:57:38	0.69612	img2018022109...	4	Ok
2018-02-21	09:59:36	0.36091	img2018022109...	1	Ok
2018-02-21	09:59:36	0.75941	img2018022109...	2	Ok
2018-02-21	09:59:36	0.3247	img2018022109...	3	Ok
2018-02-21	09:59:36	0.69612	img2018022109...	4	Ok
2018-02-21	10:42:53	0.36091	img2018022110...	1	Ok



Filter

From: 01/02/2018

To: 21/02/2018

Submit

Figura 57 – Relatório de medição

Os gráficos de controle a seguir mostram as medições realizadas pelo processo automatizado com a broca girando a 20 RPM. As medições de desgaste frontal do lado 1 do inserto central são mostrados na figura 58.

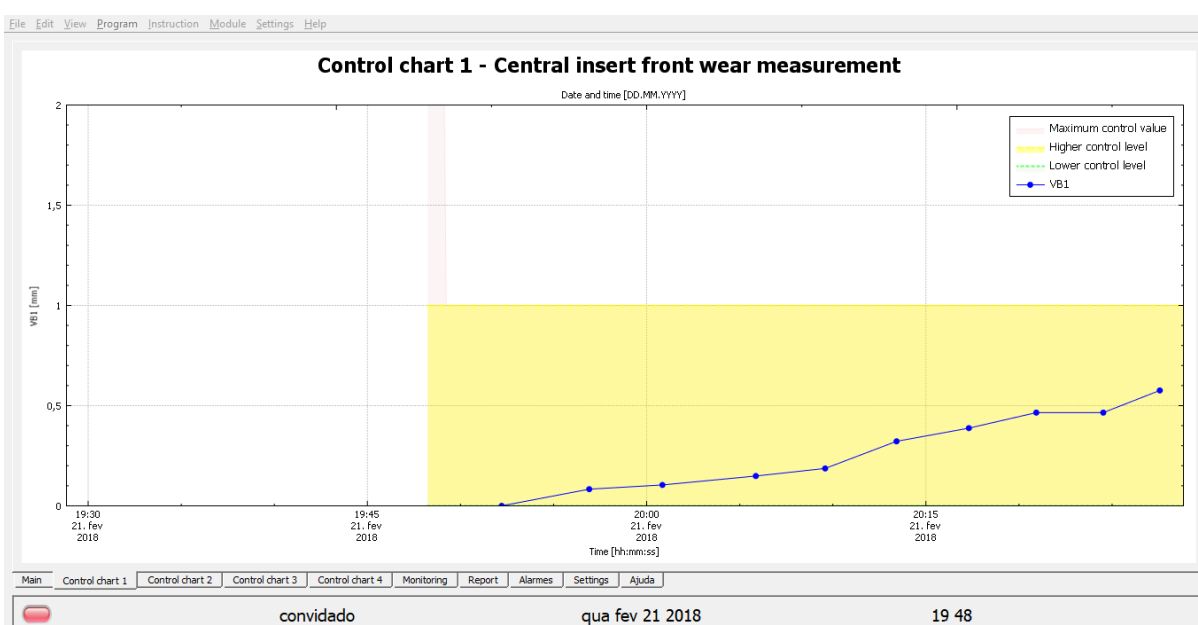


Figura 58 – Gráfico de controle de desgaste frontal do lado 1 do inserto central

O resultado da medição de desgaste de flanco do inserto lateral 1 é mostrado na figura 59.

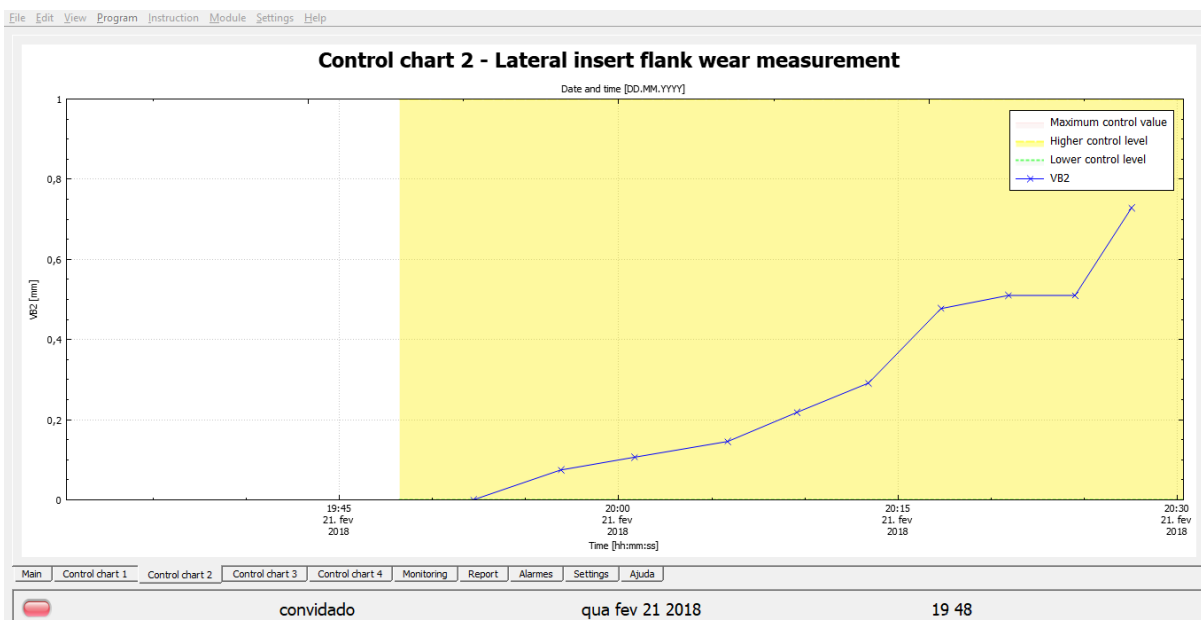


Figura 59 – Gráfico de controle de desgaste de flanco do inserto lateral 1

Existe somente um inserto central mas há dois lados a medir o desgaste. As medições de desgaste do segundo lado são mostrado na figura 60.

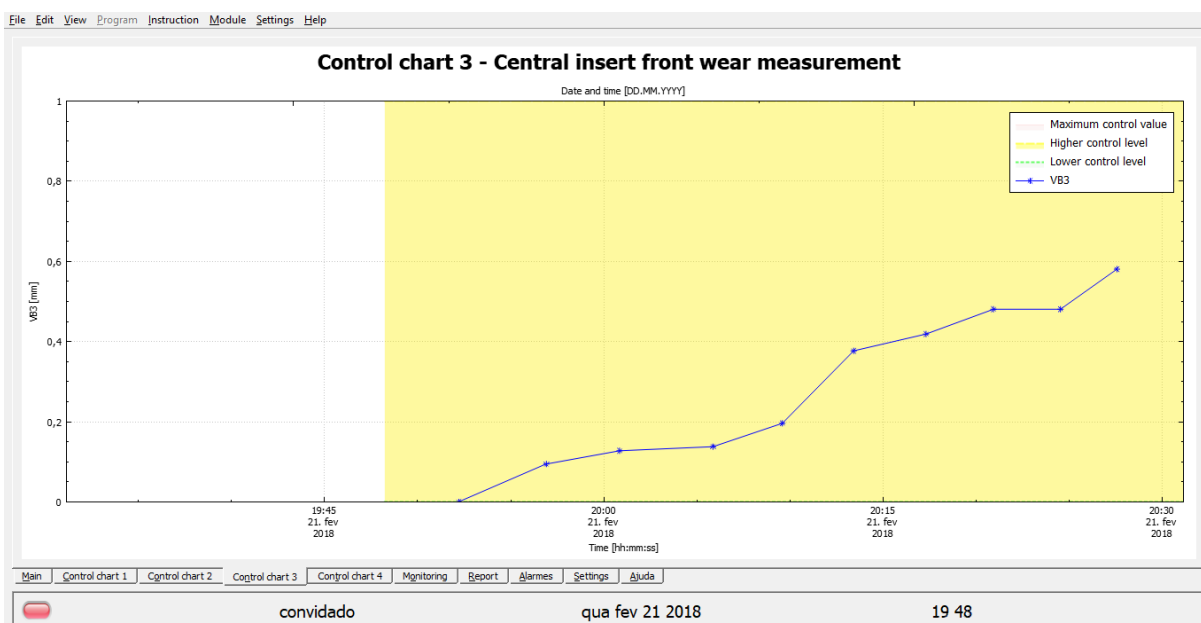


Figura 60 – Gráfico de controle de desgaste frontal do lado 2 do inserto central

O resultado da medição de desgaste de flanco do segundo inserto lateral é mostrado na figura 61.

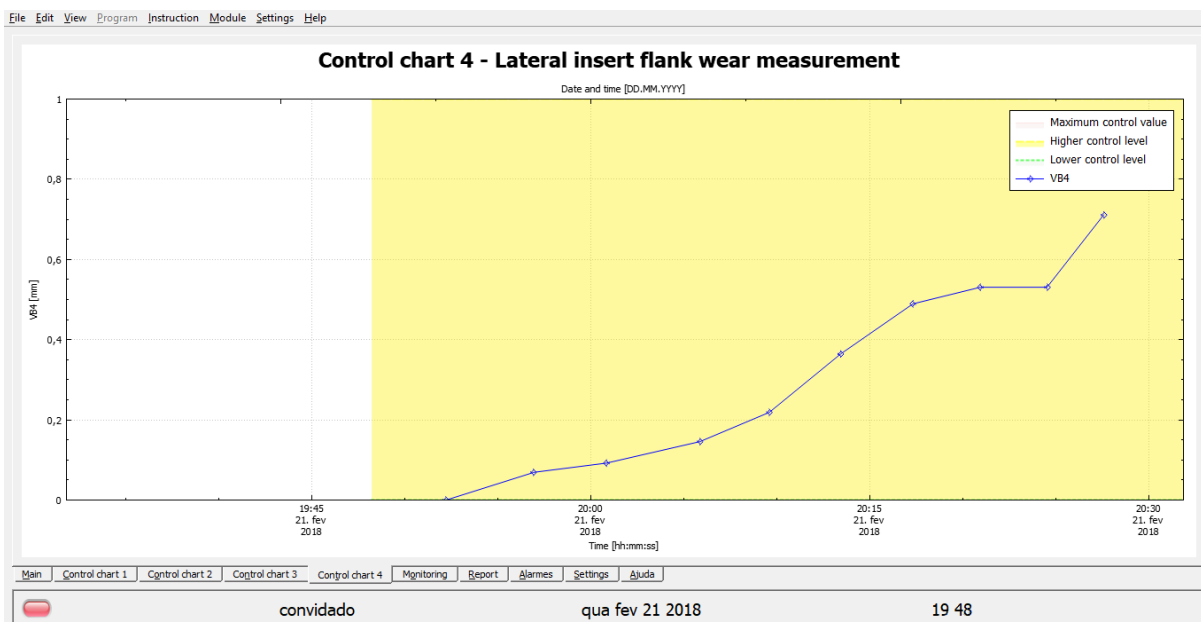


Figura 61 – Gráfico de controle de desgaste de flanco do inserto lateral 2

6 CONCLUSÃO

Os experimentos em laboratório mostraram que o desgaste de flanco dos insertos de metal duro apresentou um erro médio de 5,70%. O erro máximo foi de 12,90 %. O processo de medição de erro foi utilizado para validar o processo automatizado. É importante salientar que o valor elevado do erro decorre da comparação entre um processo de medição automatizado com um manual que é sujeito à subjetividade humana.

Os valores de erro são menores daqueles que são mostrados nos trabalhos de Deschamps (2004) e Pavim (2005). Estes também utilizaram processos de medição direta e automatizados.

Não houve erros de aquisição de imagens, tampouco borrões, quando a broca girou a 20 RPM. Os experimentos não usaram nenhuma outra velocidade. O tempo de execução de um ciclo da cadeia de seleção de imagens foi de 31 milissegundos. O tempo de execução de um ciclo da cadeia de medição foi de 37 milissegundos.

Os gráficos das figuras 47, 48 e 49 mostram uma linearidade inferior em relação às mostradas na literatura apresentada na revisão bibliográfica dos trabalhos de Mikołajczyk, Kłodowski, Mrozinski (2015) e Castillo (2005). A hipótese da causa é que as amostras dos insertos foram coletados após a usinagem de anéis diferentes uns dos outros e que, portanto, não possuem necessariamente o mesmo material e homogeneidade.

A primeira versão do suporte do laboratório permitiu a rotação da ferramenta apenas manualmente que provocou batimento. A irregularidade perceptível na formação das imagens desapareceu a partir da motorização do movimento de rotação da ferramenta..

O protótipo cumpriu os objetivos deste trabalho. O sistema de visão realizou a aquisição das imagens relativas aos desgastes dos insertos. A cadeia de processamento de imagem mediu as áreas desgastadas dos três insertos intercambiáveis.

Os critérios de desgaste da Norma ISO 3685 foram aplicados para estabelecer o momento de troca da ferramenta. O operador monitora os gráficos de controle e verifica o momento de troca dos insertos. Os valores limites e de alarme

são ajustáveis e o estudo do histórico de medição poderá gerar outros critérios para a troca dos insertos.

O programa Lupa controlou o gerenciador da base de dados e as cadeias de processamento de imagens. Os quatro valores de desgaste medidos e suas respectivas imagens são armazenadas no computador para serem consultados.

O processo foi automatizado e se tornou independente da intervenção humana. Os valores de medição armazenados podem ser consultados diretamente na interface do usuário, imprimida ou exportada em formato desejado. O formato PDF permitiu o armazenamento e leitura do relatório de medição em outro computador. O formato CSV exportou os valores de medição para serem processados em outro programa computacional tal qual um editor de planilha eletrônica.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É recomendado substituir o aplicativo Roboreal por bibliotecas livres. Além da eliminação do custo da licença, permitiria que todas as funcionalidades requeridas estivessem presentes em apenas um programa. Para tal, sugere-se a integração das bibliotecas OpenCV ou S2iLib como mostradas na revisão bibliográfica.

O relatório de medição assim como a base de dados do histórico só podem ser acessados localmente. Assim sugere-se a integração do sistema a redes sem fio e até mesmo a criação de um aplicativo para dispositivos móveis para monitoração do sistema. Isso permitiria inclusive o acesso remoto a partir da nuvem.

A qualidade do processo poderia ser avaliada por meio de redes neurais artificiais. A predição do ponto ideal para a troca da ferramenta poderia ser realizada com o histórico ou em tempo real. Outros sinais além da medição do desgaste poderiam ser utilizados: emissão acústica, potência consumida vibração e força de corte.

Outra sugestão é a análise de incertezas para as medições com um estudo da aplicabilidade do sistema para outros tipos de revestimentos e ferramentas.

Um módulo para realizar análise econômica poderia ser objeto de estudo e implementação dentro do programa Lupa.

Embarcar as cadeias de processamento de imagens em um dispositivo de lógica configurável FPGA.

Por fim, levar o protótipo para ser validado no processo fabril da ROBRASA.

REFERÊNCIAS

Acharya, Tinku; Ray, Ajoy K. Image processing: principles and applications. 1 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. ISBN: 0471719986.

Advantech. 2017. Disponível em: <<http://www.advantech.com.br>>. Acesso em: setembro de 2017.

Almeida, Cristiano Mateus de. Avaliação do desgaste da ferramenta de metal duro revestida com TiN no fresamento do aço ABNT 4140 laminado a quente e temperado/revenido. 2010. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Arduino. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: fevereiro de 2018.

Arruda, Étory Madrilles; Ribeiro Filho, Sérgio Luiz Moni; Borba, Rodrigo Barros da; Brandão, Lincoln Cardoso. Análise dos esforços de corte durante os processos de furação em cheio e com pré-furo do aço endurecido AISI P20. In: 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 18-22 maio, 2015, Salvador.

Azure. 2017. Disponível em: <<http://www.azurephotonics.com>>. Acesso em: outubro de 2017.

Baldner, Felipe de Oliveira. Metodologia para utilização de sistemas de visão computacional em calibrações da metrologia de fluidos. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Fluminense.

Basler Ace. 2017. Disponível em: <<https://www.baslerweb.com>>. Acesso em: outubro de 2017.

Blanchette, Jasmin; Summerfield, Mark. C++ GUI Programming with Qt 4. 2 ed. USA: Prentice Hall, 2008. ISBN: 9780132354165.

Braghini Junior, Aldo. Investigação do desgaste de ferramentas de PCBN e metal duro no fresamento de topo de aços endurecidos. 1998. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo.

Cardoso, Marlon José. Análise do processo de furação profunda no aço SAE 4144M endurecido utilizando MQL e broca helicoidal revestida. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Casarin, Joviano Janjar; Kieckow, Flávio; Santos, Emerson Miranda dos. Avaliação do desgaste de brocas helicoidais de aço-rápido (HSS) modificadas superficialmente por nitretação a plasma. Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI, v. 9, n. 16, p. 68-76, maio. 2013.

Castillo, W. J. Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos. 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Coelho, Flavio Ulhoa; Lourenço, Mary Lilian. Um curso de álgebra linear. 2 ed. São Paulo: Edusp, 2001. ISBN: 9788531405945.

Contrucci, João Gabriel. Aplicação de redes neurais artificiais na predição de diâmetro e rugosidade durante o processo de furação. 2012. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista.

Deschamps, Fernando. Contribuições para o desenvolvimento de um sistema de visão aplicado ao monitoramento do desgaste de ferramentas de corte – o sistema Toolspy. 2004. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Diniz, Anselmo Eduardo; Marcondes, Francisco Carlos; Coppini, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. 1 ed. São Paulo: Artliber, 2006. ISBN: 8587296019.

Dougherty, Edward R.; Lotufo, Roberto Alencar. Hands-on morphological image processing. 1 ed. Bellingham, Washington: SPIE press, 2003. ISBN: 9780819447203.

Erhardt; Ferron. Theory and applications of digital image processing. 1 ed. Offenburg, Alemanha: University of Applied Sciences, 2000.

Feliciano, Flávio F.; Leta, Fabiana R.; Souza, Igor L. Visão computacional aplicada à metrologia dimensional automatizada: considerações sobre sua exatidão. ENGEVISTA, v. 7, n. 2, p. 38-50, dez. 2005..

Ferraresi, Dino. Fundamentos da Usinagem dos Metais. 12 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008. ISBN: 9788521208594.

Forsyth, David; Ponce, Jean, 2012. Computer vision: a modern approach. 2 ed. Boston: Pearson, 2012. ISBN: 9780136085928.

Gomes, Manoel Amâncio. Estudo do fresamento frontal com alta velocidade de corte no aço ferramenta (VH13ISO) endurecido na operação de semi-acabamento. 2015. Dissertação (Mestrado). Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Gonçalves, Leandro Inácio. Detecção automática de indícios de fraude em assinaturas em documentos digitais. 2017. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

Gonzales, Rafael C.; Woods, Richard E. Digital image processing. 3 ed. Tennessee: Pearson, 2015. ISBN: 9780131687288.

Hong, G.S.; Wang, W; Wong, Y. S. Flank wear measument by successive image analysis. Computers in Industry, 2005. Disponível em: <www.sciencedirect.com>.

IEEE. 2018. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/3/>>. Acesso em: janeiro de 2018.

International Oganization for Standization. Tool life testing with single point turning. Genebra: ISO, 1993. (ISO 3685).

Jähne, B.; Haussecker, H.; Geissler, P. Handbook of computer vision and applications. 1 ed. San Diego: Academic Press, 1999. ISBN: 0123797713.

Jain, R.; Kasturi, R.; Schunck, B. G. Machine vision. 1 ed. New York: McGraw-Hill, 1995. ISBN: 0070320187.

Kennametal. 2017. Disponível em: <<https://www.kennametal.com/pt>>. Acesso em: fevereiro de 2017.

König, W.; Klocke, F. Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida – parte 1. Traduzido e adaptado por Rolf Bertrand Schroeter e

Walter Lindolfo Weingaertner do livro “Fertigungsverfahren–Drehen, Bohren, Fräsen”. 1 ed. Florianópolis: UFSC, 1997.

Kurt, Mustafa; Bagci, Eyup; Kaynak, Yusuf. Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 40, n. 5, p. 458-469. 2009.

Lins, R. G.; Givigi, S. N.; Kurka, P. R. Vision-based measurement for localization of objects in 3-D for robotic applications. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 64, n. 11, p. 2950-2958, 2015.

Lins, Romulo Gonçalves. Plano de trabalho – Sistema automatizado para medição e monitoramento de desgaste de brocas de metal duro baseado na análise de imagens. .

Lopes, João Manuel Brisson. Cor e luz. 1 ed. Lisboa: Departamento de Engenharia Informática. Instituto Superior Técnico, 2013.

Ma, Yi; Soatto, Stefano; Košecká, Jana; Sastry, S. Shankar. An invitation to 3-D vision: from images to geometric models. 1 ed. Nova York: Springer Science & Business Media, 2005. ISBN: 9780387008936.

MathWorks. 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/>>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2018.

Mikołajczyk, Tadeusz; Kłododowski, Adam; Mrozinski, Adam. Camera-based automatic system for tool measurements and recognition. In: 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2015, 8-9 october, 2015, Tirgu-Mures, Romania. Disponível em: <www.sciencedirect.com>.

Miranda Neto, Arthur; Rittner, Letícia; Leite, N.; Zampieri, Douglas Eduardo; Lotufo, R.; Mendeleck, André. Pearson's Correlation Coefficient for Discarding Redundant Information in Real Time Autonomous Navigation System. In: Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on, 1-3 oct, 2007, Singapore.

Miranda, Gilberto Walter Arenas. Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN. 2003. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas.

Modbus Organization. 2018. Disponível em: <<http://www.modbus.org>>. Acesso em: janeiro de 2018.

Motic. 2018. Disponível em: <<http://www.motic.com/>>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2018.

National Instruments. 2018. Disponível em: <<http://www.ni.com/>>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2018.

OpenCV. 2017. Disponível em: <<https://opencv.org/>>. Acesso em: 16 de outubro de 2017.

Pavim, Alberto Xavier. Contribuições na otimização de um sistema de visão para detecção, medição e classificação automática do desgaste de ferramentas de corte em processos de usinagem. 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Pimentel, Ricardo. Melhorias do processo de furação de ferro fundido cinzento com brocas helicoidais de metal duro. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Python. 2017. Disponível em: <<https://www.python.org/>>. Acesso em: outubro de 2017.

Qt. 2017. Disponível em: <<https://www.qt.io>>. Acesso em: março de 2017.

Rencz, Andrew N. Manual of Remote Sensing, Remote Sensing for the Earth Sciences. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 1999. ISBN: 9780471294054.

Roborealm. 2016. Disponível em: <<http://www.roborealm.com/>>. Acesso em: setembro de 2016.

Robrasa. 2017. Disponível em: <http://www.rotheerde.com/download/info/Robrasa-Flyer_PT.pdf>. Acesso em: 28 de maio de 2017.

Rubin, Victor Hugo Serafim; Ferreira, Guilherme Resende; Okada, Kenji Fabiano Ávila; Isaac, Rodrigo Cordon. Monitoramento e controle temporizado do processo de furação com força constante. In: XIV CEEL - ISSN 2178-8308, 2016, Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia.

S2iLib. 2017. Disponível em: <<https://sourceforge.net/projects/s2ilib/>>. Acesso em: outubro de 2017.

Silva, Bruno Ramon de Almeida e. Sistema de contagem automática de objetos utilizando processamento digital de imagens em dispositivos móveis. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural do Semi-árido.

Sommerville, Ian. Software Engineering. 5 ed. Boston: Addison-Wesley, 2011. ISBN: 9780137035151.

SQLite. 2017. Disponível em: <<https://www.sqlite.org>>. Acesso em: março de 2017.

Stemmer, Erich Caspar. Ferramentas de Corte 2. 4 ed. Florianópolis: UFSC, 2008. ISBN: 8532804519.

ThyssenKrupp. 2017. Disponível em: <http://www.rotheerde.com/download/info/Who_we_are.pdf>. Acesso em: 28 de maio de 2017.

Trucco, Emanuele; Verri, Alessandro. Introductory techniques for 3-D computer vision. 1 ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1998. ISBN: 0132611082.

USB Implementers Forum, Inc. 2017. Disponível em: <<http://www.usb.org>>. Acesso em: novembro de 2017.

W3C. 2016. Disponível em: <<https://www.w3.org/XML/>>. Acesso em: setembro de 2016.

Yen, Eugene K.; Johnston, Roger G. The Ineffectiveness of the Correlation Coefficient for Image Comparisons. Los Alamos, New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 1996.

Yoder, Paul R. Mounting optics in optical instruments. 2 ed. Bellingham, Washington: SPIE press, 2008. ISBN: 9780819471291.

APÊNDICE A – PROGRAMA DE CÁLCULO DE DESGASTE

```
int ax; // Ponto A da coordenada X
```

```
ax = getVariable("BOTTOM_LEFT_X");
```

```
//printf ("%d\n", ax);
```

```
int ay; // Ponto A da coordenada Y
```

```
ay = getVariable("BOTTOM_LEFT_Y");
```

```
//printf ("%d\n", ay);
```

```
int bx; // Ponto B da coordenada X
```

```
bx = getVariable("LEFT_TOP_X");
```

```
//printf ("%d\n", bx);
```

```
int by; // Ponto B da coordenada Y
```

```
by = getVariable("LEFT_TOP_Y");
```

```
//printf ("%d\n", by);
```

```
int cx; // Ponto C da coordenada X
```

```
cx = getVariable("RIGHT_TOP_X");
```

```
//printf ("%d\n", cx);
```

```
int cy; // Ponto C da coordenada Y
```

```
cy = getVariable("RIGHT_TOP_Y");

//printf ("%d\n", cy);

int dx; // Ponto D da coordenada X

dx = getVariable("RIGHT_BOTTOM_X");

//printf ("%d\n", dx);

int dy; //Ponto D coordenada Y

dy = getVariable("RIGHT_BOTTOM_Y");

//printf ("%d\n", dy);

// Cálculo dos termos da equação da Reta 1

float e1ta, e1tb, e1tc;

e1ta = (ay - cy);

e1tb = (cx - ax);

e1tc = (ax*cy) - (cx*ay);

//printf ("%f\n", e1ta);

//printf ("%f\n", e1tb);

//printf ("%f\n", e1tc);
```

```
//Cálculo dos termos da equação da reta 2
```

```
float e2ta, e2tb, e2tc;
```

```
e2ta = by - dy;
```

```
e2tb = dx - bx;
```

```
e2tc = (bx*dy)-(dx*by);
```

```
//printf("%f\n", e2ta);
```

```
//printf("%f\n", e2tb);
```

```
//printf("%f\n", e2tc);
```

```
// Cálculo da distância entre as retas
```

```
float tc, a, b, raiz, dpixel;
```

```
tc = fabs(e1tc - e2tc);
```

```
//printf ("%f\n", tc);
```

```
a = (e1ta + e2ta)/2;
```

```
b = (e1tb + e2tb)/2;
```

```
//printf("%d\n", a);
```

```
//printf("%d\n", b);
```

```
raiz = sqrt(a*a + b*b);
```



```
dpixel = tc/raiz;
```

```
//printf("%f\n", dpixel);
```

```
//Cálculo do desgaste em milímetros
```

```
float Desgaste, calib;
```

```
calib = 0.07285;
```

```
Desgaste = (dpixel * calib)/6;
```

```
setVariable("Desgaste em milímetros", Desgaste);
```

```
printf ("%f\n", Desgaste);
```

APÊNDICE B – CADEIA DE MEDIÇÃO DO DESGASTE FRONTAL

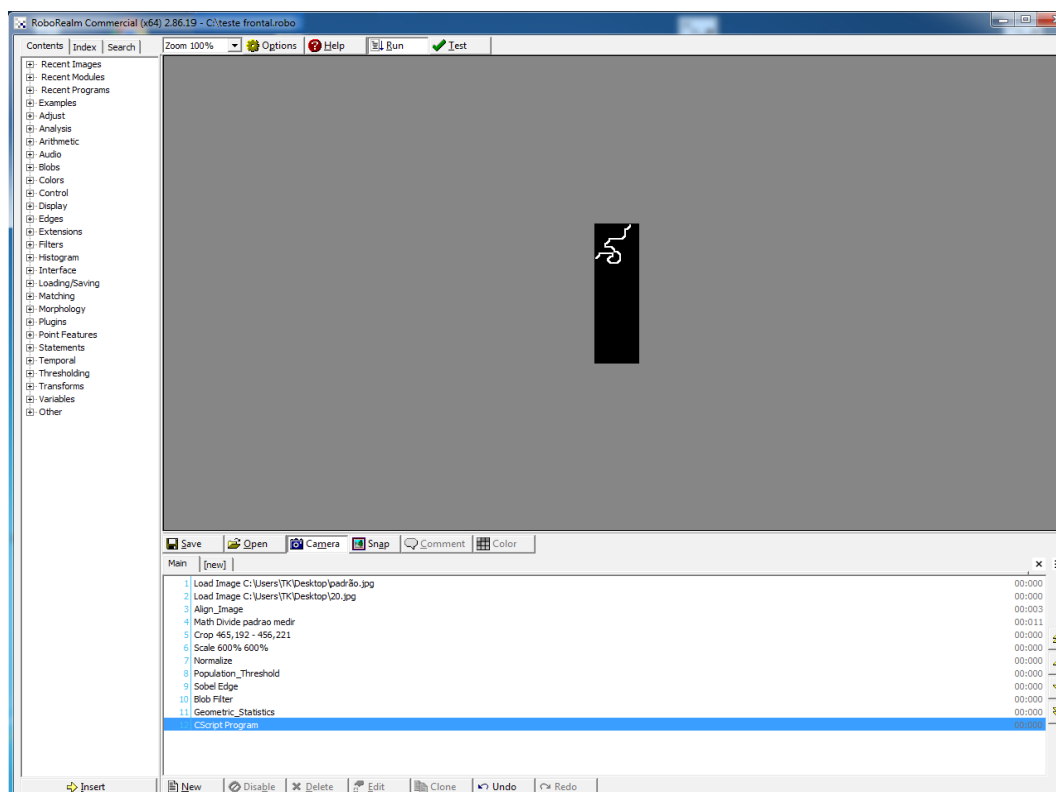


Figura 62 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal após 20 furos

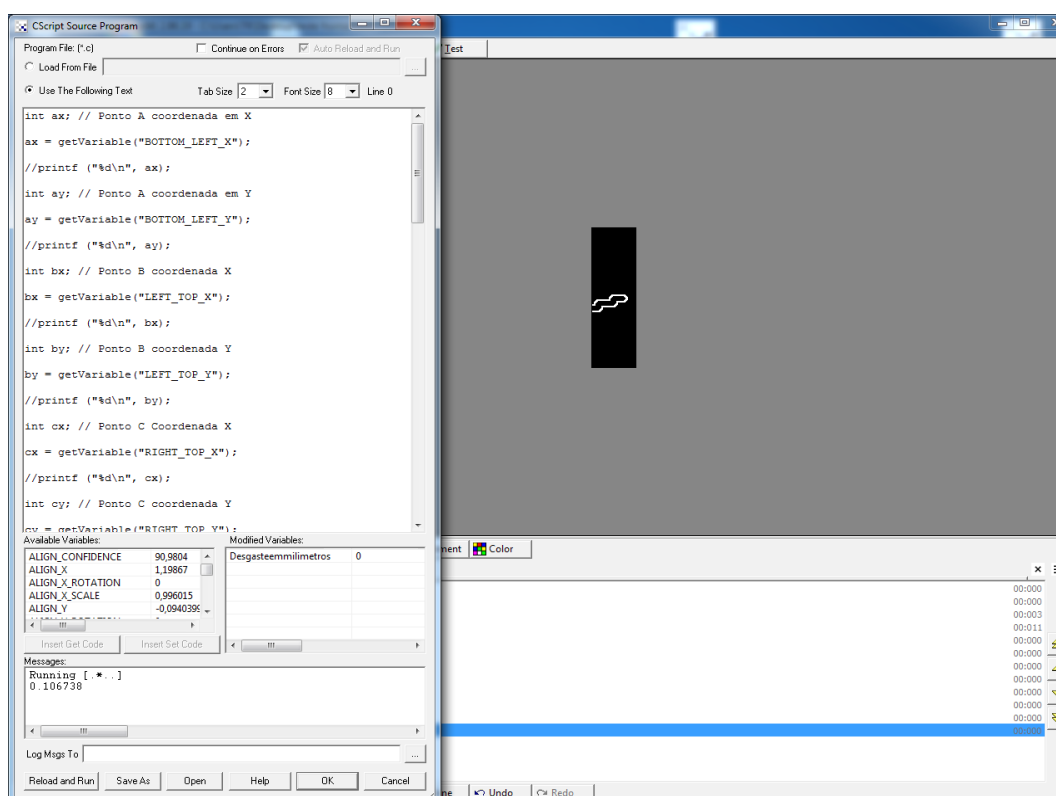


Figura 63 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 30 furos

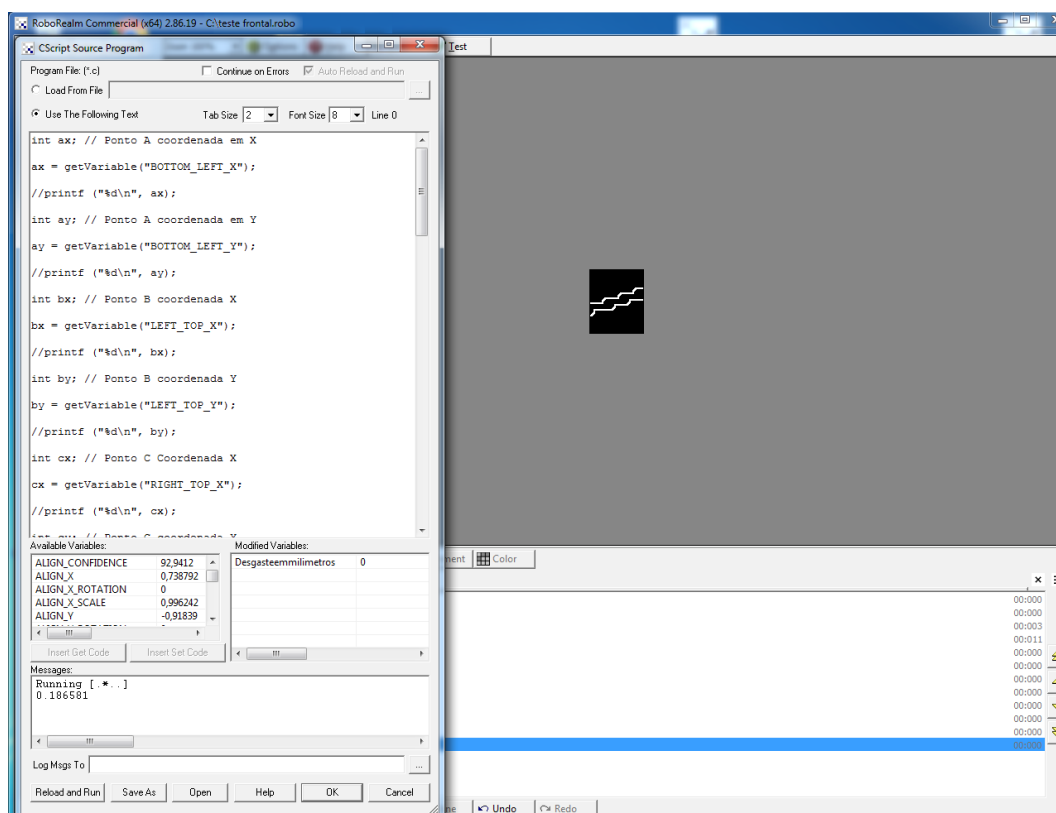


Figura 64 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 40 furos

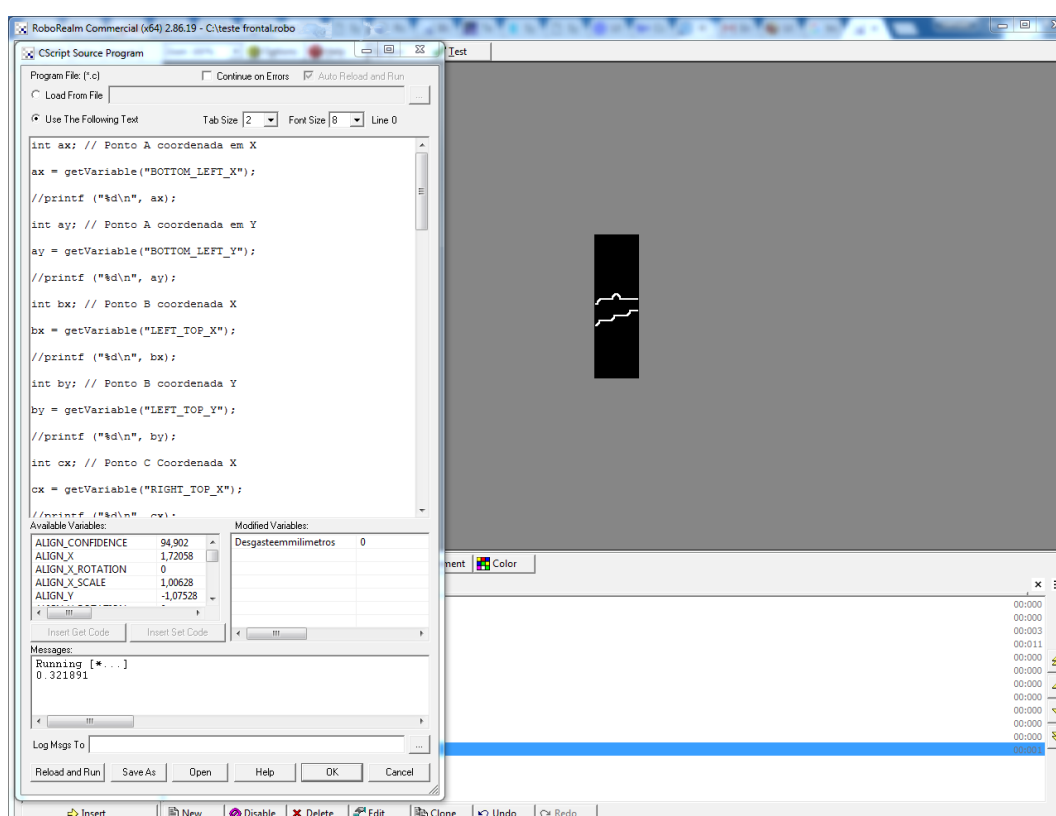


Figura 65 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 50 furos

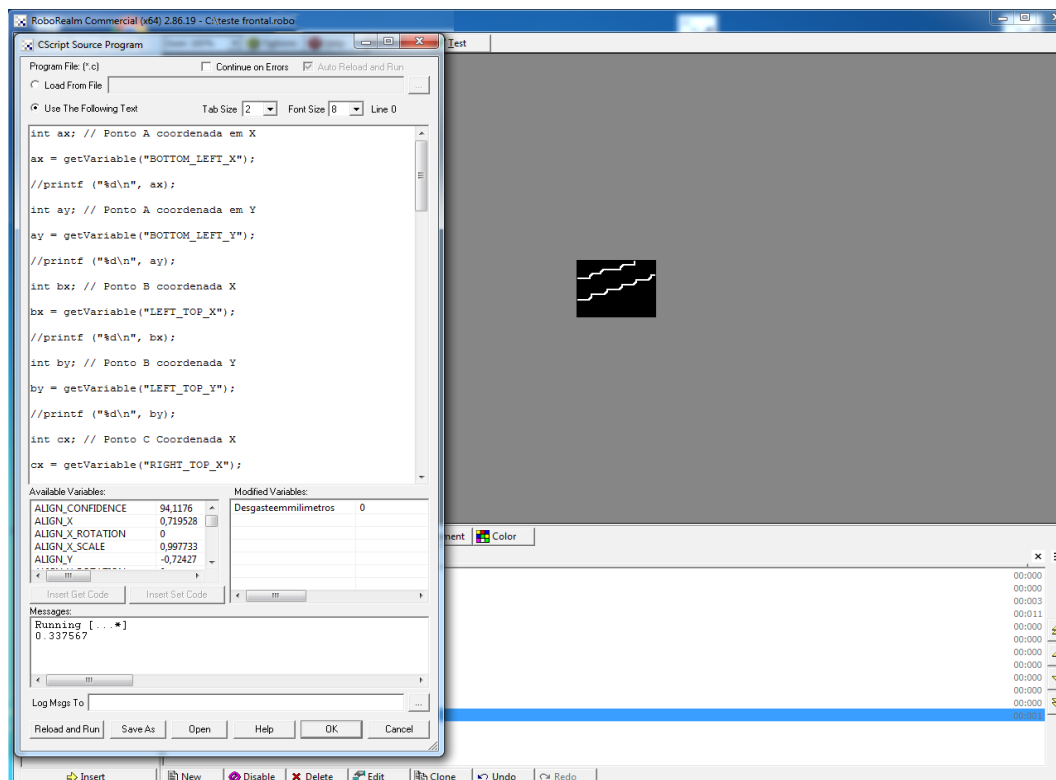


Figura 66 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 60 furos

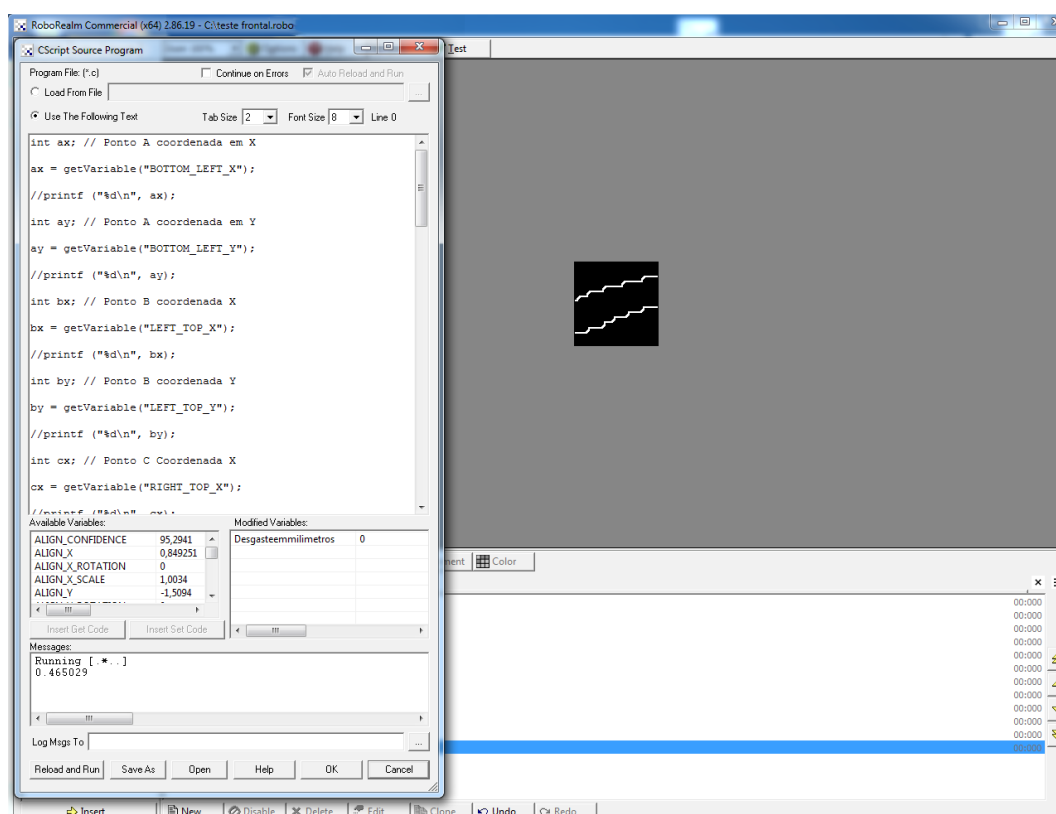


Figura 67 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 70 furos

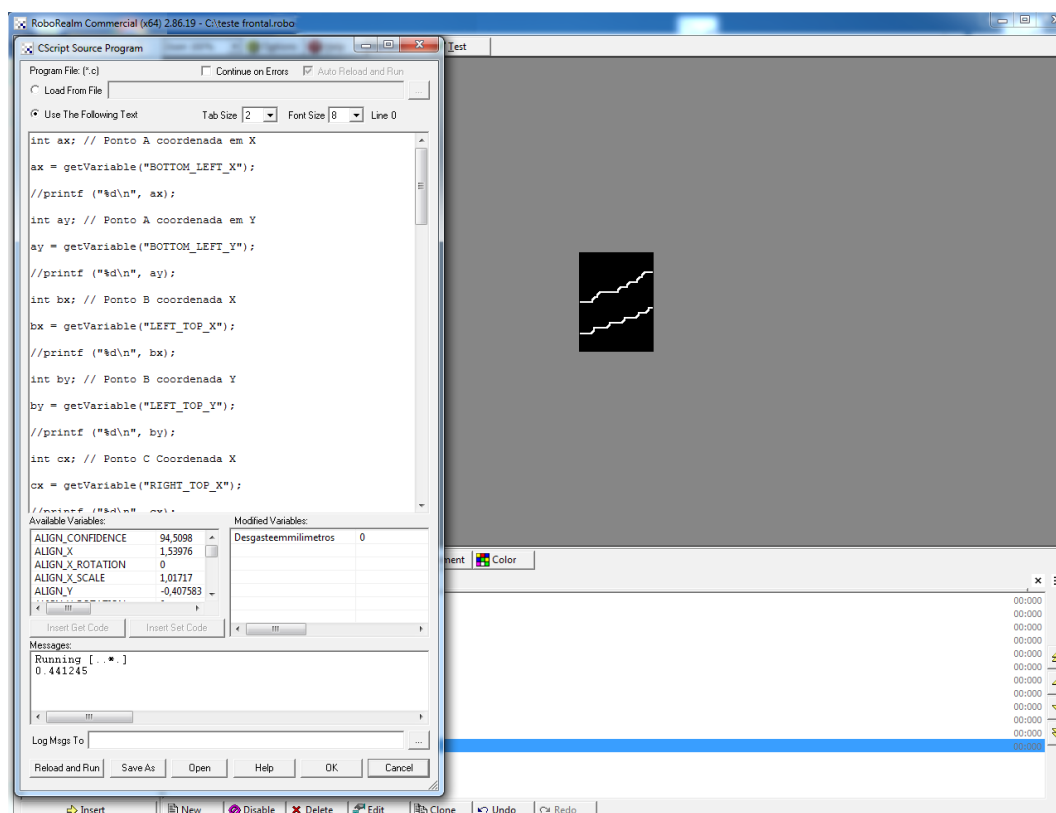


Figura 68 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 80 furos

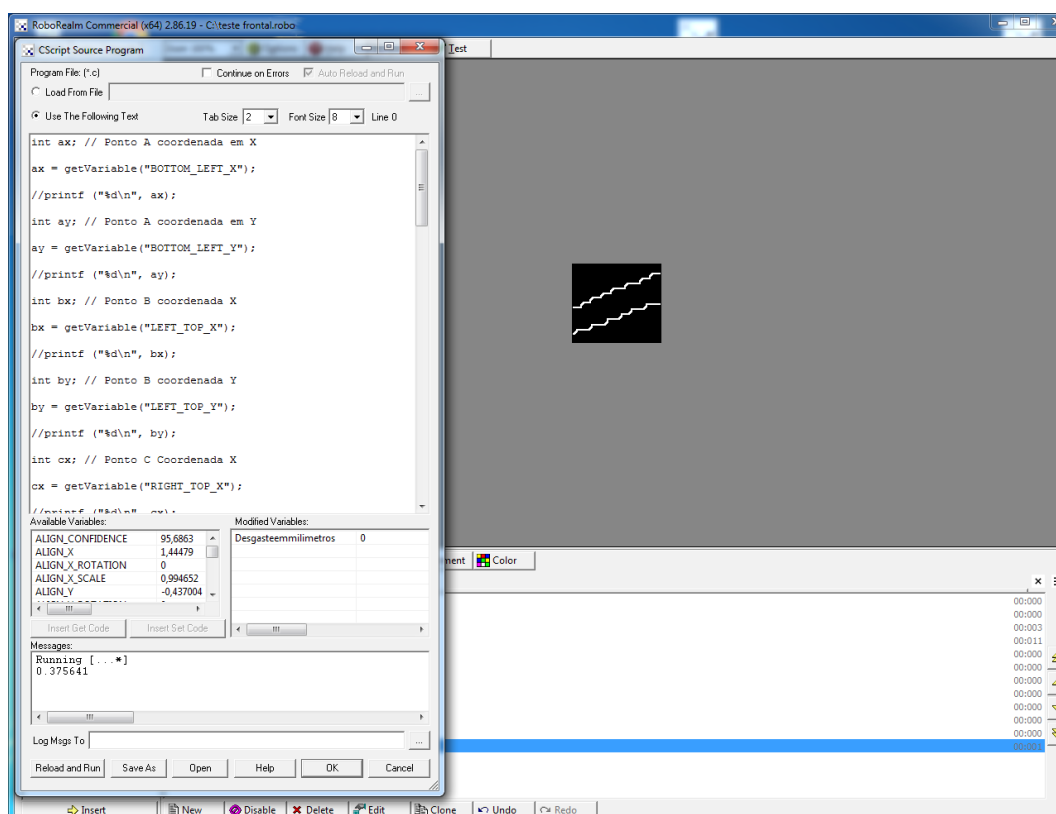


Figura 69 – Cadeia de cálculo de desgaste frontal para 90 furos