Campus de São Carlos

**DIAGNÓSTICO DO ESTADO DE DESGASTE
DE FERRAMENTAS PARA O MONITORAMENTO
DE CONDIÇÕES DE USINAGEM
DE ALTO DESEMPENHO**

João Eduardo Borelli

Orientador: Prof. Dr. Adilson Gonzaga

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO

**DIAGNÓSTICO DO ESTADO DE DESGASTE DE
FERRAMENTAS PARA O MONITORAMENTO
DE CONDIÇÕES DE USINAGEM DE ALTO
DESEMPENHO**

João Eduardo Borelli

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 05.01.01.

Ass.:

Dissertação apresentada à
Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia
Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adilson Gonzaga

São Carlos
2000

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017113

Classe.	TESE
Curr.	0871
Tombo	017/01

st 1128550

Ficha Catalográfica preparada pela Seção de tratamento
da informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B731d Borelli, João Eduardo
Diagnóstico do estado de desgaste de ferramentas
para o monitoramento de condições de usinagem de alto
desempenho / João Eduardo Borelli. -- São Carlos,
2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos - Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Adilson Gonzaga.

1. Ferramentas, 2. Desgaste, 3. Imagens,
4. Infravermelho, 5. Lógica Fuzzy. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **JOÃO EDUARDO BORELLI**

Dissertação defendida e aprovada em 30-10-2000
pela Comissão Julgadora:

Prof. Doutor **ADILSON GONZAGA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **PAULO ROGÉRIO POLITANO**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Profª. Associada **VILMA ALVES DE OLIVEIRA**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*À minha mãe
e aos meus irmãos*

Ao professor Dr. Adilson Gonzaga pela amizade, pela excelente orientação, pela oportunidade, por tudo.

Ao professor Dr. Evandro L.L. Rodrigues pelo inestimável apoio e amizade.

Aos professores Drs. Homero Shiabel, Stela V. Paiva, Reginaldo T. Coelho, Henrique Rozenfeld pelo inestimável apoio e incentivo.

Ao amigo Gilmar C. F. Medeiros e aos amigos Evelina A. Neves, Celso A. França, Francisco J. Monaco, Aldo Branghini Jr. pela inestimável atenção e pela ajuda no decorrer deste trabalho.

Aos colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Mecânica da EESC – USP e Departamento de Engenharia Mecânica e Aeronáutica – ITA.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

A todos os brasileiros que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho pudesse ser realizado.

A Deus que esteve sempre presente do meu lado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo	6
2 USINAGEM	8
2.1 Mecanismo de Formação do Cavaco	11
2.2 Geração do Calor na Ferramenta de Corte	12
2.3 A Ferramenta de Corte	14
2.4 O Mecanismo do Desgaste da Ferramenta	17
2.5 A Medida do Desgaste	23
2.6 A Medida da Temperatura Através da Medida da Radiação de Infravermelho	24
2.7 Sistemas para Monitoramento e Processo	27
3 PRINCÍPIOS DE VISÃO COMPUTACIONAL	31
3.1 O Vetor de Características	34
3.2 Redes Neurais e lógica Fuzzy	36
4 DESENVOLVIMENTO	40
4.1 <i>Hardware</i>	41
4.2 Calibração da Câmera de Infravermelho	41
4.3 Software	46
4.4 O monitoramento do desgaste da ferramenta	47

4.5 O desenvolvimento do sistema de diagnóstico	48
4.5.1 A Extração de características	48
4.6 Determinação dos <i>fuzzy sets</i>	50
4.7 Determinação das <i>membership functions</i>	52
4.7.1 Experimento para determinação das <i>membership functions</i>	53
4.8 A fuzzificação	65
4.9 Determinação do <i>fuzzy set</i> de saída e <i>membership functions</i>	65
4.10 As operações lógicas entre os conjuntos <i>fuzzy</i>	66
4.11 Determinação das Regras de Inferência	67
4.12 Extração de conhecimento	67
4.13 Desfuzzificação	69
4.13.1 A centróide	69
4.13.2 Média dos máximos	70
4.14 O modelo <i>fuzzy</i> de Mandami	70
5 RESULTADOS	72
6 CONCLUSÕES	85
6.1 Trabalhos Futuros	86
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	88
ANEXO I – Código fonte do software desenvolvido	96

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Método do termopar	2
FIGURA 02 – Linhas demarcando a fusão dos diferentes pós metálicos para diferentes condições de usinagem: $f=0.25$ mm/ver em a) temos $V=5.5$ m/s, b) $V= 7.8$ m/s e em c) $V=11$ m/s	3
FIGURA 03 – Distribuição de temperaturas no inserto	3
FIGURA 04 – Termopar de arame (junção instantânea)	4
FIGURA 05 – Medida da temperatura: método do infravermelho, método do termopar ferramenta/cavaco(<i>tool/chip</i>), método do termopar implantado.....	5
FIGURA 06 – Uso do pirômetro de infravermelho de duas cores para detecção da temperatura em processos de torneamento com ferramenta de diamante	6
FIGURA 07 – Operação de torneamento	8
FIGURA 08 – Variáveis independentes e variáveis dependentes em operações de corte	9
FIGURA 09 – Distribuição da temperatura na área de corte.....	10
FIGURA 10 – Mecanismo de formação do cavaco	12
FIGURA 11 – Zona de deformação e zona de contato	13
FIGURA 12 a, 12b, 12c – Pastilhas de várias formas e quebra-cavacos	14
FIGURA 13 – Camadas isolantes de calor, revestimento	15
FIGURA 14 – Variação da temperatura com o desgaste da ferramenta	17
FIGURA 15 – Participação das diferentes componentes no desgaste da ferramenta.....	18
FIGURA 16a – Aresta postiça de corte e variações nas microdurezas $HV_{0,1}$ [Kg/mm ²] na aresta postiça e na raiz do cavaco	19
FIGURA 16b – Efeito da aresta postiça de corte nos mecanismos de desgaste adesivo e abrasivo	19

FIGURA 17a e 17b – Tipos de desgaste, causas e possíveis soluções	22
FIGURA 18 – Tipos de desgaste, causas e possíveis soluções	22
FIGURA 19 – Força de corte e Emissão Acústica (AE) na quebra da ferramenta ..	28
FIGURA 20 – Modelo de um sistema de monitoramento (TCM)	29
FIGURA 21 – Diagrama de blocos de um sistema visual	31
FIGURA 22 – Equipamento para aquisição de imagens para a classificação de placas de madeira	32
FIGURA 23 – Erro de Bayes envolvendo uma característica e duas classes	36
FIGURA 24 – Representação de uma função de pertinência	38
FIGURA 25 – Cena contendo vários objetos	38
FIGURA 26 – Visão gral do sistema <i>fuzzy</i> de atenção visual desenvolvido	39
FIGURA 27 – Sonda contendo a amostra do material e ligada a um sistema de aquisição de sinais	42
FIGURA 28 – Aquecimento das amostras dos materiais a 900 °C	43
FIGURA 29 – Resfriamento das amostras - à esquerda sistema de aquisição de sinais - à direita câmera de infravermelho	43
FIGURA 30 – Interface para medida dos tons de cinza das imagens de infravermelho das amostras	44
FIGURA 31 – Calibração da câmera de infravermelho	45
FIGURA 32 – Interface para tomada de decisões. A imagem registra o momento da quebra da ferramenta com precisão de 1/30 segundos	46
FIGURA 33 – Algoritmo para os filtros passa faixa e <i>threshold</i>	47
FIGURA 34 – Algoritmo do histograma de primeira ordem	47
FIGURA 35 – Interpretação e decisão é a última etapa de um sistema tomada de decisões	48
FIGURA 36 – Identificação dos <i>fuzzy sets</i> , <i>membership functions</i> e regras de inferência para sistemas de automação baseados em lógica <i>fuzzy</i>	50
FIGURA 37 – Variáveis de entrada	50
FIGURA 38 – Gaussiana das médias e valores das características para as 3 classes de ferramentas	54
FIGURA 39 – Gaussiana dos desvios Padrão e valores das características para as 3 classes de ferramentas	55

FIGURA 40 – Gaussiana das curtosis e valores das características para as 3 classes de ferramentas	55
FIGURA 41 – Gaussiana das energias e valores das características para as 3 classes de ferramentas	56
FIGURA 42 – Gaussiana das entropias e valores das características para as 3 classes de ferramentas	56
FIGURA 43 – Médias em função do desgaste	57
FIGURA 44 – Desvios padrão em função do desgaste	57
FIGURA 45 – Curtosis em função do desgaste	58
FIGURA 46 – Energia em função do desgaste	58
FIGURA 47 – Entropia em função do desgaste	58
FIGURA 48 – Gráfico da frequência em função do tom de cinza para a característica de média “baixa”.	59
FIGURA 49 – Função Trapézio – <i>Membership Function</i> : médias “baixas”	60
FIGURA 50 – Frequências em função dos tons de cinza para a característica de média de tons de cinza usando-se ferramentas novas-boas, intermediárias no final de vida.	61
FIGURA 51 – Função Triângulo – <i>Membership Functions</i> : média “Intermediária”, média “alta”	62
FIGURA 52 – Gráfico das <i>membership functions</i> do fuzzy set “média”	62
FIGURA 53 – Função Gaussiana – <i>Membership Function</i> : Entropia Média	63
FIGURA 54 – Gráfico das <i>membership functions</i> do fuzzy set “desvio padrão”	63
FIGURA 55 – Gráfico das <i>membership functions</i> do fuzzy set “curtose”	64
FIGURA 56 – Gráfico das <i>membership functions</i> do fuzzy set “energia”	64
FIGURA 57 – Gráfico das <i>membership functions</i> do fuzzy set “entropia”	64
FIGURA 58 – Fuzificação do valor 96 dentro do fuzzy set média	65
FIGURA 59 – Representação das <i>membership functions</i> de desgaste: uso da função triângulo	66
FIGURA 60 – Questionário para extração do conhecimento	67
FIGURA 61 – Desfuzzificação	70
FIGURA 62 – Calibração da câmera de infravermelho para diferentes Materiais ..	72
FIGURA 63 – Tom de cinza em função da velocidade de corte	73

FIGURA 64 – Tom de cinza em função do desgaste da ferramenta de corte	74
FIGURA 65 – Determinação das melhores condições de usinagem a se adequarem a um determinado processo	76
FIGURA 66 – Isoterma no tom de cinza 134	77
FIGURA 67 – Isoterma no tom de cinza 157	77
FIGURA 68 – Isoterma no tom de cinza 211	78
FIGURA 69 – Comparação da medida da temperatura [°C] fornecida pelo termopar no interior da ferramenta e temperatura [°C] no ponto de contato da ferramenta e com a peça e obtida pela câmera de infravermelho. Tempo [s]. Condições de usinagem 497mm/min, 0,5 mm/r e 0,2 mm	78
FIGURA 70 – Diagnóstico auxiliado por computador: <i>Fuzzy sets</i> de entrada, regras de inferência e <i>fuzzy set</i> de saída.....	80
FIGURA 71 – Do lado esquerdo da interface aparece a imagem de infravermelho de uma ferramenta nova	81
FIGURA 72 – Cálculo do histograma de primeira ordem e extração de características	81
FIGURA 73 – Do lado esquerdo da interface aparece a imagem de infravermelho de uma ferramenta no estado intermediário de desgaste	82
FIGURA 74 – Cálculo do histograma de primeira ordem e extração de características	82
FIGURA 75 – Do lado esquerdo da interface aparece a imagem de infravermelho de uma ferramenta próxima do fim da vida	83
FIGURA 76 – Cálculo do histograma de primeira ordem e extração de características	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - <i>Fuzzy Sets</i> de entrada e respectivas <i>Membership Functions</i>	52
TABELA 2 - Médias de valores para as características	57
TABELA 3 - Frequência em função dos tons de cinza: Ferramenta nova	61
TABELA 4 - Frequência em função dos tons de cinza: Ferramenta nova	66
TABELA 5 - <i>Membership functions</i> de desgaste	64
TABELA 6 - Regras de inferência <i>fuzzy</i> para o desgaste	66
TABELA 7 - Temperaturas em função do desgaste	75
TABELA 8 - Características extraídas de imagens de infravermelho de ferramentas de desgastes conhecidos e respostas obtidas pelo sistema de inferência <i>fuzzy</i> : grau de desgaste da ferramenta	84
TABELA 9 - Validação do sistema proposto	84

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

f.e.m. – Força Eletromotriz

fft – Fast Fourier Transform

HSM – High Speed Machining

HSC – High Speed Cutting

TCM – Tool Condition Monitoring System

RESUMO

[Durante o processo de usinagem, o conhecimento da temperatura é um dos fatores mais importante na análise do estado da ferramenta. Permite o controle dos fatores mais importantes que influenciam, no uso, na vida e no desgaste da ferramenta. A temperatura na região de contato entre a peça e a ferramenta é resultante do processo de remoção de material durante a operação de corte e é difícil de se obter uma vez que, ou a peça, ou a ferramenta estão em movimento. Uma maneira de se medir a temperatura nessa situação é detectando a radiação de infravermelho. Este trabalho tem objetivo de apresentar uma nova metodologia de diagnóstico e monitoramento de operações de usinagem com o uso de imagens de infravermelho. A imagem de infravermelho fornece um mapa em tons de cinza da temperatura dos elementos participantes do processo: ferramenta, peça e cavaco. Cada tom de cinza na imagem corresponde a uma temperatura para cada material. A correspondência entre tons de cinza e a temperatura é dada pela prévia calibração da câmera de infravermelho para os materiais participantes do processo. O sistema desenvolvido neste trabalho usa uma câmera de infravermelho, uma *frame grabber* e um software composto por 3 módulos: O primeiro módulo faz a aquisição da imagem de infravermelho e o processamento; o segundo módulo faz a extração e o cálculo do vetor de características das imagens. Finalmente o terceiro módulo usa um algoritmo *fuzzy* e fornece como saída o diagnóstico do estado da ferramenta.

Palavras chave: ferramentas, desgaste, imagens de infravermelho, diagnóstico, lógica *fuzzy*.

ABSTRACT

During machining process the temperature knowledge is one of the most important factors in tool analysis. It allows to control main factors that influence tool use, life time and wear. The temperature in the contact area between the work piece and the tool is resulting from the material removal in cutting operation and it is too difficult to be obtained because the tool, or the work piece is in motion. One way to measure the temperature in this situation is detecting the infrared radiation. This work presents a new methodology for diagnosis and monitoring of machining processes with the use of infrared images. The infrared image provides a map in gray tones of the elements temperature in the process: tool, work piece and chips. Each gray tone corresponds to a certain temperature for each one of those materials and the relationship between the gray tones and the temperature is given by previous infrared camera calibration. The system developed in this work uses an infrared camera, a frame grabber board and a software composed by three modules. The first module provides the image acquisition and processing. The second one does the image feature extraction and calculates the feature vector. Finally, the third module uses fuzzy logic to evaluate the feature vector and to supply the tool state diagnostic as output.

Key words: tool wear, infrared image, computer aided diagnosis, fuzzy logic.

ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado da seguinte maneira:

No capítulo um é apresentado o problema do desgaste, sua relação com a temperatura e sua importância para a automação dos processos de usinagem. O segundo capítulo situa o desgaste dentro do sistema de manufatura e apresenta uma revisão bibliográfica sobre operações de corte. No terceiro capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre tópicos de visão computacional.

O desenvolvimento do trabalho é apresentado no quarto capítulo onde são tratados os seguintes tópicos: calibração da câmera de infravermelho para a medida da temperatura durante os processos de usinagem, desenvolvimento de algoritmos para a extração de características das imagens de infravermelho e interfaces para a medição, desenvolvimento do algoritmo *fuzzy* envolvendo a determinação dos *fuzzy sets*, funções de pertinência e regras de inferência. No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos: curvas de calibração da câmera de infravermelho, comportamento da temperatura com o desgaste e o sistema de inferência *fuzzy*, seu funcionamento e a sua validação. No sexto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O conhecimento do estado da ferramenta durante o processo de usinagem é condição necessária para a automação dos sistemas de manufatura. A medida da temperatura durante o corte é um importante fator na investigação do uso de ferramentas, permite controlar as variáveis que influenciam no uso, na vida e no desgaste (CASTO *et al* 1994).

A temperatura ainda pode influenciar a precisão da máquina e a rugosidade superficial do acabamento (AY, H.; YANG, W. 1997), (KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G. 1997), (SILVA, M.B.; WALLBANK, J. 1999), (KOULING, W. 1983).

[A contínua necessidade de aumento das velocidades de corte em processos de usinagem de alto desempenho tem impulsionado pesquisas de novos materiais resistentes a altas temperaturas assim como estudos da maximização da taxa de remoção de material (D'ERRICO, G.E. 1998).

Uma das consequências do aumento da velocidade de corte é o aumento da temperatura e a ativação dos mecanismos de desgaste (ABRÃO *et al* 1996), (D'ERRICO, G.E. 1998).

Segundo UEDA, T. *et al* (1998), altas temperaturas aceleram o processo de desgaste da ferramenta de corte, causam deterioração na integridade da superfície da peça e na acuracidade do corte, acarretando a diminuição da vida.

O desgaste da ferramenta é responsável em média por 65% das falhas ocorridas durante o processo de usinagem.

A automação dos sistemas de manufatura depende da correta medida do desgaste da ferramenta (ELZER, J.; PFEIFER.T 1990).

Desta maneira, a automação dos processos de usinagem fica dependente do monitoramento eficaz da temperatura.

Trabalhos que relacionaram o estudo da temperatura e monitoramento tentam resolver o problema.

D'ERRICO, G.E.(1998) propõe um sistema de controle adaptativo que funciona com *feedback* em tempo real. A temperatura de corte é estimada através f.e.m. medida em um termopar inserido na ponta da ferramenta conforme mostra a figura 1.

FIGURA 1 - Método do termopar (D'ERRICO 1998).

CASTO *et al* (1994) propõem o uso de pós metálicos com pontos de fusão conhecidos para a investigação da evolução das temperaturas em ferramentas de cerâmica. As figuras 2 e 3 mostram linhas demarcando a fusão de diferentes metais.

FIGURA 2 - Linhas demarcando a fusão dos diferentes pós metálicos para diferentes condições de usinagem: $f=0.25$ mm/r, a) $V=5.5$ m/s, b) $V=7.8$ m/s, c) $V=11$ m/s (CASTO *et al* 1994).

FIGURA 3 – Distribuição de temperaturas no inserto (CASTO *et al* 1994).

A análise dos dados e a determinação da distribuição da temperatura ao longo do material são realizadas pelo método dos elementos finitos. Posteriormente ainda é feita a verificação da micro estrutura da ferramenta em microscopia eletrônica.

DEWES, R.C. *et al* (1999) medem a temperatura de processos em HSM com o uso de termopares e uma câmera de infravermelho. HSM são máquinas que alcançam altas velocidades de corte (HSC), condições diferentes das usadas em máquinas convencionais. Uma das técnicas adotadas pelo autor é a do termopar de arame isolado. Essa técnica também é citada por UEDA, T. *et al* (1998), SILVA, M.B; WALLBANK, J.(1999). Um arame coberto de teflon (55% cobre e 45% níquel) é colocado dentro da peça de trabalho e ligado a um sistema de aquisição de sinais. Durante a operação de corte é rompida a isolação e é formada uma junção a

quente instantânea entre o arame e o material da peça. A figura 4 ilustra a seqüência de corte. Através da medida da f.e.m gerada e da calibração do sistema pode-se determinar a temperatura na região de corte.

FIGURA 4 – Termopar de arame (junção instantânea) DEWES, R.C. *et al* (1999).

AY, H.; YANG, W.; WANG, J.A.(1994) propõem o uso de um conjunto de termopares extrafinos conectados na extremidade de corte da ferramenta. Os termopares são conectados a um sistema de aquisição de dados para obtenção das variações das temperaturas em diferentes pontos da ferramenta durante o processo de corte. Em outra publicação, AY, H., usa um sistema termográfico em sincronismo com um conjunto de termopares para análise das variáveis durante o processo de usinagem (AY, H.; YANG, W. 1997). O sistema fornece informações em forma de termogramas possibilitando a investigação de como a transferência de calor pode afetar a vida, o uso e o desgaste da ferramenta.

KOULING, W.(1983), usa um sensor de infravermelho para medir a temperatura da superfície da ferramenta em processos de usinagem. Segundo o autor, o conhecimento dessa temperatura permite o controle acurado do processo e otimização no processamento dos metais. O autor afirma que os dados experimentais obtidos são consistentes quando comparados com a teoria de corte, sendo um método ideal para a medida da temperatura.

ABRÃO, A. M. *et al* (1996) comparam medidas obtidas por 3 diferentes técnicas: termopares implantados na ferramenta, termopares implantados na peça de trabalho e um pirômetro de infravermelho. A figura 5 mostra as curvas de temperaturas em função da velocidade de corte obtidas com o uso das técnicas propostas. Os autores chegam a diferentes medidas para cada uma das técnicas

usadas e atribuem esse fato à calibração, tanto do termopar quanto dos sensores de infravermelho, à superfície de contato do termopar com a superfície a ser medida e ao aparecimento de camadas de óxido sobre os materiais durante a calibração. Os autores sugerem que a calibração seja feita em um ambiente inerte ou vácuo, mas esses ambientes não reproduzem o ambiente onde ocorre a usinagem.

FIGURA 5 – Medida da temperatura: método do infravermelho, método do termopar ferramenta/cavaco(*tool/chip*), método do termopar implantado ABRÃO, A.M. *et al* (1996).

UEDA, T. *et al* (1998) investigam a temperatura na face inclinada de ferramentas de diamante em processos de torneamento através do uso de um pirômetro de infravermelho de duas cores. Segundo os autores, é muito difícil medir a temperatura em ferramentas de diamante devido a suas propriedades físicas. A técnica ferramenta/cavaco não pode ser aplicada pois o diamante é um isolante elétrico. O termopar também não pode ser inserido dentro do diamante pois este material não pode ser furado. O espectro de infravermelho da região de corte é transmitido através de uma fibra óptica até os sensores de infravermelho. A temperatura é calculada através da f.e.m nos terminais do sensor. A figura 6 mostra a montagem utilizada.

FIGURA 6 – Uso do pirômetro de infravermelho de duas cores para detecção da temperatura em processos de torneamento com ferramenta de diamante, UEDA, T. *et al* (1998).

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é obter o diagnóstico do estado de desgaste da ferramenta em operações de torneamento de alto desempenho através do processamento de imagens de infravermelho.

Para este fim, foi desenvolvido um sistema que usa uma câmera de infravermelho, um microcomputador do tipo PC, uma placa *frame grabber* e um *software* composto de três módulos.

O primeiro módulo fornece uma interface gráfica que possibilita ao usuário a visualização de isotermas das imagens capturadas pela câmera de infravermelho. A interface possibilita a análise pontual das temperaturas em diferentes regiões do conjunto peça, ferramenta e cavaco, em especial na região de contato peça, ferramenta e cavaco.

O segundo módulo executa o cálculo do histograma de primeira ordem das imagens e a extração de características estatísticas.

O terceiro módulo faz a avaliação das características e fornece como saída um índice correspondente ao diagnóstico do estado de desgaste da ferramenta. A metodologia é baseada na lógica *fuzzy* e fornece suporte para implementação de mecanismos de controle do processo e tomada de decisões, um dos requisitos para a automação dos sistemas de manufatura.

CAPÍTULO 2

USINAGEM

Usinagem é um termo genérico designado para descrever o processo de remoção de material de uma peça e pode ser subdividido em três categorias: processos de corte, processos abrasivos e processos de usinagem não convencionais (KALPAKJIAN, S.1991). O torneamento é um processo de corte em que a ferramenta remove material da peça em forma de cavaco. A figura 7 ilustra essa operação.

FIGURA 7 – Operação de torneamento (KALPAKJIAN, S.1991).

Segundo KALPAKJIAN, S.(1967), no estudo eficiente de uma operação de usinagem devem ser considerados os elementos ferramenta, cavaco e peça como partes de um sistema.

Em outra publicação KALPAKJIAN, S.(1991), divide as variáveis que participam do processo de corte como variáveis independentes e dependentes. As variáveis independentes são aquelas que o operador pode intervir. Variáveis dependentes são variáveis que sofrem influência pela mudança das variáveis independentes. A figura 8 mostra os dois tipos de variáveis.

Figura 8. Variáveis independentes e variáveis dependentes em operações de corte.

Uma maneira de controlar o processo é atuar diretamente nas variáveis independentes e medir seus efeitos através da medida de uma ou de um conjunto de variáveis dependentes.

Vários trabalhos têm sido feitos em busca de variáveis dependentes significativas dentro dos processos de corte: temperatura, emissão acústica, forças de corte entre outras (ABRÃO A.M. 1996), (CASTO *et al* 1994), (AY, H.; YANG, W. 1997), (D'ERRICO, G.E. 1998). Através de uma ou de um conjunto dessas variáveis pode-se detectar a quebra da ferramenta durante o processo, determinar as condições

ideais para a usinagem de um determinado material com um melhor aproveitamento da ferramenta de corte e aumentar a taxa de remoção de material.

O aumento da taxa de remoção de material significa maior quantidade de material sendo cortado, maior produção de cavaco, maior velocidade de corte, avanço, profundidade de corte (SILVA, M.B.; WALLBANK 1999).

Aumento da taxa de remoção de material implica no aumento da produção, porém exige maior potência da máquina ferramenta destinada ao corte, o aumento da pressão e do calor dissipado nas regiões próximas da arestas de corte, e consequentemente o aumento do desgaste da ferramenta.

Segundo KALPAKJIAN, S.(1991), a energia dissipada na remoção de material é convertida em calor na região de corte e varia com as condições de usinagem do material, tipo de ferramenta entre outros. O conhecimento da temperatura nessa região é um indicador do estado da ferramenta durante o processo. A figura 9 mostra a distribuição da temperatura na área de corte.

FIGURA 9 - Distribuição da temperatura na área de corte (KALPAKJIAN, S.1991).

Este trabalho mostra nos capítulos seguintes que as características extraídas das imagens de infravermelho variam com o tipo de operação, condições de usinagem, materiais e o estado da ferramenta, por isso são tratadas como variáveis dependentes. Um vetor composto por um conjunto dessas características foi usado para definir padrões necessários ao monitoramento do estado da ferramenta.

2.1 O Mecanismo de Formação do Cavaco

Processos de corte como torneamento, fresamento, furação, brochamento, removem material da peça, formando o cavaco. O mecanismo de formação do cavaco para esses processos é o mesmo: a ferramenta a uma certa velocidade e profundidade avança sobre a superfície do material executando o corte.

Durante o processo de formação do cavaco, aparecem 3 fontes distintas de calor. A primeira fonte de calor é na região de cisalhamento, onde ocorre deformação plástica e ruptura do material que está sendo usinado, esta fonte afeta todo o volume de cavaco formado (ponto A na figura 10). A segunda fonte de calor é devido ao deslizamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta, esta fonte afeta uma parte do cavaco e uma parte da superfície da ferramenta (ponto C figura 10). A terceira fonte de calor é onde ocorre o atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho, esta fonte afeta parte da superfície de incidência da ferramenta e toda a superfície usinada da peça (ponto B figura 10) FERRARESI, D. (1970).

Estudos da estrutura microscópica do cavaco revelaram que no corte ortogonal, devido à face inclinada da ferramenta, o cavaco deforma-se, quebra-se, dividindo-se em várias camadas sobrepostas. Isso ocorre pois, abaixo do plano de cisalhamento, a peça é indeformável e logo acima estão os feixes de cavaco recentemente formados. A região onde há deformação é também chamada de zona primária de corte enquanto que a região onde há fricção cavaco-ferramenta é chamada zona secundária de corte. A figura 10 mostra o ângulo α da inclinação da face da ferramenta e o ângulo ϕ , denominado ângulo de cisalhamento. Nesse mecanismo pode-se notar que com a velocidade relativa, existe a fricção interna entre camadas adjacentes do cavaco, entre o cavaco e ferramenta e entre a ferramenta e a peça (KALPAKJIAN, S.1991).

Nos processos de remoção de material, além da formação do cavaco cisalhado, pode-se observar a formação de outros tipos de cavaco como o cavaco contínuo FERRARESI, D. (1970), os quais não entraremos em detalhes. Segundo esse autor, a análise do cavaco permite ao operador tirar várias informações sobre o processo de usinagem muito usado no chão de fábrica.

FIGURA 10 – Mecanismo de formação do cavaco (KALPAKJIAN, S.1991).

A quantidade do calor gerado na operação de corte e o formato do cavaco estão intimamente ligados à geometria da ferramenta, à qualidade de acabamento superficial da peça, ao estado da superfície da ferramenta entre outros.

2.2 Geração de Calor na Ferramenta de Corte

Segundo SILVA, M.B.; WALLBANK, J (1999), o trabalho gerado na região de corte é convertido em calor devido à fricção. O trabalho total dedicado ao processo de corte pode ser dividido em três quantidades:

- i) o trabalho para cortar o material, para formar o cavaco e a nova superfície;
- ii) o trabalho para mover o cavaco sobre a superfície inclinada da ferramenta;
- iii) o trabalho necessário para mover a superfície recém cortada sobre a superfície do flanco da ferramenta.

O trabalho necessário para cortar o material e formar o cavaco em i) envolve a dissipação de calor resultante da fricção interna enquanto os outros dois ii) e iii) são resultantes da fricção entre a ferramenta e o cavaco, ou a peça de trabalho.

O trabalho dependerá do material a ser cortado, sua ductilidade, dureza e também de suas propriedades térmicas. Estas propriedades juntamente com as propriedades e características da ferramenta de corte como a geometria e as condições de usinagem definem os esforços sobre a ferramenta, a potência e a geração de calor.

Durante o corte, o calor é gerado nas zonas primárias e secundárias devido a deformações plásticas do material da peça e também na interface ferramenta/cavaco (face inclinada e face do flanco) devido à fricção. A maior parte do calor gerado é escoado com a saída do cavaco sendo que o restante é conduzido através da ferramenta de corte e a peça (ABRÃO, A.M. *et al* 1996).

BARROW, G. (1973) constatou experimentalmente, através do uso de termopares, que os maiores responsáveis pelo aumento da temperatura na região de contato entre os materiais durante a usinagem são: a velocidade de corte, seguida pelo avanço e posteriormente pela profundidade de corte.

Embora o aumento da temperatura acelere o processo de desgaste e seja um limitante para o aumento da taxa de remoção de material, o calor na zona de corte diminui a resistência do material da peça, facilitando o processo de corte.

Segundo STEPHENSON, D.A.(1991) durante o corte há duas regiões: zona de deformação e zona de contato (figura 11). A temperatura na zona de deformação afeta as propriedades mecânicas da peça uma vez que o calor passa dessa região direto para a peça. A distribuição da temperatura na peça dependerá das condições da zona de deformação. A temperatura de contato na face inclinada afeta na fricção e na vida da ferramenta de corte. O calor gerado nesta região é conduzido para dentro da ferramenta ou é transportado para fora através do cavaco.

FIGURA 11 –Zona de deformação e zona de contato (STEPHENSON, D.A.1991).

2.3 A Ferramenta de Corte

A eficiência da operação de usinagem depende da escolha da pastilha correta. Segundo KARBI, K.(1996) é estimado pela indústria de carbeto que 80% de todas as pastilhas são mal aplicadas. Na figura 12a, 12b e 12c pode-se ver alguns tipos de pastilhas.

FIGURAS 12a, 12b e 12c - Pastilhas com várias formas, quebra cavacos (KALPAKJIAN, S.1991), sistema de ferramentas T-MAX P Sandvik para torneamento de acabamento, família de ferramentas Sandvik, SANDVIK (1997).

O desempenho da ferramenta é dado pela soma de partes iguais de confiabilidade, previsibilidade, e produtividade (KARBI, K. 1996).

As ferramentas de usinagem têm evoluído ainda mais que as máquinas ferramentas, não só na forma mas também em sua própria estrutura para a solução de problemas decorrentes da ação de forças mecânicas, do calor e do desgaste (MARCONDES, F.C. 1990).

As ferramentas possuem cinco características básicas (KARBI, 1996), (LUCAS, S.R. 1997): substrato, revestimento, quebra-cavacos, aresta e formato. O substrato forma o corpo da ferramenta; é composto por partículas de carbeto de tungstênio unidas por um ligante a base de cobalto. A quantidade de ligante torna o material mais tenaz ou mais frágil possibilitando a produção de ferramentas com arestas duras e núcleos moles. Em conjunto com o revestimento, o substrato determina a capacidade de velocidade da pastilha, fornece resistência ao calor, resistência ao desgaste, conferindo ao material da pastilha características de tenacidade.

O revestimento é uma película composta por carbeto de titânio (TiC) que é aplicada sobre o substrato. O revestimento confere à ferramenta a resistência ao desgaste, lubricidade, isolamento térmico e resistência ao ataque químico pelo material da peça e, dependendo da aplicação, ainda pode ser constituído de nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN) ou ainda óxido de alumínio (Al_2O_3). Os revestimentos de óxido de alumínio são os mais usados para aplicações em altas velocidades. A figura 13 extraída de Sham,D. *et al* (1996) mostra as camadas de revestimento de uma pastilha de corte.

FIGURA 13 - Camadas isolantes de calor protegem de excesso de aquecimento o material do substrato de uma pastilha de corte de metal duro Sham,D. *et al* (1996).

O quebra-cavaco é usado para romper o cavaco antes que o mesmo cause danos no corpo da ferramenta, máquina, peça e operador. Pode influenciar nas forças de corte, vida útil e desempenho da pastilha, determinando a sua capacidade de avanço e profundidade de corte.

A aresta é a parte da ferramenta responsável pelo corte; quanto mais agudo o fio de corte mais facilmente é a remoção do cavaco. Uma ferramenta com fio mais

arredondado necessita de uma maior força, porém, possui um fio de corte mais resistente.

A forma da pastilha, geometria e tamanho, variam de acordo com o tipo de operação: torneamento interno ou externo, roscamento, canais e furação.

A melhor pastilha para uma aplicação é aquela que fornece vida útil confiável da ferramenta e controle do cavaco em conjunto com formas de cavacos e falhas previsíveis (KARBI, K.1996).

Segundo ROZENFELD (1992), a especificação de ferramentas é uma função do planejamento do processo que está intimamente ligada a determinação dos dados organizacionais, peça em bruto, seqüências, maquinário, sub-operações, programa CN, condições de usinagem e cálculo de tempos.

Neste nosso trabalho o conhecimento da composição da ferramenta de corte é de fundamental importância para a determinação da temperatura sobre a mesma. Diferentes materiais têm diferentes emissividades entre outras características a serem consideradas. A radiação de calor é feita pelo material na superfície da ferramenta, ou seja, pelo revestimento.

Uma outra variável deve ser considerada no processo de usinagem: o líquido refrigerante.

O uso do líquido refrigerante habilita o alto desempenho nas operações de usinagem, é importante para que a ferramenta alcance a vida prescrita pelo fabricante e sua principal função é absorver a geração de calor da área de corte KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G.(1997). Porém, o uso do líquido refrigerante acarreta problemas ecológicos, gera choques térmicos, entre outros. Por isso a “usinagem a seco” associada a altas taxas de remoção de material e otimização da ferramenta tem sido estudada como método de usinagem de alto desempenho.

Novos materiais de alta tenacidade, dureza, resistentes a altas temperaturas, têm sido desenvolvidos possibilitando a produção de ferramentas especiais com revestimentos, substratos, quebra-cavacos, forma, geometria e arestas para trabalhar nos mais diversos ambientes, com pouco ou até mesmo sem o líquido refrigerante.

Devido aos problemas relatados com relação ao uso do líquido refrigerante, as operações de usinagem especificadas neste trabalho são a seco.

2.4 O Mecanismo de Desgaste da Ferramenta

Desde 1907, com os trabalhos de TAYLOR, F.J.(1907), sabe-se que o aumento da velocidade de corte acarreta a diminuição da vida da ferramenta e o desgaste.

A eficiência da ferramenta está ligada a mecanismos de desgaste que são ativados com o aumento da temperatura na interface entre a aresta de corte e a peça.

A vida da ferramenta L e a temperatura ϑ_c na aresta de corte podem ser relacionadas pela equação 1 (D'ERRICO, G.E. 1998):

$$L = c_L \cdot \vartheta_c^m \quad (1)$$

onde

$m > 0$ e $c_L < 0$ são parâmetros dependentes da combinação da ferramenta e peça de trabalho.

AY, H *et al*(1997) constataram que houve aumento da temperatura de usinagem com o desgaste da ferramenta. A figura 14 mostra o gráfico com medidas de temperatura de 9 termopares (TC1 –TC9) colocados em lugares diferentes da ferramenta de corte.

FIGURA 14 – Variação da temperatura com o desgaste da ferramenta (AY *et al* 1997).

YOUNG, H. T. (1996), afirma que o maior obstáculo para a automação dos centros de usinagem é a falta de sistemas de monitoramento da ferramenta.

O desgaste da ferramenta de corte define a vida da ferramenta e está

intimamente ligado à qualidade de acabamento: degradação da superfície de acabamento e acuracidade dimensional.

Segundo FERRARESI, D. (1970), a partir do gráfico do desgaste em função da velocidade de corte crescente, para uma dada combinação da velocidade de corte e avanço, existe um desgaste mínimo da ferramenta. O mecanismo de desgaste à esquerda é diferente do mecanismo à direita do mínimo, ponto C da figura 15.

FIGURA 15 – Participação das diferentes componentes no desgaste da ferramenta FERRARESI, D. (1970).

Em baixas velocidades de corte o desgaste de ferramentas de metal duro é elevado devido ao cisalhamento da aresta postiça de corte. Em velocidades de corte maiores, o desgaste é causado principalmente por fatores cuja intensidade depende da temperatura de corte tais como a abrasão mecânica, difusão intermetálica e a oxidação. A figura 15 mostra a contribuição de cada um dos componentes no desgaste total da ferramenta: a – deformação da aresta de corte, b – abrasão mecânica, c- cisalhamento da aresta postiça de corte, d – difusão, e – oxidação, f – resultante.

A aresta postiça de corte, predominante em baixas velocidades, desempenha um papel decisivo no desgaste da ferramenta e é constituída por partículas do material usinado de alta dureza e que se acumulam na superfície de saída da ferramenta. A aresta postiça de corte altera as relações geométricas do cavaco, desempenhando a função da aresta de corte (figura 16a).

FIGURA 16 a – Aresta postiza de corte e variações nas microdurezas $HV_{0,1}$ [Kg/mm^2] na aresta postiza e na raiz do cavaco (FERRARESI, D. 1970).

O desgaste da superfície de folga da ferramenta após um tempo de usinagem constante varia em função da velocidade de corte. Em baixas velocidades de corte, a aresta postiza de corte permanece inalterada aderindo à superfície da ferramenta. Com o aumento da velocidade de corte, a aresta postiza de corte entra em regime transitório desaparecendo e aparecendo periodicamente. No regime transitório, ocorre o índice máximo de desgaste, predominantemente desgaste adesivo. Aumentado-se mais a velocidade de corte, a aresta postiza de corte vai desaparecendo e diminuindo o índice de desgaste formado um vale, zona de mínimo desgaste. Aumentando-se ainda mais a velocidade de corte é ativado outro mecanismo de desgaste: o desgaste abrasivo mostrado na figura 16 b.

Figura 16 b – Efeito da aresta postiza de corte nos mecanismos de desgaste adesivo e abrasivo FERRARESI,D.(1970).

SARACIBAR, C.A.; CHIUMENTI, M.(1999) também afirmam que os 2 tipos de desgastes abrasivo e adesivo são identificados como os mecanismos mais importantes nos processos de fabricação.

O comportamento friccional da superfície de dois corpos, estando um deslizando sobre o outro, depende da tribologia das superfícies em contato, dureza, geometria da micro aspereza, revestimento, assim como fatores ligados ao ambiente tais como a lubrificação. Essas condições de estado das superfícies em contato são dinâmicas, estão em constante mudança devido ao fenômeno complexo de deslizamento e desgaste, envolvendo deformação de micro asperezas, desgaste do revestimento, tensões internas e reações químicas.

Regiões críticas estão sujeitas a grandes pressões, cantos estão sujeitos a fissuras, arestas estão sujeitas a altas temperaturas e regiões de saída do cavaco estão sujeitas a intenso deslizamento de materiais.

Investigações mostram que o desgaste de arestas e cantos é o principal causador das falhas e responsável pelo atrito.

O desgaste é proporcional à dureza do material da peça, quantidade de partículas na superfície da peça, sua dureza e força de adesão e é inversamente proporcional à dureza do material da ferramenta a uma determinada temperatura da superfície durante o processo.

Devido a rugosidade das superfícies e asperezas, quando uma superfície é fortemente pressionada contra a outra, há deformação plástica das micro asperezas. Este efeito somado ao aumento da temperatura local causado pelo deslizamento do cavaco, produz a solda das micro asperezas da ferramenta na superfície do cavaco. Desse modo, a superfície da ferramenta vai se degradando com o decorrer do processo de usinagem.

No mecanismo de *desgaste adesivo* ocorre a transferência de porções de um material para a superfície do outro. A adesão de partículas de um material no outro se dá devido às altas pressões ou quando agentes químicos oxidam a superfície da ferramenta tornando-a vulnerável à ação do cavaco. Em altas velocidades a alta pressão é aliviada mas, por outro lado há o fluxo de deslizamento do cavaco e o desgaste. O comprimento do deslizamento (quantidade de material passando em um ponto da superfície) é o fator mais importante na estimativa do desgaste por fricção

devido à sua grande influência na geração do calor.

O mecanismo de *desgaste abrasivo* ocorre quando a aspereza do material mais duro produz fendas no material menos duro durante o movimento relativo ou quando a fenda é feita por uma partícula dura. Essas partículas que causam a abrasão, ou são do próprio material da peça, ou são produzidas durante o desgaste adesivo.

Segundo SARACIBAR, C.A.; CHIUMENTI, M.(1999), a lei do desgaste adesivo e abrasivo instantâneo é dada pela equação 2.

$$\dot{Z} = k_{wear} \left[\frac{q \cdot s}{H} \right] \quad (2)$$

Onde:

Z = volume de desgaste adesivo por unidade de área;

q = pressão normal local;

s = comprimento do deslizamento;

H = dureza local do material;

K_{wear} = constante experimental de desgaste (0 – 1).

O desgaste adesivo-abrasivo instantâneo é proporcional ao comprimento do deslizamento, e à pressão normal, e é inversamente proporcional a dureza local da superfície.

O mecanismo de desgaste adesivo dependerá principalmente da combinação dos materiais, condições da interface, lubrificante e temperatura.

O mecanismo de desgaste abrasivo dependerá principalmente da topologia da superfície, partículas duras entre as superfícies e lubrificantes.

Os fenômenos relacionados com o desgaste de ferramentas têm um importante impacto na indústria. Estatísticas mostram que o desgaste é o responsável pelos mecanismos de falha exercendo uma grande influência no custo da produção.

ABRÃO, A.M. *et al* (1996) afirmam que em operações de usinagem em ligas ferrosas em velocidades altas e moderadas são geradas altas temperaturas e o mecanismo de desgaste da ferramenta é ativado por mecanismos tais como difusão e dissolução. A deformação devido à tensão compressiva também tem parte na produção do calor nesta região.

A vida da ferramenta é usualmente expressa pelo número de peças que

podem ser produzidas antes que as dimensões das peças excedam as tolerâncias ou ocorram sérios problemas.

A seguir são relacionados diferentes tipos de desgaste e suas causas e possíveis soluções (MARCONDES, F.C. 1990), (DINIZ, A. *et al* 2000) (figuras 17a e 17b).

Esquema	Tipo de desgaste	Causa	Soluções
	Desgaste frontal (a) e de entalhe (b) e (c) Torneamento (ocasiona mau acabamento e superfícies fora de tolerância).	Velocidade de corte elevada, insuficiente resistência da pastilha ao desgaste.	Reduzir a velocidade de corte, empregar uma classe mais resistente ao desgaste.
	Desgaste por crateração Torneamento (Formação de crateras provoca o enfraquecimento da aresta, podendo romper, ocasionando um mau acabamento e aumento do consumo de potência).	A abrasão do cavaco na superfície de saída da pastilha e difusão atômica gerada por elevadas temperaturas nessa região.	Escolher uma geometria de corte mais positiva. Reduzir o avanço e a velocidade. Se a cratera estiver perto da aresta o aumento do avanço afasta a cratera do fio de corte.
	Desgaste por deformação plástica (a) e (b) Torneamento (deformações ou protuberâncias impostas ao fio de corte, provocam deficiência do controle do cavaco ou mau acabamento superficial, desgaste no flanco favorecendo quebra da aresta).	Temperatura de corte demasiadamente elevada combinada com uma grande pressão de corte ou força de avanço.	Empregar uma classe mais dura de ferramenta com mais resistência a deformações plásticas
	Aresta pustiça de corte Torneamento (acarreta mau acabamento e a quebra da aresta quando esta se desprende).	Resíduos de cavaco que estão sendo removidos soldando-se à aresta de corte devido à baixa velocidade de corte, geometria de corte negativa ou pouco positiva. Ocorre em alguns aços e alumínio.	Aumentar a velocidade de corte, selecionar uma geometria mais positiva. Aumentar consideravelmente a velocidade de corte. Para prolongar a vida da ferramenta aplicar líquido refrigerante.

FIGURA 17a – Tipos de desgaste, causas e possíveis soluções.

Esquema	Tipo de desgaste	Causa	Soluções
	Desgaste por lascamento Torneamento (São pequenas fraturas de aresta que provocam o mau acabamento da superfície e um desgaste do flanco excessivo).	Classe de metal duro demasiadamente frágil, aresta de corte pouco reforçada, ocorrência de aresta positiva.	Selecionar classe de metal duro mais tenaz. Escolher aresta de dorte mais robusta. Aumentar velocidade de corte ou escolher geometria mais positiva.
	Desgaste por trincas térmicas - Torneamento (pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte que causam o lascamento consequentemente mau acabamento e baixo rendimento).	As trincas térmicas são causadas por variações bruscas da temperatura provenientes de: torneamento intermitente, abastecimento irregular de líquido refrigerante.	Aplicar classe de metal duro mais tenaz. Com melhor resistência aos choques térmicos. Utilizar refrigeração em abundância ou eliminá-las por completo.
	Desgaste por quebras – Torneamento (Fraturas que não só ocasionam estragos na pastilha como também no porta-ferramentas e na própria peça).	Classe de metal duro muito rígida. Carga excessiva sobre a pastilha. Geometria de corte inadequada e frágil. Pastilhas com dimensões abaixo das recomendáveis.	Utilizar classe de metal duro mais tenaz. Reduzir o avanço e/ou a profundidade de corte. Selecionar uma geometria mais robusta, de preferência uma pastilha unifacial. Escolher uma pastilha mais espessa ou maior.

FIGURA 17b – Tipos de desgaste, causas e possíveis soluções.

2.5 A medida do Desgaste

A medida do desgaste da ferramenta é normalmente feita após a usinagem por intermédio de uma lupa ou microscópio de oficina. Esses instrumentos permitem a leitura do plano horizontal com resolução que varia de décimos até centésimos de milímetro. A medida da profundidade da cratera da superfície de saída da ferramenta é feita por perfilômetros registradores especiais. Para medidas de pequenos desgastes pode ser usada a técnica de mediada de desgaste por radioisótopos que é empregado geralmente em pastilhas de metal duro (FERRARESI, D. 1970).

ELZER, J.; PFEIFER, T (1990), desenvolveram um método baseado em visão computacional para análise do desgaste de ferramentas de furação. A operação de usinagem é interrompida, a ferramenta é tirada do processo e com uma câmera CCD são capturadas imagens da aresta de corte da mesma. Essas imagens passam

por um software que faz o processamento das imagens aplicando filtros extratores de bordas. Outro software calcula o diâmetro da região danificada relacionando-a com o desgaste.

CHOUDHURY, S.K.; RATH. S. (2000) desenvolveram um sistema para medir indiretamente o desgaste no flanco das ferramentas em processos de fresamento correlacionando-o com a força tangencial de corte e com os parâmetros de corte. Para que os sensores de força sejam utilizados nesse tipo de aplicação é necessário a construção de um suporte especial para a peça onde são colocados os sensores nas direções ortogonais x , y , e z . Segundo os autores o sistema mostrou-se confiável.

YOUNG, H.T.(1996) investigou indiretamente o mecanismo de desgaste do flanco da ferramenta através da medida da temperatura do cavaco usando um IR *Thermotracer*. O autor conclui através de curvas que o desgaste da ferramenta é fortemente dependente da temperatura.

Este nosso trabalho apresenta a medida do desgaste do flanco através de um conjunto de variáveis obtidas a partir das imagens de infravermelho do processo de corte.

2.6 A Medida da Temperatura Através da Radiação de Infravermelho

Durante o corte, o conjunto peça-ferramenta-cavaco emite sinais de diferentes comprimentos de onda produzindo calor, luz e som. A medida da temperatura corresponde à associação do nível de um determinado sinal a uma escala de temperaturas previamente especificada.

Estudos de transferência de calor têm sido direcionados para a determinação da distribuição da temperatura na região de contato entre a peça e a ferramenta, porém os maiores obstáculos têm sido as dificuldades físicas da medida e as incertezas envolvidas nos modelos teóricos (AY, H.; YANG, W. 1997).

SILVA, M.B.; WALLBANK(1999), apresentam uma revisão dos métodos experimentais e analíticos usados para medida de temperatura e afirmam que não há um método preciso de medida que possa ser usado para checar resultados analíticos.

Uma das maneiras mais usadas para se medir a temperatura é através de termopares.

Para que os termopares sejam usados no monitoramento é necessário que forneçam medidas precisas e instantâneas de temperatura. Para isso devem ser colocados bem próximos da aresta de corte onde está a fonte de calor.

O método de medida com o termopar é invasivo, o que implica em se fazer um pequeno furo na extremidade da ferramenta através de métodos de usinagem não convencionais ou furos simples em pontos da peça onde há interesse da medida.

A intrusão do termopar dentro da peça ou ferramenta acarreta seu posterior descarte.

Os termopares não podem ser colocados em contato direto com a peça ou a ferramenta quando uma ou outra está em movimento.

A velocidade de resposta do termopar depende da velocidade de propagação do calor no meio, já a onda eletromagnética da radiação infravermelho propaga-se na velocidade da luz.

Outro método de medida de temperatura para o monitoramento de condições de usinagem é através da medida da intensidade da radiação infravermelho.

O método de mediada da radiação de infravermelho é um método não invasivo e permite flexibilidade de posicionamento.

LIN, J. *et al* (1990) comparam curvas de medida de temperatura obtidas por um termopar e por um pirômetro em operações de torneamento. Os autores constatam que as amplitudes das medidas fornecidas pelo termopar são bem menores do que as amplitudes das medidas fornecidas pelo pirômetro e concluem que a diferença de níveis entre as curvas é devido à resistência térmica de contato entre o termopar e a superfície medida.

KUOLING, W.(1983) cita uma série de desvantagens no uso dos termopares e acrescenta que a termometria de infravermelho pode ser aplicada para o monitoramento da temperatura em vários processos: torneamento, fresamento, furação, retificação entre outros.

Embora os sensores de radiação infravermelho apresentem algumas vantagens sobre os de termopares, D'ERRICO, G.E.(1998) relata que faltam

sensores infravermelho confiáveis. Por outro lado AY, H.; e YANG, W.(1997) descrevem que em suas medidas obtiveram precisão de 1°C com o uso de sensores infravermelho comparados com a precisão de 1,4°C dos termopares.

Segundo BENEDICTT, O.(1978) o transporte de calor é o transporte de energia que ocorre devido a diferenças de temperaturas dividindo-se em três categorias: condução, convecção e radiação.

A condução de calor permite que os gradientes de temperatura gerados durante a usinagem, possam ser obtidos experimentalmente com o uso de termopares inseridos em diferentes locais da ferramenta de corte ou na peça de trabalho, porém os termopares devem ficar em contato com o objeto a ser medido.

A termometria com infravermelho é uma alternativa para a medida de temperaturas sem contato.

Segundo KOULIANG, W.(1983), o espectro de radiação de infravermelho está entre 0.76 a 1000 μm sendo que a faixa mais usada está entre 0.76 – 14 μm .

A propriedade eletromagnética do espectro de infravermelho, permite que o mesmo possa ser usado para a detecção rápida de anomalias durante o processo de corte, como a quebra da ferramenta.

O aumento da temperatura implica na diminuição do comprimento de onda do espectro. O montante de radiação infravermelho W emitida por um objeto aumenta na razão da quarta potência do aumento da temperatura T , depende de fatores ligados ao material e ao meio ambiente (ϵ e δ) e pode ser calculado pela lei de Stefan-Boltzman, conforme a equação 3, (SOLOMAN, S.1998).

$$W = \epsilon.\delta.T^4 \quad (3)$$

A imagem de infravermelho fornece uma mapa em tons de cinza de todos os materiais envolvidos no processo de usinagem: peça, ferramenta, cavaco, e o fluido refrigerante.

A luminosidade registrada por cada pixel na imagem corresponde a energia de pico para os comprimentos de onda do espectro de infravermelho provenientes das variações de temperatura durante a usinagem.

Para que o mapa de tons de cinza seja convertido em um mapa de temperaturas é necessário a calibração da câmera de infravermelho para os diferentes materiais participantes do processo.

Neste trabalho, a medida da temperatura na ferramenta, peça e cavaco é realizada experimentalmente através da análise pontual das imagens geradas pela câmera de infravermelho.

Para a medida da temperatura da superfície da ferramenta durante o processo de usinagem, KUOLINANG, W.(1983) sugeriu a calibração por comparação indireta da medida do sensor de infravermelho com a medida do termopar. Nesse tipo de calibração, a temperatura do termopar é associada a tensão nos terminais do sensor de infravermelho por intermédio de uma curva. Essa curva é a curva de calibração do sensor para o material da ferramenta. ABRÃO, A.M *et al*(1996) usaram o mesmo método de calibração dos sensores de infravermelho descrito anteriormente.

Embora as condições da superfície da ferramenta durante a calibração não sejam as mesmas condições em que se encontram os materiais durante o processo de corte, KUOLINANG, W.(1983) afirma que as medidas são confiáveis.

2.7 Sistemas para Monitoramento de Processos e Monitoramento do Desgaste da Ferramenta

Um dos avanços mais significativos dentro dos sistemas de manufatura avançada foi o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de ferramentas e de processos (JEMIELNIAK, K. (1999). O aumento da competitividade, o encarecimento da mão-de-obra humana e a demanda de qualidade tornaram o monitoramento dos sistemas de manufatura inevitável. O monitoramento de ferramentas e processos é condição necessária para a sua automação.

HUTTON, D.V.; HU F.(1999) desenvolveram um sistema para monitoramento do desgaste da ferramenta em processos de fresamento usando emissão acústica. Os autores relatam que o maior problema dessa técnica é o posicionamento do sensor para que os mesmos possam captar o ruído da ferramenta de corte durante o movimento, sem interferências. Concluem que através dos

resultados experimentais que o nível RMS do sinal aumenta com o desgaste do flanco.

LEE, J.M. *et al* (1994) e CHOI, D. *et al*(1999) desenvolveram um sistema para o monitoramento indireto do estado da ferramenta de corte (quebra) em operações de torneamento e fresamento. O sistema usa sensores de emissão acústica em conjunto com sensores piezoelétricos. Os dois sensores são necessários e complementares pois tanto a emissão acústica quanto a força de corte são características da máquina, podem levar a resultados incoerentes se analisadas separadamente. Quando há falha e quebra da ferramenta há um aumento repentino e queda na força de corte devido a separação das partes. Simultaneamente a isto nota-se um pico de emissão acústica que é proporcional à área da fratura, figura 19. Através de um algoritmo de redes neurais implementado em *hardware* é possível detectar a quebra da ferramenta com precisão.

FIGURA 19- Força de corte e Emissão Acústica (AE) na quebra da ferramenta (LEE, J.M. *et al* 1994).

YANMING, Q.; ZEHUA, Z.(2000) investigaram o desgaste da ferramenta com especial atenção na estrutura do material (compósitos). Os resultados experimentais mostraram que para ferramentas comuns, o maior responsável por danos no flanco é o desgaste abrasivo e para ferramentas de alta dureza, as quebras são devido à fragilidade. O volume friccional e o tamanho das partículas do compósito são os maiores responsáveis pela brevidade da vida da ferramenta. Os autores concluem que para o corte de compósitos a partir de um determinado

tamanho de partículas, devem ser usadas ferramentas de alta dureza enquanto que para pequenos tamanhos podem ser usadas ferramentas comuns ou de cerâmica.

MAKIS, V. (1999) desenvolveu um sistema analítico para controle do processo de desgaste da ferramenta em sistemas de produção como função de parâmetros previamente fornecidos por um sistema de monitoramento. O autor afirma que durante o longo período da produção, a ferramenta fica sujeita a falhas devido ao desgaste e aos choques randômicos, com isso a qualidade do produto cai resultando uma grande quantidade de itens produzidos fora das especificações. O sistema é aplicável em sistemas modernos de manufatura uma vez que encontra o tempo de parada ótimo para o processo.

JEMIELNIAK, K. (1999) fez um estudo dos sistemas destinados ao monitoramento de processos e ferramentas existentes. Segundo o autor, muitos sistemas estão em fase de estudo, outros estão em desenvolvimento, porém poucos são viáveis para aplicações industriais. Um sistema de monitoramento das condições da ferramenta, *tool condition monitoring system (TCM)*, consiste de sensores (transdutores de força, vibração, ultra-som, laser, câmeras dentre outros), condicionadores, amplificadores de sinal e um módulo supervisor.

FIGURA 20 – Modelo de um sistema de monitoramento TCM (JEMIELNIAK, K. 1999).

O módulo supervisor analisa o sinal dos sensores e fornece uma informação confiável para a detecção de falhas no processo e tomada de decisões. Na figura 20 pode ser visto um sistema TCM. Neste sistema, a estimativa de desgaste da ferramenta é feita por um módulo que usa sensores de força colocados nas direções x , y e z . Para uma maior confiabilidade do sistema, o autor recomenda que sejam usados mais que um tipo de sensor para monitoramento de um processo.

CAPÍTULO 3

PRINCÍPIOS DE VISÃO COMPUTACIONAL

Visão é a tarefa de decodificar informações luminosas do mundo exterior. Essas informações nos permitem entre outras coisas, identificar objetos, perceber cores e calcular distâncias.

O sistema visual humano é composto pelos olhos, pelos neurônios e pelo cérebro. O objetivo de um sistema visual de máquina é interpretar uma imagem, isto é, traduzir o mundo real em uma descrição simbólica e então interpretá-la (FRANÇA,C.A. 1994).

Figura 21 - Diagrama de blocos de um sistema visual.

Como é muito difícil reproduzir totalmente o sistema visual humano, um sistema de máquina é projetado para tarefas específicas, tais como: reconhecimento de objetos, inspeção visual, controle de processos.

Segundo NITZAN, D.(1988), a tarefa de visão da máquina pode ser dividida em quatro itens: tradução do sinal, pré-processamento, extração de características e interpretação das características (figura 21).

Na *tradução dos sinais*, os sensores são responsáveis em transformar a energia luminosa em sinais elétricos e a partir destes uma cena digitalizada pode ser montada num “buffer” de memória. Como exemplo de sensores visuais temos as câmeras CCD, os fotodiodos e as câmeras de infravermelho entre outros.

A tradução do sinal é um passo muito importante, pois o desempenho de qualquer programa de análise de cena está intimamente limitado pela natureza e qualidade dos dados de entrada (DUDA, R.O.; HART,P.E.H. 1979). Portanto, a iluminação da cena torna-se um elemento de fundamental importância na aquisição dos dados, sendo que seu objetivo é providenciar distinção adequada entre o fundo e o objeto e destacar as características relevantes deste (RUOCCO,S.R. 1987).

RODRIGUES, E. L.L (1998) e FRANÇA, C.A. (1999) desenvolveram um equipamento dedicado à aquisição de imagens de placas de madeira, para sua posterior classificação segundo critérios de qualidade. O equipamento mostrado na figura 22 fornece iluminação difusa e homogênea de superfícies evitando erros externos ao sistema possibilitando um maior índice de acerto na classificação.

FIGURA 22 – Equipamento para aquisição de imagens para a classificação de placas de madeira (RODRIGUES, E. L.L 1998) e (FRANÇA, C.A. 1999).

Nas imagens de infravermelho, a iluminação da cena corresponde à temperatura do meio ambiente.

O *pré-processamento* melhora o sinal que vem do sensor, podendo ser implementado em “software” ou “hardware”. Os filtros utilizados para eliminar ruídos e detetores de borda, segmentação, equalização, binarização dentre outros, são exemplos de rotinas de pré-processamento. O uso de filtros evita o processamento excessivo nas demais etapas do sistema e prepara a imagem para a extração de características.

A segmentação é um processo que divide o domínio espacial da imagem em um conjunto de regiões mutuamente exclusivas. Cada região é uniforme e homogênea em relação a alguma propriedade em comum, tal como tom ou textura e o valor de sua propriedade é de alguma maneira significativamente diferente do valor de cada região vizinha. O processo de segmentação que usa a intensidade da imagem como propriedade produz regiões que apresentam características tonais discretas (GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. 1993).

A segmentação é uma das técnicas mais importantes na análise automatizada de imagens porque é neste processo que objetos e outras entidades de interesse são extraídas da imagem para processamento posterior. Os algoritmos de segmentação geralmente baseiam-se em uma das duas propriedades básicas de valores de nível de cinza: descontinuidade ou similaridade; podem ser usadas técnicas como binarização, (*threshold*), crescimento de região (*region growing*) e estratégias “divide - e - une” (*splitting and merging*) (BALLARD, D.H; BROWN , C.M. 1982). A binarização significa dividir a imagem em dois tons com corte em um limiar pré estabelecido.

Nas imagens de infravermelho, o filtro de *threshold*, passa faixa e *region growing* foram usados para traçar as isothermas sendo que as isothermas nessas imagens representam regiões de mesmo tom de cinza.

Na fase de *extração de características* extraem-se as características relevantes do objeto e que melhor definam um modelo de entrada. Algumas são naturais sendo definidas pela aparência visual de uma imagem, enquanto outras são chamadas artificiais porque resultam de manipulação específica de uma imagem (PRATT, W.K. 1991).

Como características naturais tem-se a luminância de uma região de “pixels” e a escala de cinza de regiões de textura. Para características artificiais cita-se a amplitude do histograma e o espectro de frequência espacial.

A extração de características é fundamental para a descrição do modelo de entrada. Diminui a quantidade de variáveis na entrada do sistema uma vez que pode-se classificar os modelos através de um conjunto de características. A este conjunto dá-se o nome de vetor de características.

Durante a *Interpretação de características* tenta-se localizar no banco de dados ou no banco de conhecimento, aquelas características que mais se aproximam das características extraídas do objeto, para então compreender a cena e tomar uma decisão, seja ela de classificar ou controlar um processo.

3.1 Vetor de características

Raramente a decisão é realizada usando uma simples medida do modelo de entrada. Usualmente, várias medidas são necessárias para se distinguir adequadamente entradas que pertençam a diferentes categorias ou classes (BEALE,R.; JACKSON,T. 1990). O vetor de características reúne todas as medidas utilizadas num classificador e o número de elementos do vetor (n) cria um espaço de características n-dimensional.

O sucesso de um sistema visual depende, além de uma boa aquisição dos dados de entrada, da escolha das características. Boas características fornecem boas funções discriminantes entre classes.

Os três métodos usados em processamento para extrair características são: método estatístico, método estrutural e método espectral (GONZALES,R.C.; WINTZ,P. 1987). Neste trabalho usaremos o método estatístico.

O método estatístico descreve o modelo por regras estatísticas que governam a distribuição e a relação dos níveis de cinza. Esse método trabalha melhor com texturas naturais, uma vez que essas texturas possuem variações nas formas geométricas que compõe a imagem. Os dados estatísticos podem ser computados indiretamente através do histograma da imagem. A distribuição de probabilidade de

1ª. ordem da amplitude do histograma é definida pela equação 4 (PRATT, W.K. 1991):

$$P(b) = \frac{N(b)}{M} \quad (4)$$

Onde:

M – número total de “pixels” em uma janela

N(b) – quantidade de “pixels” de nível b na mesma janela

P(b) – quantidade de “pixels” normalizados no nível b.

Através do histograma, várias características podem ser extraídas, entre elas: média, desvio padrão, energia, entropia, momento, kurtose, entre outras (equações 5 a 9).

$$\text{Média: } S_M \equiv \bar{b} = \sum_{b=0}^{L-1} bP(b) \quad (5)$$

$$\text{Desvio padrão: } S_D = \left[\sum_{b=1}^{L-1} (b - \bar{b})^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{Kurtosis: } S_k = \frac{1}{\sigma_b^3} \sum_{b=0}^{L-1} (b - \bar{b})^4 P(b) - 3 \quad (7)$$

$$\text{Energia: } S_N = \sum_{b=0}^{L-1} [P(b)]^2 \quad (8)$$

$$\text{Entropia: } S_M = \sum_{b=0}^{L-1} P(b) \log_2 [P(b)] \quad (9)$$

Para escolher as melhores características, aquela que melhor descrevem o modelo de entrada, pode ser utilizado o método do erro de Bayes. Neste método é

calculada a área de sobreposição entre as funções densidades de probabilidades. A figura 23 ilustra este método. As áreas mais escuras da figura 23 ($R1$ e $R2$) fornecem o erro de Bayes e pode ser calculado pela equação 10.

$$\text{erro de Bayes} = \int_{-\infty}^T p(x/w2)P(w2) + \int_T^{+\infty} p(x/w1)P(w1) \quad (10)$$

Figura 23. Erro de Bayes envolvendo uma característica e duas classes.

3.2 Redes neurais e lógica *fuzzy*

As redes neurais e a lógica *fuzzy* estão sendo utilizadas cada vez mais em sistemas visuais para interpretar as características e tomar as decisões necessárias no processo. Uma das maiores características das redes neurais é sua habilidade de generalizar, isto é, classificar com sucesso modelos que não foram anteriormente apresentados (BEALE, R; JACKSON, T. 1990). Isso significa que tendo apresentado à rede uma gama larga de modelos no treinamento, qualquer novo modelo com entradas similares a um dos modelos treinados será bem classificado. Isso permite à rede trabalhar adequadamente com modelos que possam vir a ter ruídos, desde que os ruídos não venham a denegrir inteiramente o modelo.

O conjunto *fuzzy* foi inicialmente proposto por ZADEH, L.A. (1965) para ser uma extensão dos conjuntos clássicos. A utilidade desse conjunto reside na sua habilidade de modelar dados incertos ou ambíguos encontrados frequentemente na

vida real (PAL, S.K.; MITRA, S. 1992). Na teoria clássica um elemento pertence ou não a um determinado conjunto na teoria *fuzzy* o elemento pode pertencer, não pertencer ou estar parcialmente presente em um determinado conjunto (FRANÇA, C.A. 1999). Na lógica *fuzzy*, um certo elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto com um grau de inclusão ou um grau de pertinência (*membership degree*) que pode assumir valores entre 0 e 1 (KLIR & YUAN, 1995). O conjunto *fuzzy* permite representar conceitos vagos expressos na linguagem natural. A representação do conjunto *fuzzy* depende não somente do conceito, mas também do contexto no qual é utilizado (KLIR G.J.; YUAN, B. 1995). Assim, a temperatura alta no contexto de clima é diferente da temperatura alta no contexto da usinagem.

Formalmente um conjunto nebuloso A do universo de discurso Ω é definido por uma função de pertinência $\mu_A : \Omega \rightarrow [0,1]$. Esta função associa a cada elemento x de Ω o grau $\mu_A(x)$ com o qual x pertence A (ZADEH, L.A. 1965). A função de pertinência $\mu_A(x)$ indica o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A .

Os conjuntos clássicos podem ser vistos como um conjunto nebuloso específico denominado usualmente de *crisp set* para o qual $\mu_A : \Omega \rightarrow \{0,1\}$. A pertinência é tudo ou nada, sim ou não (SANDRI, S.;CORREA, C.1999).

Na representação *fuzzy*, $\mu_A : \Omega \rightarrow [0,1]$. Quando $0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x pertence parcialmente a A com grau de pertinência $\mu_A(x)$.

Assim, para expressar a idéia de que uma temperatura tem seu valor por volta de 25 graus, pode-se usar uma função de pertinência triangular com pico em 25, para sugerir a idéia de que quanto mais perto de 25, mais ela se identifica com o conceito representado (POLITANO, P.R. 1996) (figura 24).

FIGURA 24 - Representação de uma função de pertinência POLITANO, P.R. (1996).

NEVES, E.A. *et al* (2000) e NEVES E.A. (2000) desenvolveram um sistema *fuzzy* composto por 3 subsistemas para descrever atenção visual. O sistema é composto por 2 subsistemas de entrada os quais recebem características extraídas de uma determinada cena através de dois mapas de saliência e fornecem como resposta índices de saliência *bottom up* e *top down* respectivamente. Um terceiro subsistema faz a avaliação das respostas obtidas pelos 2 subsistemas anteriores e fornece como resposta o índice de atenção visual do objeto na cena. A figura 25 mostra os cena com os objetos avaliados e a figura 30 mostra uma visão geral dos 3 subsistemas.

FIGURA 25 – Cena contendo vários objetos (NEVES, E.A. *et al* 2000).

FIGURA 26 – Visão geral do sistema *fuzzy* de atenção visual desenvolvido.

Tanto as redes neurais quanto a lógica *fuzzy* podem ser implementadas em arquiteturas paralelas, o que implica em sistemas com processamento mais rápido.

CHANG, T.C.; CHEN, J.C.(1999) desenvolveram um sistema *fuzzy* para determinação da potência em máquinas CNC (controle numérico). A potência de corte de uma máquina CNC pode ser determinada por variáveis tais como velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte, dureza do material da ferramenta e dureza do material da peça. Os resultados mostram que o algoritmo *fuzzy* mostrou-se satisfatório dentro da escala de aplicação do sistema.

LOU,S.J.; CHEN, J.C.(1999) desenvolveram um sistema para determinação da rugosidade em superfícies em operações de fresamento de acabamento com o uso de algoritmos *neuro-fuzzy*. O sistema capta vibrações durante o processo através de um acelerômetro. Os resultados experimentais mostram a velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, e as variáveis resultantes das vibrações foram suficientes para a determinação da rugosidade com acuracidade de 96%.

GRABEC, I.; KULJANNIĆ, E. (1994) descrevem uma aplicação de redes neurais para o monitoramento de processos de manufatura.

Neste nosso trabalho são usadas variáveis extraídas de imagens de infravermelho durante processos de corte como entradas do sistema. Neste trabalho foram aplicados os conceitos de lógica fuzzy para a classificação dos padrões de ferramentas segundo características extraídas das imagens de infravermelho.

CAPÍTULO 4

Desenvolvimento

O desenvolvimento deste trabalho foi orientado ao monitoramento do estado de desgaste de ferramentas em processos de usinagem de alto desempenho. Para isso, o fenômeno do desgaste foi estudado a partir da literatura e através de experimentos com o objetivo de se determinar as melhores variáveis a serem consideradas na entrada do sistema para que pudessem fornecer como resposta um índice correspondente ao grau de desgaste da ferramenta. Para a análise dos experimentos foram usadas imagens de infravermelho, algoritmos de visão computacional e um algoritmo de tomada de decisões.

O hardware e o software envolvidos no sistema de monitoramento e diagnóstico do estado da ferramenta são em conjunto uma solução dedicada com funções específicas e com nível de automação para cumprir os seguintes requisitos: fornecer uma interface amigável com o usuário, ter grau de automação no cálculo das temperaturas em diferentes regiões e para diferentes materiais, mostrar as imagens da usinagem, mostrar as isotermas, automatizar a extração das características, automatizar a tomada de decisões.

4.1 Hardware

Para aquisição das imagens da usinagem foi usada uma câmera infravermelho AGA *Thermovision* 720 adaptada e acoplada a uma placa *frame grabber* DC30, fabricada pela *MÍROVIDEO*.

O desenvolvimento do software e o processamento das imagens e dos dados foram feitos em dois microcomputadores Pentium III, 450Mhz, 128 Mb de RAM, sendo que para a aquisição de dados foi usado o *Labview* em conjunto com *hardware* fabricado pela *National Instruments*.

A peça usada para os ensaios foi uma barra laminada de aço ABNT 1045 de 75mm de diâmetro e 600 mm de comprimento.

As ferramentas usadas nos ensaios foram insertos *Sandvik* WNMG 06 04 08-PM, P15 com porta ferramenta *Sandvik* MWLNL2525-06.

A máquina usada foi um torno INDEX GU-600, Potência: 22 Kw, rotação máxima: 5.000 rpm. Para as operações de torneamento, sub-operações de torneamento de desbaste a seco foram utilizados: profundidades de corte de 0,20 mm e 0,40 mm; avanços de 0,07 mm/r, 0,25 mm/r e 0,50 mm/r e velocidades de corte de 295 m/min, 396 m/min e 497m/min.

Foram utilizados filtros de densidade neutra com atenuações de 50% e 25% para evitar a saturação das imagens capturadas pela câmera.

A câmera infravermelho foi fixada a uma distância de 700 mm da ferramenta, em seguida foram estabelecidas as condições de usinagem. Porém, para a determinação das temperaturas foi necessária a calibração da câmera.

4.2 Calibração da câmera de infravermelho

Para a medida da temperatura através da medida da radiação de infravermelho é necessário considerar parâmetros como a emissividade do objeto, a distância do objeto até a câmera infravermelho, umidade relativa, temperatura atmosférica, temperatura refletida pelo ambiente (AY, H.; YANG, W. 1997) assim como características da superfície do objeto (SOLOMAN, S. 1998).

Reproduzindo-se as mesmas condições em que se encontravam a câmera, a peça, a ferramenta e o cavaco durante a usinagem, aqueceu-se amostras de materiais retiradas imediatamente após o processo de usinagem e traçou-se suas respectivas curvas de temperatura de resfriamento em função do tempo.

Para a medida da temperatura foi usado uma sonda contendo um termopar tipo K, conectado à amostra e ligado a um sistema de aquisição de dados (figura 27).

FIGURA 27 - Sonda contendo a amostra do material e ligada a um sistema de aquisição de sinais.

A sonda foi introduzida dentro de um forno e as amostras foram aquecidas até 900 °C (figura 28).

FIGURA 28 – Aquecimento das amostras dos materiais a 900 °C.

A câmera infravermelho foi usada para captar as imagens do resfriamento das amostras. Tais imagens foram posteriormente digitalizadas fornecendo imagens em tons de cinza pelo mesmo tempo de resfriamento das amostras (figura 29).

FIGURA 29 – Resfriamento das amostras - à esquerda sistema de aquisição de sinais
- à direita câmera de infravermelho.

Para a aquisição das imagens, em tons de cinza do material da amostra durante o tempo de resfriamento, foi desenvolvido um *software* cuja interface gráfica é mostrada na figura 30.

FIGURA 30 – Interface para medida dos tons de cinza das imagens de infravermelho das amostras.

Do lado esquerdo da interface é mostrada uma imagem de infravermelho da sonda, capturada pela câmera. Do lado direito é mostrado o vetor de tons de cinza e do tempo decorrido, esses dados são gravados em uma base de dados. Do lado esquerdo embaixo são mostrados controles de posicionamento do cursor para a leitura das imagens.

Através do processamento quadro a quadro das imagens do resfriamento, foi possível traçar as curvas de tons de cinza em função da temperatura para cada amostra.

Eliminando-se a variável tempo, obteve-se como resultado os gráficos relacionando tons de cinza com temperaturas. Estes gráficos foram usados para traçar a curvas de calibração da câmera para cada amostra. O esquema utilizado pode ser visto na figura 31.

Figura 31 - Calibração da câmera de infravermelho.

Para que a escala de temperaturas dos materiais durante o processo de usinagem não saturasse os tons de cinza das imagens capturadas pela câmera, foi usado um conjunto de filtros de densidade neutra inserido na extremidade da objetiva da câmera infravermelho durante as filmagens (figura 31). O número de filtros foi determinado experimentalmente.

Através da calibração da câmera de infravermelho é possível configurar o *software* com os valores de limiar (*threshold*) para faixas de tons de cinza correspondentes às temperaturas de interesse do usuário assim como a escolha de níveis para as isotermas.

Um termopar foi inserido em um orifício de $0,20\text{ mm}$ previamente feito por processo de eletro erosão na ponta da ferramenta de corte. O termopar ao aquecer gera uma f.e.m. proporcional à temperatura.

4.3 Software

A interface para tomada de decisões foi desenvolvida em *Delphi 4* e pode ser vista na figura 32.

Figura 32 - Interface para tomada de decisões. A imagem registra o momento da quebra da ferramenta com precisão de 1/30 segundos.

As funções do *software* são direcionadas para cumprir os requisitos do sistema de monitoramento e análise da distribuição de calor durante o processo e também para definição dos padrões para o monitoramento.

Do lado esquerdo da interface, figura 32, aparece a janela que contém a imagem original da câmera de infravermelho já digitalizada. O lado direito mostra a imagem processada através de um filtro *threshold* e passa faixa, segundo a especificação do usuário. O cursor “valor” abaixo e à esquerda possibilita a escolha do tom de cinza de “0”(preto) a “255”(branco) que corresponde ao traçado de isotermas em torno do valor de temperatura e amplitude “ Δ ” previamente escolhidos.

O algoritmo para as funções de passa faixa e *threshold* pode ser visto na figura 33.

Algoritmo 1 – Filtro passa faixa e *threshold*

1. início
2. leia a imagem do frame-buffer e colocar buffer[tamanho_imagem];
3. ler valor e Δ ;
4. se função_passa_faixa então:
 - para i=0 até tamanho_imagem
 - if (buffer[i] = valor +ou- Δ) then novo_buffer[i] = 0
 - else novo_buffer[i] = 255;
 - mostrar na tela a imagem do novo_buffer;
5. se função_threshoud então:
 - para i=0 até tamanho_imagem
 - if (buffer[i] >= valor then novo_buffer[i] = 0
 - else novo_buffer[i] = 255;
 - mostrar na tela a imagem do novo_buffer;
6. fim

Figura 33 – Algoritmo para os filtros passa faixa e *threshold*.

A extração de características é feita segundo o histograma de primeira ordem das imagens. O algoritmo pode ser visto na figura 34.

Algoritmo 2 – Cálculo do Histograma

1. Início
2. Para i=0 até o (número_de_tons_de_cinza - 1) Faça p(i) = 0
3. Ler da imagem e colocar no buffer[tamanho_janela_X * tamanho_janela_Y]
4. Para i=0 até (tamanho_janela_X * tamanho_janela_Y)
 - Faça incremente p[buffer(i)]
- Fim i
5. Para i=0 até (número_de_tons_de_cinza - 1)
 - Faça p(i) = p(i)/(tamanho_janela_X * tamanho_janela_Y)
- Fim i
6. Fim

FIGURA 34 – Algoritmo do histograma de primeira ordem.**4.4 O monitoramento do desgaste da ferramenta**

Para o monitoramento do estado da ferramenta em operação de torneamento e a avaliação do comportamento das características extraídas das imagens de infravermelho durante o processo de desgaste, foi elaborado um conjunto de experimentos. Nestes experimentos, foram fixadas condições de usinagem (item 2.1) e escolhidos padrões de ferramenta com graus de desgaste conhecidos: ferramenta

nova, ferramenta boa, ferramenta com desgaste médio, ferramenta gasta e ferramenta no final de vida (RYABOV, O. *et al.* 1996, AY, H.; YANG, W. 1997).

4.5 O desenvolvimento do sistema de diagnóstico

O sistema de auxílio a diagnóstico desenvolvido neste trabalho é baseado na inferência *fuzzy*.

O algoritmo *fuzzy* possui funções e regras que possibilitam a discriminação e a classificação do estado de desgaste da ferramenta durante o processo de corte segundo os padrões pré-estabelecidos (reconhecimento de padrões).

O sistema tem como variáveis de entrada um vetor de características extraídas do histograma de primeira ordem das imagens de infravermelho adquiridas durante as operações de corte. O sistema fornece como saída um índice correspondente ao grau de desgaste da ferramenta.

A eficácia de um sistema de auxílio a diagnóstico com o reconhecimento de padrões baseado em visão computacional, depende da eficiência de cada uma de suas etapas: aquisição das imagens, pré processamento, extração de características e decisão (figura 35).

FIGURA 35 - Interpretação e decisão é a última etapa de um sistema tomada de decisões.

A implementação, depende da correta escolha das informações necessárias à determinação dos conjuntos de variáveis *fuzzy*, funções de pertinência e regras de inferência que formam a base de conhecimento do sistema. Essas informações vem da etapa de extração do conhecimento.

4.5.1 A extração do conhecimento

O conhecimento ou a informação que se deseja pode estar “na cabeça de especialistas”, “intrínseco em um processo ou na ocorrência de um determinado fenômeno” ou ainda “pulverizado na literatura”. Para a extração do conhecimento ou da informação retida em cada uma das três formas descritas anteriormente, sugere-se respectivamente o uso de questionários onde deve-se questionar especialistas sobre a ocorrência do fenômeno objeto do discurso, o uso de experimentos onde deve-se verificar experimentalmente o comportamento do objeto do discurso frente a variação de parâmetros previamente escolhidos ou aleatórios ou a análise do fenômeno através da observação ou de relatos encontrados na literatura.

Em se tratando de lógica *fuzzy*, esse conhecimento é transferido e retido nas funções de regras de inferência que compõe o sistema¹. A forma como isso é feito é descrita nos itens posteriores.

Neste trabalho o objeto do discurso é o fenômeno de desgaste da ferramenta durante o corte. A extração do conhecimento foi de fundamental importância nas seguintes etapas da elaboração do sistema de diagnóstico proposto:

- Identificação dos *fuzzy sets*,
- Identificação das *membership functions*,
- Elaboração das regras de inferência.

A figura 36 mostra os 6 passos básicos para elaboração de um sistema de tomada de decisões baseado em lógica *fuzzy*.

¹ Transformar o conhecimento de especialistas ou de fenômenos em funções conhecidas e regras é a chave para a elaboração de um sistema *fuzzy*. Funções e regras podem ser implementadas em *hardware* ou *software*, por isso esse procedimento é de fundamental importância para a automação.

- 1 Determinação dos *Fuzzy Sets* de entrada;
 - 1.1 Extração do conhecimento;
 - 1.1.1 Pesquisa, experimento, questionário;
 - 1.2 Avaliação das respostas obtidas na pesquisa, experimento ou questionário;
 - 1.3 Identificação dos *Fuzzy Sets*;
- 2 Determinação das *Membership Functions* dos *fuzzy sets* de entrada;
 - 2.1 Extração do conhecimento;
 - 2.1.1 Pesquisa, experimento, questionário;
 - 2.2 Avaliação das respostas obtidas na pesquisa, experimento ou questionário;
 - 2.3 Identificação das *Membership Functions*;
- 3 Fuzificação;
- 3.1 Determinação das operações lógicas dos conjuntos *fuzzy*;
- 4 Determinação do(s) *Fuzzy Set(s)* de saída (variáveis de Saída) e respectivas *Membership Functions*;
- 5 Determinação das regras de inferência *fuzzy*;
 - 5.1 Extração do conhecimento;
 - 5.1.1 Pesquisa, experimento, questionário;
 - 5.1.2 Avaliação das respostas obtidas na pesquisa, experimento ou questionário;
 - 5.2 Elaboração das Regras de inferência;
6. O Processo de Desfuzificação;
 - 6.1 Método da centróide;
 - 6.2 Média dos máximos;

Figura 36 - Identificação dos *fuzzy sets*, *membership functions* e regras de inferência para sistemas de automação baseados em lógica *fuzzy*.

4.6 Determinação dos *fuzzy sets*

Os *fuzzy Set* ou conjuntos *fuzzy* são variáveis do tipo $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ que caracterizam, qualificam, sofrem alterações ou alteram o processo, objeto do discurso. A identificação destas variáveis e como influenciam o processo é exaustivo para leigos mas é intuitivo para os especialistas, operários, que lidam com elas diariamente (figura 37).

Figura 37. Variáveis de entrada.

Para a extração do conhecimento pode-se recorrer a manuais, questionários, especialistas ou elaboração de experimentos. Na classificação do estado de desgaste de ferramentas a partir de imagens em infravermelho, os *fuzzy sets* foram

determinados experimentalmente. Para isto foram montados experimentos onde foram usadas ferramentas com diversos estados de desgaste.

O poder de um classificador, depende do poder de discriminação de cada um de seus elementos independentemente.

A avaliação das características e de seu poder de classificação foi feita experimentalmente traçando-se a distribuição normal para cada uma delas, para cada padrão de estado de desgaste de ferramenta.

A identificação dos *fuzzy sets* é feita após a avaliação das variáveis mais significantes à variável qualitativa desgaste, objeto do discurso.

Foram escolhidas cinco *fuzzy sets* de entrada para representação das cinco variáveis que compõem o vetor de características extraído das imagens: média, desvio padrão, curtose, energia e entropia. A variável de saída é o desgaste representado pelo *fuzzy set* denominado desgaste.

Além das características extraídas do histograma de primeira ordem (BORELLI *et al* 2000a), (BORELLI *et al* 2000b) outras características podem ser usadas para classificar o estado de desgaste da ferramenta, como por exemplo, características de forma baseada em momentos (NEVES, E.A. 2000), entropia (RODRIGUES, E.L.L. 1998), histograma de Segunda ordem e características de textura (HARALICK, R.M. 1973), (UNSER, M. 1986) dentre outros.

BORELLI, J.E *et al* (2000c) apresentam o uso de extratores de forma baseado na teoria de momentos. As características: área, alongação, eixo maior e eixo menor, foram usadas para o monitoramento do estado de lesões de pacientes portadores de patologias de pele denominadas úlceras.

A imagem de infravermelho da região de contato entre peça e ferramenta assume diferentes formas que podem ser associadas às medidas de desgaste da ferramenta, taxa de remoção de material, quebra da ferramenta, etc. As características de forma foram descartadas devido ao seu alto custo computacional.

4.7 Determinação das *membership functions*

As *Membership Functions* ou funções de pertinência, determinam o grau de pertinência de uma determinada variável dentro do correspondente *Fuzzy Set*. As *Membership Functions* são definidas de acordo com a necessidade de cada aplicação e principalmente de acordo com as especificações do *Fuzzy Set*. Na tabela 1 são apresentados os *fuzzy sets* de entrada para o sistema desenvolvido e suas respectivas *Membership Functions*.

Tabela 1. – *Fuzzy Sets* de entrada e respectivas *Membership Functions*

Fuzzy Sets	Membership Functions
Média	Baixa
	Intermediária
	Alta
Desvio Padrão	Baixo
	Intermediário
	Alto
Curtose	Baixa
	Média
	Alta
Energia	Pouco
	Intermediário
	Muito
Entropia	Pouco
	Intermediário
	Muito

Para se determinar o tipo de função matemática (Triângulo, Trapézio, Gaussiana, etc.) a se adequar à *Membership function* deve-se recorrer novamente ao conhecimento de especialistas da área, pesquisa minuciosa ou ainda a experimentos.

Para a determinação destas funções e de se encontrar o valor de cada variável dentro de cada *fuzzy set* foram montados experimentos (operações de usinagem) variando-se os graus de desgaste da ferramenta.

4.7.1 Experimento para determinação das *membership functions*

A extração do conhecimento para determinação das *membership functions* envolve a elaboração de um conjunto de experimentos onde devem ser mantidas constantes as condições de usinagem que se deseja monitorar. Em uma operação de corte, estando as condições de usinagem inalteradas, as variáveis a sofrerem alterações são principalmente as variáveis ligadas ao desgaste da ferramenta.

Para a velocidade de corte de 470 m/min , ferramenta e máquina especificadas no item 4.1, capturou-se imagens de infravermelho do processo de corte de operações de torneamento usando-se três padrões de ferramenta previamente conhecidos:

- 1) ferramentas novas e boas;
- 2) ferramentas em um estado intermediário de desgaste;
- 3) ferramentas próximas ou no final de vida;

Os conceitos expressos por 1), 2) e 3) são vagos quando se questiona “o que são ferramentas novas e boas”, “o que significam ferramentas em estado intermediário”, “o que representa o termo ferramentas próximas ou no final da vida”.

Para o especialista, quando uma ferramenta está nova ou boa, a mesma não apresenta ou apresenta pouquíssimo desgaste. Quando uma ferramenta está em um estado intermediário de desgaste, também chamado meia vida, a ferramenta coloca em risco as especificações de tolerância das peça a serem usinadas no lote. Quando a ferramenta está próxima ou no final da vida, a mesma se encontra em um estado avançado de desgaste com alta probabilidade às falhas e perda das especificações e qualidade de acabamento das peças do lote.

Os estados de desgaste foram previamente especificados por um especialista da área de usinagem.

Para descrever o processo de desgaste através do vetor de características, deve-se determinar o valor de cada uma dessas características para cada um dos padrões descritos em 1), 2) e 3).

Um conjunto dessas características, deve ser capaz de discriminar os estados de desgaste da ferramenta segundo os padrões pré-estabelecidos. Essas

características serão usadas posteriormente para a classificação dos estados de desgaste da ferramenta.

As características escolhidas foram: média, desvio padrão, curtose, energia e entropia.

A avaliação das características segundo o seu poder de discriminação é feita através da distribuição de *Gauss*. Os gráficos traçados pelo *software* desenvolvido, figuras 38 – 42, mostram que ferramentas “novas e boas”, “meia vida” e “próximas e no final da vida” tem valores bem definidos para cada uma das características.

FIGURA 38 – Gaussiana das médias e valores das características para as 3 classes de ferramentas.

FIGURA 39 – Gaussiana dos desvios Padrão e valores das características para as 3 classes de ferramentas.

FIGURA 40 – Gaussiana das curtosis e valores das características para as 3 classes de ferramentas.

FIGURA 41 – Gaussiana das energias e valores das características para as 3 classes de ferramentas.

FIGURA 42 – Gaussiana das entropias e valores das características para as 3 classes de ferramentas.

Os valores assumidos pela média das “médias”, média dos “desvios padrões”, média das “curtoses”, médias das “energias” e médias das “entropias” são dados pela tabela 2.

TABELA 2 – Médias de valores para as características.

	Novas e boas	Meia vida	Fim de vida
Média	101,173	107,445	119,079
D. Padrão	4,926	4,810	4,675
Curtose	108,527	151,503	263,824
Energia	3039,8	2536,6	2408,0
Entropia	11,3	11,10	11,0

O gráfico das características de média, desvio padrão, curtose, energia e entropia em função do desgaste crescente¹ é mostrado nas figuras 43 – 48.

FIGURA 43 – Médias em função do desgaste.

FIGURA 44 – Desvios padrão em função do desgaste.

¹ O gráfico do comportamento dessas características ao longo do desgaste é dado pelos valores obtidos do histograma de primeira ordem da imagem exposta na janela.

FIGURA 45 – Curtose em função do desgaste.

FIGURA 46 – Energia em função do desgaste.

FIGURA 47 – Entropia em função do desgaste.

Para a determinação do gráfico da característica de média para ferramentas novas e boas, foram analisadas 300 imagens do uso dessas ferramentas. Fez-se a contagem do número de imagens em função da média dos tons de cinza das mesmas (tabela 3).

TABELA 3 – Frequência em função da média dos tons de cinza: Ferramenta nova.

Tons	Nova
70	0
80	20
90	150
100	125
110	5
120	0
130	0
140	0
150	0
160	0

Para o ponto “a” do gráfico da figura 48, temos 20 imagens com média de tons de cinza 80, no ponto “b” temos 150 imagens com média de tons de cinza 90, já no ponto “c” temos 0 imagens com média de tons de cinza 120.

FIGURA 48 - Gráfico da frequência das medias em função dos tons de cinza para a característica de média “baixa”.

Uma função para descrever o conjunto das médias “baixas” dentro do *Fuzzy set* “média” pode ser aproximada pela função de pertinência trapézio definida pela equação 11.

$$\begin{aligned}
 \text{Pertinência} = F(x) = & \begin{cases} \frac{x - a1}{a1' - a1} & \text{for } a1 \leq x \leq a1' \\ 1 & \text{for } a1' \leq x \leq a2' \\ \frac{x - a2}{a2' - a2} & \text{for } a2' \leq x \leq a2 \end{cases} \quad (11)
 \end{aligned}$$

A Função é dada pelo gráfico da figura 49, a seguir.

Figura 49 - Função Trapézio – *Membership Function*: médias “baixas”.

A análise de frequência das médias de tons de cinza nas imagens em função dos valores dos tons para as demais *membership functions* do *fuzzy set* “média” são dados pela tabela 4 e pelo gráfico da figura 50.

TABELA 4 – Frequência em função da média dos tons de cinza para a característica de média: Ferramenta nova, intermediária e no final da vida.

Tons	Nova	intermediária	Fim
70	0	0	0
80	20	0	0
90	150	15	0
100	125	60	0
110	5	160	35
120	0	55	125
130	0	10	120
140	0	0	20
150	0	0	0
160	0	0	0

Plotando-se os valores obtidos de frequência, temos o gráfico mostrado na figura 50.

FIGURA 50 - Frequências em função dos tons de cinza para a característica de média de tons de cinza usando-se ferramentas novas-boas, intermediárias e no final de vida.

Uma possível função de pertinência para descrever os conjuntos das médias “intermediário”, dentro do *Fuzzy set* “média” pode ser dada pela função de pertinência triângulo definida pela equação 12.

$$\text{Pertinência} = F(x) = \begin{cases} \frac{x - a1}{aM - a1} & \text{for } a1 \leq x \leq aM \\ \frac{x - a2}{aM - a2} & \text{for } aM \leq x \leq a2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

A Função é dada pelo gráfico da figura 51.

Figura 51 - Função Triângulo – *Membership Functions*:
média “Intermediária”, média “alta” .

As *membership functions* do fuzzy set “média” são dadas pelo gráfico da figura 52.

Figura 52. Gráfico das *membership functions* do fuzzy set “média” .

No caso do desvio padrão, foram usadas funções de pertinência Gaussianas (equação 12).

$$\text{Pertinência} = F(x) = e^{-\theta (x - a)^2} \quad (12)$$

A Função é dada pelo gráfico da figura 53.

Figura 53. Função Gaussiana – *Membership Function*:
Entropia Média .

Os gráficos dos desvios padrão para cada classe de ferramenta estão representados na figura 54.

Figura 54. Gráfico das *membership functions* do fuzzy set “desvio padrão”.

A mesma análise de frequência foi feita para as *membership functions* do fuzzy set “curtose”, funções triângulo (figura 55). Nas figuras 56 e 57 podem ser vistas as *membership functions* dos fuzzy sets energia e entropia.

Figura 55. Gráfico das *membership functions* do fuzzy set “curtose”.

Figura 56. Gráfico das *membership functions* do fuzzy set “energia”.

Figura 57. Gráfico das *membership functions* do fuzzy set “entropia”.

4.8 A fuzificação

A fuzificação é a transformação de valores observados em valores *fuzzy* através do uso de *membership functions*.

Na avaliação de uma imagem de infravermelho da ferramenta, quando a característica de média assume o valor de 96, indica que a variável lingüística média está relacionada por intermédio de dois valores com o *fuzzy set* média. Esses valores dependem das respectivas *membership functions* e são chamados “pertinência”. Verifica-se que a ferramenta cuja imagem tem medida de média 96, tem 55% de média “baixa” e 28% de média “intermediária”, (figura 58).

Figura 58. Fuzificação do valor 96 dentro do *fuzzy set* média.

4.9 Determinação do *fuzzy set* de saída e *membership functions*

A determinação dos *Fuzzy Sets* de saída corresponde à identificação do objeto do discurso, a resposta desejada. Para avaliar o estado da ferramenta nos processos de usinagem, usamos a variável qualitativa desgaste. Os termos lingüísticos escolhidos para essa variável foram: pouquíssimo, pouco, médio, muito, muitíssimo.

Para representar o *Fuzzy Set* desgaste, foram escolhidas as seguintes *Membership Functions*: Pouquíssimo, Pouco, Médio, Muito, Muitíssimo, (tabela 5).

Tabela 5. *Membership functions* de desgaste

Fuzzy Set	Membership Functions
Desgaste	Pouquíssimo
	Pouco
	Médio
	Muito
	Muitíssimo

O gráfico resultante é mostrado na figura 59.

Figura 59. Representação das *membership functions* de desgaste: uso da função triângulo.

4.10 As operações lógicas entre os conjuntos *fuzzy*

As operações para conjuntos *fuzzy* como união, interseção e complemento são definidas a partir de suas funções de pertinência ou *Membership Functions*. Sejam A e B dois conjuntos *fuzzy* e μ_A e μ_B suas respectivas funções de pertinência:

$$\text{Uni\~ao} \quad \mu_{A \cup B} = \max\{\mu_{A(x)}, \mu_{B(x)}\}$$

$$\text{Interse\~c\~ao} \quad \mu_{A \cap B} = \min\{\mu_{A(x)}, \mu_{B(x)}\}$$

Podemos notar que a união pega o máximo e a interseção pega o mínimo valor associado às funções de pertinência. De uma maneira menos formal, sejam os *fuzzy sets* média, desvio padrão, curtosis, energia e entropia e suas respectivas *membership functions*, temos que:

média desvio padrão =
 $\min\{ (\text{membership de média } (x)), (\text{membership de desvio padrão } (x)) \}$

4.11 Determinação das Regras de Inferência

As regras de inferência especificam a relação entre as variáveis *Fuzzy*. Podem ser especificadas no formato IF-THEN e representam o conhecimento dos especialistas, resultados de pesquisas ou sistema de avaliação. O número de regras é dado pelo produto escalar das *Membership Functions* dos *Fuzzy Set* envolvidos. Neste trabalho foram elaboradas 243 regras resultantes da interação das *Membership Functions* dos *Fuzzy Sets*: média, desvio padrão, curtosis, energia e entropia.

4.12 A extração do conhecimento para a elaboração das regras de inferência

Para a elaboração das regras são necessárias inúmeras pesquisas, questionários, livros, relatórios, observação do fenômeno, com o fim de averiguar o relacionamento das variáveis de entrada com a variável de saída, objeto do discurso.

Pesquisar sobre as regras, significa achar resposta para perguntas do tipo mostrado na figura 60.

1. Se a média é baixa e desvio é baixo e a curtosis é baixa e a energia é baixa e a entropia é baixa, o que ocorre com o desgaste?
2. Se a média é baixa e desvio é baixo e a curtosis é baixa e a energia é baixa e a entropia é média, o que ocorre com o desgaste?
3. Se a média é baixa e desvio é baixo e a curtosis é baixa e a energia é baixa e a entropia é alta, o que ocorre com o desgaste
4. ...

Figura 60 - Questionário para extração do conhecimento.

Através do estudo dos dados obtidos dos experimentos pudemos constatar que:

1. Se a média de tons de cinza é alta, a temperatura na região de contato peça-ferramenta é alta;
2. A temperatura aumenta com o desgaste;
3. Quanto mais gasta a ferramenta, menor o valor desvio padrão das imagens;
4. Conforme a ferramenta ia se desgastando o valor da curtosis ia aumentando;
5. O valor da energia diminui com o desgaste da ferramenta;
6. A entropia diminui com o desgaste.

Através das respostas para as perguntas elaboradas na figura 60, pode-se montar uma base de regras de inferência *fuzzy* descritas na tabela 6:

Tabela 6. Regras de inferência *fuzzy* para o desgaste.

	IF	THEN
1	IF ((media is baixa) and (desvio is baixo) and (curtosis is baixa) and (energia is baixa) and (entropia is baixa))	THEN (desgaste is pouco)
2	IF ((media is baixa) and (desvio is baixo) and (curtosis is baixa) and (energia is baixa) and (entropia is media))	THEN (desgaste is pouco)
3	IF ((media is baixa) and (desvio is baixo) and (curtosis is baixo) and (energia is baixa) and (entropia is alta))	THEN (desgaste is pouco)
...	...	
M	IF ((media is baixa) and (desvio is alto) and (curtosis is baixo) and (energia is alta) and (entropia is alta))	THEN (desgaste is pouquissimo)
...	...	
N	IF ((media is intermediaria) and (desvio is medio) and (curtosis is media) and (energia is media) and (entropia is media))	THEN (desgaste is medio)
...	...	...
P	IF ((media is alta) and (desvio is baixo) and (curtosis is alta) and (energia is baixa) and (entropia is baixa))	THEN (desgaste is muitissimo)
...	...	...
243	IF ((media is alta) and (desvio is alto) and (curtosis is alto) and (energia is alta) and (entropia is alta))	THEN (desgaste is muito)

4.13 A desfuzificação

Desfuzificação é o processo em que os valores das *fuzzy outputs* são convertidos em valores *crisps* (resultados numéricos).

Os valores das *fuzzy outputs* são obtidos através da agregação de todas as regras *fuzzy* disparadas pelos valores de *input*. Geralmente é usado o operador união.

$$\text{União: } \mu_{A \cup B} = \max \{ \mu_{A(x)}, \mu_{B(x)} \}$$

Existem vários métodos de Desfuzificação, dentre eles, os mais usados são: método do máximo critério, método da média dos máximos, e método do centro de massa (centróide).

Neste trabalho usaremos o método do centro de massa que procura pelo centro de gravidade da distribuição de saída *fuzzy*.

4.13.1 A Centróide

Segundo BOJADZIEV, G. (1995), o centro de massa pode ser calculado pela equação 13 a seguir:

$$Z_c^* = \frac{\sum_{k=1}^{q-1} z_k \mu_{agg}(z_k)}{\sum_{k=1}^{q-1} \mu_{agg}(z_k)} \quad (13)$$

Onde o valor z_c representa o valor *crisp*, $\mu_{agg}(z)$ representa o resultado da agregação das regras *fuzzy*, $\mu_{agg}(z)$, $z \in [z_0, z_q]$.

O intervalo $[z_0, z_q]$ é dividido em q valores iguais marcados pelos pontos $z_1, z_2, z_3, \dots, z_{q-1}$, conforme mostra a figura 61.

Figura 61. Desfuzificação, BOJADZIEV, G. (1995).

No entanto para implementação, o método da média dos máximos tem um menor custo computacional.

4.13.2 Média dos máximos

Considerando-se a *membership function* $\mu_{agg}(z)$ da figura 61 onde temos dois segmentos paralelos ao eixo z e sejam P_1 e P_2 (máximos valores de $\mu_{agg}(z)$), e suas respectivas projeções sobre o eixo z o intervalo $[\zeta_1, \zeta_2]$, então definimos z^* sendo o ponto médio do intervalo $[\zeta_1, \zeta_2]$.

$$z^*_m = \frac{\zeta_1 + \zeta_2}{2} \quad (14)$$

4.14 O Modelo Fuzzy de Mandami

O sistema de inferência fuzzy usado para avaliar o estado de ferramentas neste trabalho usou o modelo de Mandami.

Segundo FRANÇA, C.A. (1999), no modelo fuzzy de Mandami, as implicações fuzzy são modeladas pelo operador de Mandami interseção (mínimo) e as regras são agregadas através do operador de união (máximo).

O operador lógico AND pega o mínimo das *membership functions* dos conjuntos de entrada e o operador OR pega o máximo. Na agregação, a saída do sistema é computada pelo operador união, máximo.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Os resultados da calibração da câmera de infravermelho podem ser vistos nas curvas da figura 62.

FIGURA 62. Calibração da câmera de infravermelho para os diferentes Materiais.

As diferentes curvas de calibração da câmera de infravermelho para os diferentes materiais (cavaco, inserto, peça) já eram esperadas, pois diferentes materiais possuem propriedades e atributos diferentes, conforme descrito em AY &

YANG (1997) e SOLOMAN (1998).

Através da curva e calibração, a temperatura da quebra da ferramenta mostrada na figura 32 foi calculada em 1400 °C.

Foram feitos experimentos variando-se profundidades de corte de 0.20 mm e 0.40 mm; avanços de 0.07 mm/r, 0.25 mm/r e 0.50 mm/r e velocidades de corte de 295 m/min, 396 m/min e 497 m/min.

Os resultados da variação da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte para operações de torneamento a seco em função dos tons de cinza podem ser vistos na figura 63.

FIGURA 63 - Tom de cinza em função da velocidade de corte.

As temperaturas de usinagem, representadas pelos tons de cinza na figura 63, aumentam com o aumento da velocidade de corte, mas também aumentam em proporções secundárias com o aumento do avanço e profundidade. Os resultados estão de acordo com os obtidos por ABRÃO *et al* (1996).

A escolha adequada de características discriminantes é condição necessária para o bom desempenho de um sistema de reconhecimento de padrões. Foram extraídas as seguintes características das imagens para cada padrão de ferramenta ("nova e boa", "meia vida" e "próximas e no final da vida"): média, desvio padrão, curtose, energia, entropia.

A comparação da distribuição normal de cada uma das características para cada estado padrão de ferramenta é usado como método para a avaliação do poder de discriminação dessas características.

As curvas com a distribuição normal para os estados de ferramenta foram anteriormente mostradas nas figuras (38 - 42) do capítulo 4. Pode-se notar as características de média e curtosis figura (43 e 47) apresentaram maior poder de discriminação entre as demais. Isto significa vetor de características escolhido: media, desvio padrão, curtose energia e entropia é capaz de separar padrões de estado de desgaste de ferramenta, como foi anteriormente proposto.

As temperaturas durante a usinagem aumentam com o desgaste da ferramenta. Na figura 64 pode-se notar o aumento exponencial dos valores de tons de cinza com o decorrer do desgaste para as ferramentas desde novas até o final da vida.

FIGURA 64 - Tom de cinza em função do desgaste da ferramenta de corte.

Através da curva de calibração da câmera de infravermelho, mostrada anteriormente na figura 62 foram determinadas as temperaturas predominantes em cada estado de desgaste (tabela 7).

TABELA 7 – Temperaturas em função do desgaste.

Padrões de ferramentas	Tons de cinza	Temperaturas [oC]
Novas	105 – 115	215 – 240
Boas	115 – 130	250 – 370
Medias	130 – 164	370 – 490
Gastas	164 – 220	490 – 800
Fim de vida	220 – 250	800 – 1100

Através dos experimentos pode-se notar que os mecanismos de desgaste começam a alterar o estado, e definitivamente a danificar as ferramentas, quando as temperaturas são superiores a 700 e a 800 °C. A partir dessas temperaturas o revestimento perde suas propriedades, tornando a ferramenta susceptível ao desgaste.

A determinação das melhores condições de usinagem a serem adotadas para um determinado processo resume-se em encontrar condições de usinagem dinâmicas ou estáticas que produzam temperaturas dentro de determinados parâmetros. Propõe-se o seguinte procedimento o qual chamamos de “método do tom de cinza crítico”:

1) Determina-se experimentalmente as curvas de tons de cinza em função das variáveis independentes: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte. No caso do nosso experimento, foram usados os dados da figura 63.

2) Determina-se a curva de calibração da câmera de infravermelho para o material da ferramenta e determina-se o valor de tom de cinza equivalente a temperatura de 700 - 800 oC. No caso do nosso experimento o tom de cinza crítico está entre 180 - 220.

3) Traça-se uma reta cortando o tom de cinza 200 indicada como (a) na figura 65.

4) Escolhe-se a velocidade de corte, nesse caso escolheu-se 450 m/min.

FIGURA 65 - Determinação das melhores condições de usinagem a se adequarem a um determinado processo.

Para as velocidades de corte menores que 450 m/min, como por exemplo 400 m/min as temperaturas são baixas, o que significa que a ferramenta estará sendo sub-utilizada. Por outro lado, velocidades de corte superiores a 450 m/min, originam temperaturas muito superiores a 800 °C que aceleram o desgaste da ferramenta. Pode-se verificar que para a velocidade de corte fixa em 450 m/min a melhor condição a ser usada para a operação de torneamento de desbaste é de 450 m/min avanço 0,5 mm/r e profundidade de corte 0,4 mm.

Uma outra maneira de se escolher as condições de usinagem a partir do tom de cinza crítico é procurar os pontos de intercessão da reta (a) com as curvas na figura 65. Assim, outras possíveis condições são: 475 m/min, 0,25 mm/r e 0,4 mm ou ainda 495 m/min, 0,50 mm/r e 0,20 mm.

Com base nos experimentos, pode-se afirmar que o método de análise do tom de cinza crítico mostrou-se eficaz para escolha das melhores condições de usinagem a serem adotadas para um determinado processo. O método do tom de cinza crítico também foi empregado para a escolha de ferramentas tendo-se obtido resultados satisfatórios. Não entraremos em detalhes por não ser o escopo deste trabalho.

Através da curva de calibração da câmera de infravermelho é possível configurar a interface de tomada de decisões com as escalas de conversão, tom de

cinza – temperatura, para os materiais envolvidos no processo: ferramenta, peça e cavaco. A conversão possibilita o cálculo da temperatura local em cada material. O usuário ainda pode configurar o *software* com o valor limiar de *threshold* para o traçado das isotermas. As figuras 66 – 68 mostram a aplicação do filtro passa faixa para a delimitação de regiões através de isotermas em torno dos valores dos tons de cinza: 118, 134, 157 e 211 com delta de ± 5 .

FIGURA 66 – Isoterma no tom de cinza 134.

FIGURA 67 – Isoterma no tom de cinza 157.

FIGURA 68 – Isoterma no tom de cinza 211.

O resultado do cálculo das temperaturas da ferramenta no ponto de contato com a peça obtido através do processo de medida com infravermelho é mostrado na curva rotulada como infravermelho (superior) na figura 69. A curva rotulada como termopar na figura 69, mostra o resultado das medidas efetuadas com o termopar.

Figura 69. Comparação da medida da temperatura [°C] fornecida pelo termopar no interior da ferramenta e temperatura [°C] no ponto de contato da ferramenta e com a peça e obtida pela câmera de infravermelho. Tempo [s]. Condições de usinagem 497mm/min, 0,5 mm/r e 0,2 mm.

A diferença de “níveis” entre as duas curvas é devido a natureza das medidas: o termopar mede a temperatura no interior da ferramenta e o software registra e converte a temperatura no ponto de contato da ferramenta com a peça. Além disso, devem ser considerados erros acumulados na calibração, resistência térmica na superfície de contato entre a ferramenta e o termopar (LIN *et al* 1990), distância do termopar até a fonte de calor e erros do sistema de aquisição. As temperaturas no ponto de contato ferramenta-peça assemelham-se aos resultados obtidos por AY & YANG (1997) usando-se ferramentas novas. Muitos dos sinais captados pelo termopar foram descartados.

A luminosidade dos pixels ou tons de cinza apresentados nas imagens de infravermelho são proporcionais à energia emitida pelo espectro infravermelho e variam com as condições de usinagem BORELLI, J.E.*et al* 1(2000).

De acordo com BER (1972), BER (1973), SHAW (1994) a temperatura varia com a velocidade de corte.

Segundo D’ERRICO (1998), a qualidade de acabamento, performance e vida da ferramenta variam com a temperatura. Podemos concluir que a luminosidade do pixel varia com velocidade de corte e pode ser considerado como um importante parâmetro para verificar a performance, qualidade de acabamento e vida da ferramenta.

O resultado da elaboração dos experimentos, determinação *dos fuzzy sets*, *membership functions* e regras de inferência *fuzzy* é o sistema de inferência *fuzzy* mostrado na figura 70.

Figura 70. Diagnóstico auxiliado por computador: *Fuzzy sets* de entrada, regras de inferência e *fuzzy set* de saída.

Para validação do sistema foram feitos testes com várias ferramentas de usinagem de diferentes graus de desgaste conhecidos.

A imagem de infravermelho de uma ferramenta nova é mostrado na figura 71. O histograma de primeira ordem e a extração de características são mostrados na figura 72.

Figura 71 – Do lado esquerdo da interface aparece a imagem de infravermelho de uma ferramenta nova.

FIGURA 72 – Histograma de primeira ordem e extração de características.

Da mesma maneira são mostradas imagens de infravermelho de ferramentas com meia vida figura 73 e no final de vida figura 75, seus respectivos histogramas e características figuras 74 e 76.

Figura 73 – Do lado esquerdo da interface aparece a imagem de infravermelho de uma ferramenta no estado intermediário de desgaste.

FIGURA 74 – Histograma de primeira ordem e extração de características.

Figura 75 – Do lado esquerdo da interface aparece a imagem de infravermelho de uma ferramenta próxima do fim da vida.

FIGURA 76 – Histograma de primeira ordem e extração de características.

A seguir na tabela 8 são mostrados dos dados de entrada extraídos do software para o sistema de inferência.

Tabela 8 – Características extraídas de imagens de infravermelho de ferramentas de desgastes conhecidos e respostas obtidas pelo sistema de inferência *fuzzy*: grau de desgaste da ferramenta.

Estado de desgaste conhecido	Nova	Meia vida	Próxima ao fim de vida
Média	101,591	109,878	121,616
Desvio pad	4,914	4,767	4,652
Curtosis	112,914	228,858	256,297
Energia	2913,8	2673,6	2113,8
Entropia	11,3	11,1	10,9
Sistema de inferência <i>Fuzzy</i> – grau de desgaste (%)	0,14	0,57	0,91
Desgaste determinado	Nova	Meia vida	Próxima ao fim

O mesmo procedimento foi feito com outras imagens de ferramentas de desgaste conhecidos. A avaliação dos resultados pode ser vista na tabela 9.

Tabela 9. Validação do sistema proposto.

Quantidade de imagens	Estado de Desgaste	Número de acertos	Porcentagem de acertos
300	Novas	300	100%
300	Boas	300	100%
300	Médias	287	96%
300	Gastas	294	98%
300	Final de vida	300	100%
Porcentagem média de acertos			99%

O sistema desenvolvido é confiável tendo acertado a previsão do diagnóstico do estado da ferramenta em 99% das vezes.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados na tabela 9, capítulo 5, podemos concluir que todo o sistema funcionou adequadamente desde a aquisição das imagens de infravermelho, passando pelo estágio de pré-processamento, extração de características, determinação das *membership functions* e elaboração das regras de inferência *fuzzy* até a determinação do grau de desgaste da ferramenta.

Os demais resultados apresentados no capítulo 5, como as curvas de calibração e medidas de temperatura, estão de acordo com os resultados obtidos por outros autores.

O sistema cumpriu os requisitos anteriormente propostos, fornecendo uma interface amigável para análise e medida de temperaturas pontuais de diferentes materiais, isotermas entre outros, além do diagnóstico do desgaste da ferramenta.

Com a apresentação desta nova metodologia, mostrou-se que os sistemas de visão artificial podem ser vistos como condição necessária para o monitoramento eficaz da temperatura e o estado de desgaste, representando uma condição necessária para a automação do processo de usinagem.

Este trabalho fornece uma contribuição para a automação dos sistemas de manufatura e sistemas semelhantes que necessitem de controles apurados e possuam características relacionadas à temperatura.

Durante os 18 meses de desenvolvimento deste trabalho, muitos dos conceitos aplicados aqui também foram usados como base para o desenvolvimento de outros trabalhos de mestrado e de doutorado dentro e fora do grupo de Visão Computacional (Departamento de Eng. Mecânica EESC – USP, Departamento de Bioengenharia EESC-USP, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto – USP, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA): calibração de câmera de infravermelho e medida da temperatura da ferramenta no corte a quente de tecidos, determinação de *fuzzy sets*, *membership functions* e regras de inferência na agregação de mapas de características *botton up and top down* para descrever a atenção visual a partir de imagens, monitoramento do estado de lesões em pacientes portadores de úlceras tróficas através do uso de características de imagens baseadas em momentos, extração de características de textura de imagens para caracterização do estado de lesões em pacientes portadores de úlceras tróficas, estudo da formação do calo ósseo e recuperação de pacientes portadores de pseudo artrose através de características extraídas de imagens radiográficas, dentre outros. Este trabalho também foi base para a publicação de diversos artigos nacionais e internacionais e para a elaboração de projetos de pesquisa.

6.1 Trabalhos Futuros

O sistema de monitoramento, diagnóstico, medida de temperatura desenvolvido neste trabalho pode ser estendido para aplicações em diversos processos dentro dos sistemas de manufatura: furação, fresamento, retificação dentre outros. Sugere-se como temas para trabalhos futuros:

- a) Aquisição das imagens: uso de câmera de infravermelho acompanhado o avanço da ferramenta de corte ou abrasão, homogeneização da temperatura do meio ambiente, estudos da influência do líquido refrigerante e estudo do uso de filtros.
- b) Pré-processamento: algoritmos para segmentação das regiões de interesse, algoritmos para acompanhamento dessas regiões conforme o avanço da ferramenta, uso de cores para representação de isotermas.

- c) Extração de outras características além das baseadas no histograma de primeira ordem tais como: textura, momentos histograma de segunda ordem, fft.
- d) Tomada de decisões: uso de redes neurais e algoritmos neuro-fuzzy. Estudo de outras formas de se extrair e de se armazenar o conhecimento.
- e) Calibração da câmera de infravermelho para diferentes materiais de ferramenta, inclusive revestimentos, influência do líquido refrigerante na medida.
- f) Uso do monitoramento remoto através da rede.

O método do tom de cinza crítico, proposto no capítulo 4, é uma importante ferramenta a ser usada para a otimização de processos: escolha de ferramentas de corte e a escolha de condições de usinagem. Pretende-se em um trabalho de doutorado explorar a otimização de ferramentas de corte em HSC através dos algoritmos e metodologia desenvolvida neste trabalho agregados aos conceitos de engenharia robusta.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRÃO A.M., ASPINWALL, D.K.; NG. E.G.(1996). Temperature evaluation when machining hardened hot work die steel using PCBN tooling. *PCBN tooling – Industrial Diamond Review*. v. 56. n.2. pp. 40-44.

AY, H.; YANG, W.; WANG.J.A.(1994). Dynamics of cutting tool temperatures during cutting process. *Experimental Heat Transfer*, 7(3).

AY, H.; YANG, W.(1997). Heat transfer and life of metal cutting tool in turning. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Great Britain. Elsevier Science Ltd. Vol.41, no.3. pp.613-623.

BALLARD, D.H.; BROWN, C.M. (1982). Computer vision. Pentice-Hall INC, New Jersey.

BARROW, G. (1973). A view of experimental and theoretical techniques for assessing cutting temperatures. *Annals of the CIRP*. 22, 2. pp. 203-211.

BEALE, R; JACKSON, T.(1990). Neural Computing: An Introduction. Adam Hilger. Bristol.

BENNETT C.O.; MYERS.J.E.(1978). Fenômeno de transporte: quantidade de movimento calor e massa. São Paulo. McGraw-Hill. E.10. 820 p.

BORELLI, J.E.; FRANÇA C.A.; MEDEIROS, G.C.F.; GONZAGA, A.(2000A). Análise da temperatura na região de contato entre a peça e a ferramenta para o monitoramento de condições de usinagem de alto desempenho. *CONEM 2000. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN.

BORELLI, J.E.; BRANGHINI Jr.,A.; COELHO, R.T.; GONZAGA, A. (2000B). Diagnóstico do Estado da Ferramenta nos Processos de Usinagem de Alto Desempenho com o Uso de “Lógica Fuzzy” e Imagens de Infravermelho. *Congresso de Usinagem 2000*. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda. Teatro de Convenções do Anhembi, São Paulo, SP.

BORELLI, J.E.; MONACO, F.J.; NEVES, E.A.; GONZAGA,A.(2000C). Telediagnóstico Auxiliado por Computador para Automação do Monitoramento à Distância de Patologias de Pele: uma aplicação voltada ao estudo da reparação tecidual de úlceras tróficas de perna. *XVII Congresso Nacional de Engenharia Biomédica, CBEB2000*. Florianópolis, SC.

CASTO, S.L.; VALVO, E.L.; PIACENTINI, M.; RUISI, V.F.(1994). Cutting temperatures evaluation in ceramic tools: experimental texts, numerical analysis and SEM observation. *CIRP ANNALS, Manufacturing Technology*. Hellwag Publishers LTD, Switzerland.

CHANG, T.C.; CHEN, J.C.(1999). Fuzzy nets based on-line cutting power recognition in milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 15. n.4. Spriger.

CHOI, D.; KWON, W.T.; CHU, C.N.(1999). Real-time fracture in turning using sensor fusion. *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v.15. n.5. pp. 305-310. Springer-Varlag. London Limited.

CHOUDHURY, S.K.; RATH. S. (2000). In-process tool wear estimation in milling using cutting force model. *Journal of Materials Processing Technology*. 99. pp.113-119. ELSEVIER.

D’ERRICO, G.E.(1998). An adaptive system for turning process control based on tool temperature Feedback. *Journal of Materials Processing Technology*. 78 (1998) 43-47.

DEWES, R.C., NG. E, CGUA, K.S.; NEWTON, P.G. ASPINWALL, D.K. (1999). Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel. *Journal of Materials Processing Technology*. v.92-93. pp. 293-301. Elsevier.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. (2000). Tecnologia da usinagem dos metais. São Paulo, Artliber Editora. 2 ed. 244 p. ISBN: 85-87296-1-9.

DUDA, R.O.; HART, P.E.H.(1979). Pattern Classification and Scene Analysis. John Wiley & Sons. New York.

ELZER, J.; PFEIFER.T (1990). Measuring drill wear with digital image processing. *Measurement*. v.8. n.3. july -sept.

FERRARESI, D.(1970). Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo. Edgard Blucher.

FRANÇA, C.A.(1994). Determinação da posição de objetos tri-dimensionais para manipuladores de robôs. *Tese da Escola de Eng. de São Carlos – depto.Eng.Elétrica*.

FRANÇA, C. A. (1999). Avaliação da qualidade de placas de madeira através de um sistema de inferência nebuloso baseado em redes adaptativas. São Carlos, EESC – USP. *Tese de Doutorado*.

GONZALES, R.C.; WINTZ, P.(1987). Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company. 2nd. edition.

GRABEC, I.; KULJANNI'C, E. (1994). Characterization of manufacturing process based on acoustic emission analysis by neural networks. *CIRP ANNALS*. v.43. n.1.

HARALICK,R.; SHANMUGAM,K; DINSTEIN (1973).Textural Features for image classification. *IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-3, N.6. November. Pp.610-621.

HUTTON, D.V.; F.HU. (1999). Acoustic emission monitoring of tool wear in end-milling using time-domain averaging. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Transactions of ASME. February. v. 121. n.1. pp. 8-12. New York.

JEMIELNIAK, K. (1999). Commercial tool condition monitoring systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 15. pp. 711-721. Spriger-Varlag Londom Limited.

KALPAKJIAN, S.(1967). Mechanical processing of materials. New York, Litton Educational Publishing, INC. ISBN:0-442-04210-8.

KALPAKJIAN, S.(1991). Manufacturing Processes for Engineering Materials. New York. Addison-Wesley. Second edition, 920 p. ISBN:0-201-50806-0.

KARBI, K.(1996). Um guia básico, para facilitar o processo de seleção de pastilhas de usinagem. *Máquinas e metais*. São Paulo, março, pp42-50, Editora Aranda.

KLIR,G.J.; YUAN,B.(1995). Fuzzy sets and Pattern Recognition.
<http://www-wngr.sjsu.edu/~Knapp/HCIFUZZY/fuzzy.htm>.

KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G.(1997). Dry cutting: keynote papers presented at the opening session. *CIRP ANNALS, Manufacturing technology*. Hallway Publishers LTD, Switzerland.

KOULIANG, W.(1983). The application of infrared thermometry in metal cutting. *Proceedings of the First International Metal Cutting Conference*. March, 17-19, Guangzhou, China.

LEE, J.M.; CHOI, D.K.; CHU, C.N. (1994). Real time breakage monitoring for NC turning and drilling. *Manufacturing Technology*. CIRP Annals, v. 43/1.pp.81-84. Switzerland, Hallwag Publishers LTD.

LIN, J.; CHEN, T.C.; WANG, C.I.(1990). Development of infrared pyrometer with fiber optic for measuring cutting temperature at high speed cutting. *ASME, PED. Monitoring and Control for Manufacturing Process*. v.44. pp.17-32

LOU, S.J.; CHEN, J.C.(1999). In-process roughness recognition (ISSR) system in end-milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 15. pp. 200-209. Springer-Verlag London Limited.

LUCAS, S.R. (1997). Desenvolvimento de uma metodologia para seleção de ferramentas de torneamento em sistemas integrados. *Dissertação de Mestrado*. EESC – USP. São Carlos.

MAKIS, V. (1999). Optimal control policy a tool-wear process subject to shocks and random failures. *International Journal of Production Economics*. 60-61. pp.613-621. ELSEVIER.

MARCONDES, F.C. (1990). A história do metal duro. São Paulo. CPA consultoria de Artes e projetos LTDA. 234p.

NEVES. E.A. (2000). Estratégia atencional para busca visual e reconhecimento invariante de objetos baseada na integração de características *bottom-up* e *top-down*. Tese de Doutorado – Instituto de Física de São Carlos - USP. São Carlos – SP.

NEVES. E.A.; BORELLI, J.E.; GONZAGA, A.(2000). Target Search by Bottom-Up and Top-Down Fuzzy Information. Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica. SIBGRAPI2000. UFRGS - Instituto de Informática.

NITZAN, D.(1988). Three-dimensional Vision Structure for Robot Applications. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. v.10. no.3. May. pp. 291-309.

PAL, S.K; MITRA,S.(1992). Multilayer Perceptron, Fuzzy Sets and Classification. *IEEE Transactions on Neural Networks*. vol.3, no.5. pp.683-697.

POLITANO, P.R.(1996). Proposta de um procedimento de programação reativa online de fms. *Tese de Doutorado*. EESC –USP. São Carlos. 141p.

PRATT,W.K.(1991). Digital Image Processing. A Wiley-Interscience Publication.

RUOCCO, R.S.(1987). *Robot Sensors and Tranducers*. Open University Press. England.

RODRIGUES, E.L.L. (1998). Metodologia de inspeção visual usando limiar (threshold) entrópico com aplicação na classificação de placas de madeira. *Tese de Doutorado*. São Carlos, Instituto de Física de São Carlos.

RUOCCO, R.S.(1987). *Robot Sensors and Tranducers*. Open University Press. England.

ROZENFELD, H.(1992). Implementação distribuída do planejamento do processo assistido por computador na manufatura integrada. EESC-USP. *Tese de livre docência*. 234p.

RYABOV, O. et al(1996). An in-process direct monitoring method for milling tool failures using laser sensor. *Technical Report*. Japan, Annals of CIRP.

SHAM, D.; SCHNEIDER, T. (1996). A produção sem refrigeração é interessante e deve ser mais conhecida. *Maquinas e Metais – Editora Aranda – agosto*, pp.36-55.

SANDRI, S.; CORREA, C. (1999). Lógica nebulosa. *V Escola de Redes Neurais: Conselho Nacional de Redes Neurais*. pp.co73-c090. ITA, São José dos Campos – SP.

SANDVIK (1997). Guia para a aplicação de ferramentas. Corokey, 3ª edição. AB Sandvik Coromant.

SARASIBAR, C. A.; CHIUMENTI, M. (1999). On the numerical modeling of frictional wear phenomena. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. v. 177. pp.401 – 426. Elsevier.

SILVA, M.B.; WALLBANK, J. (1999). Cutting temperature: prediction and measurement methods - a review. *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier. v.88. pp.195-202.

STEPHENSON, D.A.(1991). An inverse method for investigating deformation zone temperatures in metal cutting. *Journal of engineering for industry. Transactions of ASME*. May. v.113. n.2. New York.

STEPHENSON, D.A.(1991). Assessment of stead-state metal cutting temperature models based on simultaneous infrared and thermocouple data. Transactions of the ASME. n.2. v.113. New York. Published by The American Society of Mechanical Engineers.

SOLOMAN, S.(1998). Sensors handbook. USA, McGraw-Hill. ISBN: 0-07-059630-1.

YOUNG, H. T. (1996), Cutting temperature response to flank wear. *Wear*. v .201. pp. 117 – 120. Elsevier.

YANMING, Q.; ZEHUA, Z.(2000) Tool wear and its mechanism for cutting SiC particle-reinforced aluminium matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology* v.100. pp. 194-199. Elsevier.

UEDA, T.; SATO, M, NAKAYAMA, K. (1998). The temperature of a single crystal diamond tool in turning. *Manufacturing Technology*. CIRP Annals. Switzerland, Hallway LTD Publishers.

UNSER, M. (1986). Sum and difference histograms for texture classification. *IEEE Transactions on machine intelligence* Vol. PAMI – 8. N.1. January. pp. 118-125.

ZADEH, L.A.(1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*. vol.8. pp.338-353.

ANEXO 1

Código fonte do software desenvolvido

```

unit uMain;
    //João Eduardo Borelli, Gilmar Caiado Fleury Medeiros, Adilson Gonzaga
    // Laboratório de Visão Computacional
    //Escola de Engenharia de São Carlos - USP
    //Engenharia Elétrica - Pós Graduação
    //Março/2000

interface

uses
    Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
    Menus, ComCtrls, Buttons;

type
    TfrmPrinc = class(TForm)
        MainMenu1: TMainMenu;
        Imagens1: TMenuItem;
        UmaImagem1: TMenuItem;
        Sobre1: TMenuItem;
        PastadeImagens1: TMenuItem;
        Sair1: TMenuItem;
        SpeedButton1: TSpeedButton;
        SpeedButton2: TSpeedButton;
        procedure UmaImagem1Click(Sender: TObject);
        procedure PastadeImagens1Click(Sender: TObject);
        procedure Sair1Click(Sender: TObject);
        procedure Sobre1Click(Sender: TObject);
        procedure SpeedButton1Click(Sender: TObject);
        procedure SpeedButton2Click(Sender: TObject);
    private
        { Private declarations }
    public
        { Public declarations }
    end;

var
    frmPrinc: TfrmPrinc;

implementation

uses uImg, uMImg, uSobre;

{$R *.DFM}

//abertura do form de uma imagem
procedure TfrmPrinc.UmaImagem1Click(Sender: TObject);
begin
    Application.CreateForm(TfrmOneImg, frmOneImg);
    frmOneImg.Show;
end;

procedure TfrmPrinc.PastadeImagens1Click(Sender: TObject);
begin
    Application.CreateForm(TfrmMultImg, frmMultImg);
    frmMultImg.Show;
end;

```

```
//fecha o form principal
procedure TfrmPrinc.Sair1Click(Sender: TObject);
begin
    frmPrinc.Close;
end;

procedure TfrmPrinc.Sobre1Click(Sender: TObject);
begin
    Application.CreateForm(TfrmSobre, frmSobre);
    frmSobre.Show;
end;

procedure TfrmPrinc.SpeedButton1Click(Sender: TObject);
begin
    UmaImagem1Click(Sender);
end;

procedure TfrmPrinc.SpeedButton2Click(Sender: TObject);
begin
    PastadeImagens1Click(Sender);
end;

end.
```

```
unit uProg;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  ComCtrls, StdCtrls;

type
  TfrmProgBar = class(TForm)
    ProgBar: TProgressBar;
    lblPos: TLabel;
    lblWait: TLabel;
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  frmProgBar: TfrmProgBar;

implementation

{$R *.DFM}

end.
```



```

unit ulmg; //formulário de controle de extração de características de uma
           // única imagem

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, ComCtrls, TeEngine, Series, TeeProcs, Math;

const MAX_TOM = 255;
type TVet = array[0..MAX_TOM] of double; //frequência de tons de uma única imagem

type
  TfrmOneImg = class(TForm)
    dlgImg: TOpenDialog;
    Bevel1: TBevel;
    lstVetor: TListBox;
    imgOrig: TImage;
    imgFilt: TImage;
    Label1: TLabel;
    lblValor: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Scroll: TScrollBar;
    btnAbrirImg: TBitBtn;
    edtArq: TEdit;
    Label3: TLabel;
    btnEstat: TBitBtn;
    Label26: TLabel;
    Label27: TLabel;
    btnFechar: TBitBtn;
    Bevel2: TBevel;
    Bevel3: TBevel;
    Label4: TLabel;
    edtDelta: TEdit;
    procedure ScrollChange(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure btnAbrirImgClick(Sender: TObject);
    procedure btnEstatClick(Sender: TObject);
    procedure FormActivate(Sender: TObject);
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    procedure btnFecharClick(Sender: TObject);
    procedure edtDeltaExit(Sender: TObject);
  private
    BitMap : TBitmap;
    P : PByteArray;
    procedure ResetaForm;
    procedure CalculaVetor;
    procedure FechaForms;
  public
    vet: TVet;
  end;

var
  frmOneImg: TfrmOneImg;

implementation

```

```

uses uEstat;

{$R *.DFM}

//reseta todos os controles do form
procedure TfrmOneImg.ResetaForm;
begin
  lblValor.Caption:='0';
  edtDelta.Text:='0';
  edtDelta.Color:= clBtnFace;
  Scroll.Enabled:=False;
  btnEstat.Enabled:=False;
  btnAbrirImg.Default:=True;
  lstVetor.Enabled:=True;
  lstVetor.Clear;
end;

//calcula a frequência de todos os tons de cinza encontrados na figura e
//armazena os dados em um vetor freq
procedure TfrmOneImg.CalculaVetor;
var tom, x, y:integer;
begin
  //criação do vetor de tons de cinza
  for x:=0 to MAX_TOM do vet[x]:=0;
  BitMap := TBitmap.Create;
  try
    if edtArq.Text <> '' then
      begin
        BitMap.LoadFromFile(edtArq.Text);
        for tom := 0 to MAX_TOM do
          begin
            for y := 0 to BitMap.height - 1 do
              begin
                P := BitMap.ScanLine[y];
                for x := 0 to BitMap.width - 1 do
                  if P[x] = tom then vet[tom] := vet[tom] + 1;
                end;
                lstVetor.Items.Add('N:' + IntToStr(tom) + '=' + FloatToStr(vet[tom]));
              end;
            end;
          end;
        finally
          BitMap.Free;
        end;
        btnEstat.Enabled:=True;
      end;

//fecha o forms de estatística, se necessário
procedure TfrmOneImg.FechaForms;
begin
  if frmOneImg = nil then
    if frmEstat <> nil then frmEstat.Close;
  end;

procedure TfrmOneImg.FormCreate(Sender: TObject);
begin

```

```

ResetaForm;
end;

//altera os tons de cinza da imagem filtrada, a partir do Scroll
procedure TfrmOneImg.ScrollChange(Sender: TObject);
var x, y, i, valor, delta: integer;
begin
  lblValor.Caption:=IntToStr(Scroll.Position);
  valor:=Scroll.Position;
  delta:=StrToInt(edtDelta.Text);
  if edtArq.Text <> '' then
  begin
    imgFilt.Picture.LoadFromFile(edtArq.Text);
    imgFilt.Stretch:=True;
    if delta = 0 then
    begin
      for y := 0 to imgFilt.Picture.Bitmap.height - 1 do
      begin
        P := imgFilt.Picture.Bitmap.ScanLine[y];
        for x := 0 to imgFilt.Picture.Bitmap.width - 1 do
          if P[x] = valor then P[x] := MAX_TOM else P[x] := 0;
        end
      end
    end
    else begin //threshold para valores de delta <> 0
      for y := 0 to imgFilt.Picture.Bitmap.height - 1 do
      begin
        P := imgFilt.Picture.Bitmap.ScanLine[y];
        for x := 0 to imgFilt.Picture.Bitmap.width - 1 do
        begin
          i := valor - delta;          //teste dos valores de delta para
          if i < 0 then i := 0;          //se utilizar a faixa de valores
          repeat                        //valor +- delta
            if P[x] = i then P[x] := MAX_TOM;
            inc(i);
            if (i = valor + delta) and (P[x] <> MAX_TOM) then P[x]:=0;
            until (P[x] = MAX_TOM) or (i >= (valor + delta));
          end;
        end;
      end;
    end
    else MessageDlg('Não existe arquivo para ser analisado!', mtInformation,
      [mbOk], 0);
  end;
end;

//abre a caixa de diálogo OpenFileDialog
procedure TfrmOneImg.btnAbrirImgClick(Sender: TObject);
begin
  ResetaForm;
  if dlgImg.Execute then
  begin
    FechaForms;
    edtArq.Text:=dlgImg.FileName;
    imgOrig.Picture.LoadFromFile(edtArq.Text);
    imgFilt.Picture:= nil;
    Scroll.Position:=0;
    Scroll.Enabled:=True;
  end;
end;

```

```

    lblValor.Caption:='0';
    edtDelta.Enabled:=True;
    CalculaVetor;
    edtDelta.Color:=clWindow;
end;
end;

//dá o refresh nas imagens
procedure TfrmOneImg.FormActivate(Sender: TObject);
begin
    imgOrig.Refresh;
    imgFilt.Refresh;
end;

//abre o form frmEstat e mostra os resultados dos cálculos
procedure TfrmOneImg.btnEstatClick(Sender: TObject);
begin
    Application.CreateForm(TfrmEstat, frmEstat);
    frmEstat.Show;
end;

procedure TfrmOneImg.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
    Action := caFree;
end;

procedure TfrmOneImg.btnFecharClick(Sender: TObject);
begin
    frmOneImg.Close;
    FechaForms;
end;

//controla o valor do incremento
procedure TfrmOneImg.edtDeltaExit(Sender: TObject);
begin
    if (StrToInt(edtDelta.Text) > 255) or (StrToInt(edtDelta.Text) < 0) then
    begin
        MessageDlg('O valor do incremento deve ser compreendido entre 0 e 255 !',
            mtWarning, [mbOk], 0);
        edtDelta.SetFocus;
    end;
end;

end.

```



```

unit uEstat; //controle dos resultados estatísticos gerados por uma única
              //imagem
interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, Math, TeEngine, Series, TeeProcs, Chart;

type
  TfrmEstat = class(TForm)
    Bevel2: TBevel;
    Label19: TLabel;
    Label24: TLabel;
    edtDesvPad: TEdit;
    edtCurtose: TEdit;
    Label1: TLabel;
    edtMedia: TEdit;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    edtEnergia: TEdit;
    edtEntropia: TEdit;
    Hist: TChart;
    Series1: TFastLineSeries;
    procedure FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    procedure FormShow(Sender: TObject);
  private
    function MedPond(const P: array of Double): Extended;
    function DesvPad(const P: array of Double): Extended;
    function Curtose(const P: array of Double): Extended;
    function Energia(const P: array of Double): Extended;
    function Entropia(const P: array of Double): Extended;
    procedure TracaHistograma(const P: array of Double);
  end;

var
  frmEstat: TfrmEstat;

implementation

uses uImg;

{$R *.DFM}

//cálculo da média aritmética ponderada
function TfrmEstat.MedPond(const P: array of Double): Extended;
var b: Integer;
    aux, soma: Extended;
begin
  aux:=0; soma:=0;
  for b:=0 to MAX_TOM do
  begin
    aux:= aux + (b * P[b]);
    soma:= soma + P[b];
  end;
  Result := aux / soma;
end;

```

```

//cálculo do desvio padrão
function TfrmEstat.DesvPad(const P: array of Double): Extended;
var b:Integer;
    aux:Extended;
begin
    aux:=0;
    for b:=0 to MAX_TOM do
        aux:= aux + Sqr(b - StrToFloat(edtMedia.Text));
    Result := Sqrt(aux) / MAX_TOM;
end;

//cálculo da curtose
function TfrmEstat.Curtose(const P: array of Double): Extended;
var b:Integer;
    aux, soma:Extended;
begin
    aux:=0; soma:=0;
    for b:=0 to MAX_TOM do
        begin
            aux:= aux + (IntPower((b - StrToFloat(edtMedia.Text)), 4) * P[b]);
            soma:= soma + P[b];
        end;
    Result:= ((1 / (IntPower(StrToFloat(edtDesvPad.Text), 3))) * aux) /
    (soma * (MAX_TOM + 1)));
end;

//cálculo da energia
function TfrmEstat.Energia(const P: array of Double): Extended;
var b:Integer;
    aux, soma:Extended;
begin
    aux:=0; soma:=0;
    for b:=0 to MAX_TOM do
        begin
            aux:= aux + Sqr(P[b]);
            soma:= soma + P[b];
        end;
    Result:= aux / soma;
end;

//cálculo da entropia
function TfrmEstat.Entropia(const P: array of Double): Extended;
var b:Integer;
    aux, soma:Extended;
begin
    aux:=0; soma:=0;
    for b:=0 to MAX_TOM do
        begin
            if P[b] > 0 then //> 0, pois log2 0 não existe
                aux:= aux + (P[b] * log2(P[b]));
            soma:= soma + P[b];
        end;
    Result:= aux / soma;
    TracaHistograma(P);
end;

```

```

//procedimento de controle do traçado do histograma
procedure TfrmEstat.TracaHistograma(const P: array of Double);
var x:integer;
begin
  Hist.Title.Text.Clear;
  Hist.Title.Text.Add('Imagem: ' + frmOneImg.edtArq.Text);
  for x:=0 to MAX_TOM do Series1.AddXY(x, P[x], '', clTeeColor);
end;

procedure TfrmEstat.FormClose(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
begin
  Action := caFree;
end;

procedure TfrmEstat.FormShow(Sender: TObject);
begin
  edtMedia.Text:=FormatFloat('0.000', MedPond(frmOneImg.vet)); //méd. arit. ponderada
  edtDesvPad.Text:=FormatFloat('0.000', DesvPad(frmOneImg.vet)); //desvio padrão
  edtCurtose.Text:=FormatFloat('0.000', Curtose(frmOneImg.vet)); //curtose
  edtEnergia.Text:=FormatFloat('0.0', Energia(frmOneImg.vet)); //energia
  edtEntropia.Text:=FormatFloat('0.0', Entropia(frmOneImg.vet)); //entropia
end;

end.

```

```

unit uMEstat; //dados estatísticos gerados por várias imagens, no caso,
              //pastas de imagens
interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, Buttons, ExtCtrls, Math, uMImg, TeEngine, Series, TeeProcs,
  Chart;

type TARq = array [0..MAX_IMG] of double;

type
  TfrmMEstat = class(TForm)
    Bevel2: TBevel;
    Label1: TLabel;
    edtMed1: TEdit;
    Label19: TLabel;
    edtDesvPad1: TEdit;
    edtCurtose1: TEdit;
    edtEnergia1: TEdit;
    edtEntropia1: TEdit;
    Label3: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label24: TLabel;
    Hist: TChart;
    Series1: TFastLineSeries;
    Bevel3: TBevel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    edtMed3: TEdit;
    edtDesvPad3: TEdit;
    edtCurtose3: TEdit;
    edtEnergia3: TEdit;
    edtEntropia3: TEdit;
    Bevel1: TBevel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    edtMed2: TEdit;
    edtDesvPad2: TEdit;
    edtCurtose2: TEdit;
    edtEnergia2: TEdit;
    edtEntropia2: TEdit;
    Series2: TFastLineSeries;
    Series3: TFastLineSeries;
    procedure FormShow(Sender: TObject);
  private
    med1, med2, med3: TARq;
    dpad1, dpad2, dpad3: TARq;
    curt1, curt2, curt3: TARq;
    engia1, engia2, engia3: TARq;
  end;

```



```

entpia1, entpia2, entpia3: TArq;
function MedPond(mat: TMat; var media: TArq; num: String): Extended;
function DesvPad(var dpad: TArq; media: TArq; num: String): Extended;
function Curtose(mat: TMat; var curtose: TArq; num, media, dpad: String): Extended;
function Energia(mat: TMat; var energia: TArq; num: String): Extended;
function Entropia(mat: TMat; var entropia: TArq; num: String): Extended;
procedure CalculaDadosEstat;
function MedGenerica(var vet: TArq; num: integer): Extended;
function DesvPadGenerico(var vet: TArq; num: integer): Extended;
procedure TracaGauss(num: String; media, desvpad: Extended; vet: TArq;
Series: TChartSeries; tipo: String);
procedure ControleGaussiana;
end;

var
    frmMEstat: TfrmMEstat;

implementation

{$R *.DFM}

{----- cálculos estatísticos -----}

//cálculo da média aritmética ponderada das imagens, armazenando em um vetor
//média, os valores da média
function TfrmMEstat.MedPond(mat: TMat; var media: TArq; num: String): Extended;
var i, b: Integer;
    aux, soma, res: Extended;
begin
    res:=0;
    for i:= 0 to StrToInt(num) - 1 do
        begin
            aux:=0; soma:=0;
            for b:=0 to MAX_TOM do
                begin
                    aux:= aux + (b * mat[i][b]);
                    soma:= soma + mat[i][b];
                end;
            res:= res + aux / soma;
            media[i]:= aux / soma;
        end;
    Result:= res / StrToInt(num);
end;

//cálculo do desvio padrão
function TfrmMEstat.DesvPad(var dpad: TArq; media: TArq; num: String): Extended;
var i, b: Integer;
    aux, res: Extended;
begin
    res:=0;
    for i:= 0 to StrToInt(num) - 1 do
        begin
            aux:=0;
            for b:=0 to MAX_TOM do
                aux:= aux + Sqr(b - media[i]);
            res:= res + (Sqr(aux) / MAX_TOM);
        end;
    end;
end;

```

```

    dpad[i]:= Sqrt(aux) / MAX_TOM
end;
Result:= res / StrToInt(num);
end;

```

//cálculo da curtose

```

function TfrmMEstat.Curtose(mat: TMat; var curtose: TArq; num, media,
dpad: String): Extended;
var i, b: Integer;
    aux, soma, res: Extended;
begin
    res:=0;
    for i:= 0 to StrToInt(num) - 1 do
    begin
        aux:=0; soma:=0;
        for b:=0 to MAX_TOM do
        begin
            aux:= aux + (IntPower((b - StrToFloat(media)), 4) * mat[i][b]);
            soma:= soma + mat[i][b];
        end;
        if soma > 0 then
        begin
            res:= res + ((1 / (IntPower(StrToFloat(dpad), 3))) * aux) / soma;
            curtose[i]:= ((1 / (IntPower(StrToFloat(dpad), 3))) * aux) / (soma * (MAX_TOM + 1)));
        end;
    end;
    Result:= res / (StrToInt(num) * (MAX_TOM + 1));
end;

```

//cálculo da energia

```

function TfrmMEstat.Energia(mat: TMat; var energia: TArq; num: String): Extended;
var i, b: Integer;
    aux, soma, res: Extended;
begin
    res:=0;
    for i:= 0 to StrToInt(num) - 1 do
    begin
        aux:=0; soma:=0;
        for b:=0 to MAX_TOM do
        begin
            aux:= aux + Sqr(mat[i][b]);
            soma:= soma + mat[i][b];
        end;
        if soma > 0 then
        begin
            res:= res + aux / soma;
            energia[i]:= aux / soma;
        end;
    end;
    Result:= res / StrToInt(num);
end;

```

//cálculo da entropia

```

function TfrmMEstat.Entropia(mat: TMat; var entropia: TArq; num: String): Extended;
var i, b: Integer;
    aux, soma, res: Extended;

```

```

begin
res:=0;
for i:= 0 to StrToInt(num) - 1 do
begin
aux:=0; soma:=0;
for b:=0 to 255 do
begin
if mat[i][b] <> 0 then //<> 0, pois log2 0 não existe
aux:= aux + (mat[i][b] * log2(mat[i][b]));
soma:= soma + mat[i][b];
end;
if soma > 0 then
begin
res:= res + aux / soma;
entropia[i]:= aux / soma;
end;
end;
Result:= res / StrToInt(num);
end;

//cálculo dos dados estatísticos gerais
procedure TfrmMEstat.CalculaDadosEstat;
begin
if frmMultImg.edtNum1.Text <> '0' then
begin
edtMed1.Text:=FormatFloat('0.000', MedPond(frmMultImg.mat1, med1,
frmMultImg.edtNum1.Text));
edtDesvPad1.Text:=FormatFloat('0.000', DesvPad(dpad1, med1,
frmMultImg.edtNum1.Text));
edtCurtose1.Text:=FormatFloat('0.000', Curtose(frmMultImg.mat1, curt1,
frmMultImg.edtNum1.Text, edtMed1.Text, edtDesvPad1.Text));
edtEnergia1.Text:=FormatFloat('0.0', Energia(frmMultImg.mat1, engia1,
frmMultImg.edtNum1.Text));
edtEntropia1.Text:=FormatFloat('0.0', Entropia(frmMultImg.mat1, entpia1,
frmMultImg.edtNum1.Text));
end;
if frmMultImg.edtNum2.Text <> '0' then
begin
edtMed2.Text:=FormatFloat('0.000', MedPond(frmMultImg.mat2, med2,
frmMultImg.edtNum2.Text));
edtDesvPad2.Text:=FormatFloat('0.000', DesvPad(dpad2, med2,
frmMultImg.edtNum2.Text));
edtCurtose2.Text:=FormatFloat('0.000', Curtose(frmMultImg.mat2, curt2,
frmMultImg.edtNum2.Text, edtMed2.Text, edtDesvPad2.Text));
edtEnergia2.Text:=FormatFloat('0.0', Energia(frmMultImg.mat2, engia2,
frmMultImg.edtNum2.Text));
edtEntropia2.Text:=FormatFloat('0.0', Entropia(frmMultImg.mat2, entpia2,
frmMultImg.edtNum2.Text));
end;
if frmMultImg.edtNum3.Text <> '0' then
begin
edtMed3.Text:=FormatFloat('0.000', MedPond(frmMultImg.mat3, med3,
frmMultImg.edtNum3.Text));
edtDesvPad3.Text:=FormatFloat('0.000', DesvPad(dpad3, med3,
frmMultImg.edtNum3.Text));
edtCurtose3.Text:=FormatFloat('0.000', Curtose(frmMultImg.mat3, curt3,

```

```

frmMultImg.edtNum3.Text, edtMed3.Text, edtDesvPad3.Text));
edtEnergia3.Text:=FormatFloat('0.0', Energia(frmMultImg.mat3, engia3,
frmMultImg.edtNum3.Text));
edtEntropia3.Text:=FormatFloat('0.0', Entropia(frmMultImg.mat3, entpia3,
frmMultImg.edtNum3.Text));
end;
end;

//----- cálculos relativos à Gaussiana -----}

//cálculo da média para um vetor genérico
function TfrmMEstat.MedGenerica(var vet: TArq; num:integer): Extended;
var i:Integer;
    aux:Extended;
begin
    aux:=0;
    for i:= 0 to (num - 1) do
        aux:= aux + vet[i];
    Result:= aux / num;
end;

//cálculo do desvio padrão para um vetor genérico
function TfrmMEstat.DesvPadGenerico(var vet: TArq; num:integer): Extended;
var b:Integer;
    aux:Extended;
begin
    aux:=0;
    for b:=0 to MAX_TOM do
        aux:= aux + Sqr(b - MedGenerica(vet, num));
    Result := Sqrt(aux) / MAX_TOM;
end;

//controle do gráfico da Gaussiana
//num -> número de arquivos; media -> média da característica desejada
//desvpad -> desvio padrão da característica desejada
procedure TfrmMEstat.TracaGauss(num: String; media, desvpad: Extended; vet: TArq;
Series: TChartSeries; tipo: String); //vet = vetor estatístico, como media
var i: integer; //ou curtose
    y: double;
begin
    with Hist.Title.Text do
        begin
            Clear;
            Add(tipo);
        end;
        for i:=0 to StrToInt(num) - 1 do
            begin
                y := (1 / (desvpad * 2 * Pi)) *
                (Power(2.71828, ((-0.5) * (Sqr(vet[i] - media)) /
                Sqr(desvpad))));
                Series.AddXY(vet[i], y, "cITeeColor);
            end;
        Hist.Repaint;
    end;

//controla o traçado das gaussianas, de acordo com a opção estatística desejada

```



```

procedure TfrmMEstat.ControleGaussiana;
var media, desvpad: Extended;
begin
  with frmMultImg do
  begin
    if edtNum1.Text <> '0' then //gaussiana 1
    if rbMedia.Checked then
      TracaGauss(frmMultImg.edtNum1.Text, StrToFloat(edtMed1.Text),
        StrToFloat(edtDesvPad1.Text), med1, Series1, 'Gaussiana das Médias')
    else if rbDesvPad.Checked then
      begin
        media:= MedGenerica(dp1, StrToInt(frmMultImg.edtNum1.Text));
        desvpad:= DesvPadGenerico(dp1, StrToInt(frmMultImg.edtNum1.Text));
        TracaGauss(frmMultImg.edtNum1.Text, media, desvpad, dp1, Series1,
          'Gaussiana dos Desvios Padrão');
      end
    else if rbCurtose.Checked then
      begin
        media:= MedGenerica(curt1, StrToInt(frmMultImg.edtNum1.Text));
        desvpad:= DesvPadGenerico(curt1, StrToInt(frmMultImg.edtNum1.Text));
        TracaGauss(frmMultImg.edtNum1.Text, media, desvpad, curt1, Series1,
          'Gaussiana das Curtoses');
      end
    else if rbEnergia.Checked then
      begin
        media:= MedGenerica(eng1, StrToInt(frmMultImg.edtNum1.Text));
        desvpad:= DesvPadGenerico(eng1, StrToInt(frmMultImg.edtNum1.Text));
        TracaGauss(frmMultImg.edtNum1.Text, media, desvpad, eng1, Series1,
          'Gaussiana das Energias');
      end
    else if rbEntropia.Checked then
      begin
        media:= MedGenerica(entp1, StrToInt(frmMultImg.edtNum1.Text));
        desvpad:= DesvPadGenerico(entp1, StrToInt(frmMultImg.edtNum1.Text));
        TracaGauss(frmMultImg.edtNum1.Text, media, desvpad, entp1, Series1,
          'Gaussiana das Entropias');
      end
    end;

    if edtNum2.Text <> '0' then //gaussiana 2
    if rbMedia.Checked then
      TracaGauss(frmMultImg.edtNum2.Text, StrToFloat(edtMed2.Text),
        StrToFloat(edtDesvPad2.Text), med2, Series2, 'Gaussiana das Médias')
    else if rbDesvPad.Checked then
      begin
        media:= MedGenerica(dp2, StrToInt(frmMultImg.edtNum2.Text));
        desvpad:= DesvPadGenerico(dp2, StrToInt(frmMultImg.edtNum2.Text));
        TracaGauss(frmMultImg.edtNum2.Text, media, desvpad, dp2, Series2,
          'Gaussiana dos Desvios Padrão');
      end
    else if rbCurtose.Checked then
      begin
        media:= MedGenerica(curt2, StrToInt(frmMultImg.edtNum2.Text));
        desvpad:= DesvPadGenerico(curt2, StrToInt(frmMultImg.edtNum2.Text));
        TracaGauss(frmMultImg.edtNum2.Text, media, desvpad, curt2, Series2,
          'Gaussiana das Curtoses');
      end
    end
  end
end

```

```

else if rbEnergia.Checked then
begin
media:= MedGenerica(engia2, StrToInt(frmMultImg.edtNum2.Text));
desvpad:= DesvPadGenerico(engia2, StrToInt(frmMultImg.edtNum2.Text));
TracaGauss(frmMultImg.edtNum2.Text, media, desvpad, engia2, Series2,
'Gaussiana das Energias');
end
else if rbEntropia.Checked then
begin
media:= MedGenerica(entpia2, StrToInt(frmMultImg.edtNum2.Text));
desvpad:= DesvPadGenerico(entpia2, StrToInt(frmMultImg.edtNum2.Text));
TracaGauss(frmMultImg.edtNum2.Text, media, desvpad, entpia2, Series2,
'Gaussiana das Entropias');
end;

if edtNum3.Text <> '0' then //gaussiana 3
if rbMedia.Checked then
TracaGauss(frmMultImg.edtNum3.Text, StrToFloat(edtMed3.Text),
StrToFloat(edtDesvPad3.Text), med3, Series3, 'Gaussiana das Médias')
else if rbDesvPad.Checked then
begin
media:= MedGenerica(dpad3, StrToInt(frmMultImg.edtNum3.Text));
desvpad:= DesvPadGenerico(dpad3, StrToInt(frmMultImg.edtNum3.Text));
TracaGauss(frmMultImg.edtNum3.Text, media, desvpad, dpad3, Series3,
'Gaussiana dos Desvios Padrão');
end
else if rbCurtose.Checked then
begin
media:= MedGenerica(curt3, StrToInt(frmMultImg.edtNum3.Text));
desvpad:= DesvPadGenerico(curt3, StrToInt(frmMultImg.edtNum3.Text));
TracaGauss(frmMultImg.edtNum3.Text, media, desvpad, curt3, Series3,
'Gaussiana das Curtoses');
end
else if rbEnergia.Checked then
begin
media:= MedGenerica(engia3, StrToInt(frmMultImg.edtNum3.Text));
desvpad:= DesvPadGenerico(engia3, StrToInt(frmMultImg.edtNum3.Text));
TracaGauss(frmMultImg.edtNum3.Text, media, desvpad, engia3, Series3,
'Gaussiana das Energias');
end
else if rbEntropia.Checked then
begin
media:= MedGenerica(entpia3, StrToInt(frmMultImg.edtNum3.Text));
desvpad:= DesvPadGenerico(entpia3, StrToInt(frmMultImg.edtNum3.Text));
TracaGauss(frmMultImg.edtNum3.Text, media, desvpad, entpia3, Series3,
'Gaussiana das Entropias');
end;
end;
end;

{----- Controle do form -----}

procedure TfrmMEstat.FormShow(Sender: TObject);
begin
Hist.Title.Text.Clear;
CalculaDadosEstat;

```

```
ControleGaussiana;  
end;  
  
end.
```