

ALEXANDRE JORGE DUARTE DE SOUZA

PROPOSIÇÃO DE UM NOVO MÉTODO DE MEDIÇÃO DO DESGASTE
EM FERRAMENTAS DE CORTE EMPREGADAS EM OPERAÇÕES DE
FRESAMENTO DA MADEIRA

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção do título
de Doutor em Engenharia Mecânica na área
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

Guaratinguetá
2009

S729p Souza, Alexandre Jorge Duarte de
Proposição de um novo método de medição do desgaste em
ferramentas de corte empregadas em operações de fresamento da madeira
/ Alexandre Jorge Duarte de Souza - Guaratinguetá : [s.n.], 2009.
108f. : il.
Bibliografia: f. 95-99

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2009.
Orientador: Prof Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

1. Usinagem 2. Madeira I. Título

CDU 621.9

ALEXANDRE JORGE DUARTE DE SOUZA

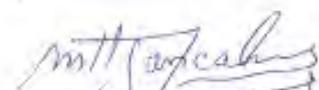
ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

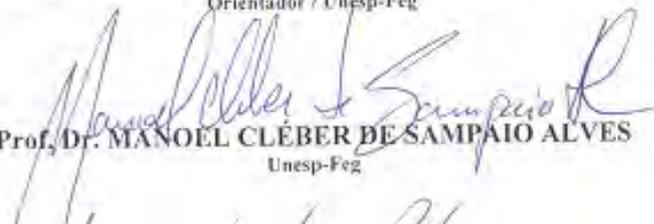
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

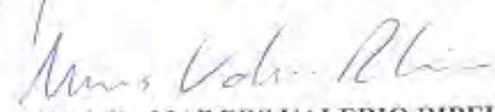
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

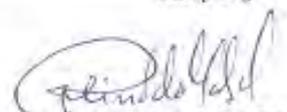

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

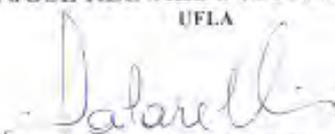
BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONÇALVES
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
Unesp-Feg


Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO
Unesp-Feg


Prof. Dr. JOSÉ REINALDO MOREIRA DA SILVA
UFLA


Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI
Unesp-Bauru

dezembro de 2009.

DADOS CURRICULARES**ALEXANDRE JORGE DUARTE DE SOUZA**

NASCIMENTO	30.03.1970 – SÃO CARLOS / SP
FILIAÇÃO	Jorge Duarte de Souza Neiva Simões Duarte de Souza
1990/1996	Curso de Graduação Engenharia de Produção Mecânica – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
1998/2002	Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, nível de Mestrado, na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

“A árvore quando está sendo cortada
observa com tristeza que o cabo do
machado é de madeira”

Provérbio árabe

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves* pelo apoio e incentivo para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus pais Jorge e Neiva pela dedicação e suporte incondicional.

Aos funcionários e professores do Campus Experimental de Itapeva, pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos amigos Manoel Cleber, Juliana Cortez, Celso Salamon, Cyro, Fernando Caneppele e Cristiane Ignácio pela disposição e conselhos no desenvolvimento da tese.

Aos Professores Doutores Ivaldo de Domenico Valarelli e José Ângelo Cagnon pelo apoio no uso dos equipamentos e instalações da Faculdade de Engenharia de Bauru.

Aos membros da banca de qualificação em especial ao Professor Doutor Luis Rogério de Oliveira Hein pela contribuição no aperfeiçoamento do trabalho.

Aos funcionários da pós-graduação Regina, Cristina e ao André de Itapeva pela presteza e colaboração.

SOUZA, A. J. D. **Proposição de um novo método de medição do desgaste em ferramentas de corte empregadas em operações de fresamento da madeira.** 2009. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

RESUMO

Dada à variedade de parâmetros que influenciam o desgaste de ferramentas de corte na usinagem de madeiras, principalmente em virtude das características deste material, e considerando a falta de recursos laboratoriais nas empresas, o presente trabalho propõe o emprego de um novo método que permite mensurar o desgaste dessas ferramentas utilizando análise de imagens de digitalizadores de mesa, no qual se verificou a confiabilidade e a praticidade do método proposto para seu uso em empresas e como possível ferramenta para auxiliar estudos futuros na área de usinagem de madeira. Neste trabalho é apresentado um estudo de caso para ferramentas de aço rápido em operações de fresamento de madeira da espécie *Eucalyptus grandis*, onde se acompanhou a sucessiva perda de área da aresta cortante. Para o acompanhamento do desgaste, utilizou-se a análise das imagens digitais com o auxílio de um “software” de uso livre. Os resultados mostraram que efetivamente os digitalizadores podem ser utilizados para medições metrológicas após correta calibração. O estudo de caso apresentou uma curva de desgaste coerente com os demais trabalhos da área, levando a confirmar a confiabilidade do método de medição proposto.

PALAVRAS-CHAVE: usinagem, madeira, desgaste, ferramentas de corte, digitalizador de mesa.

SOUZA, A. J. D. **Proposal of a new method to measure cutting tool wear in wood milling process**. 2009. 108 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

ABSTRACT

Due the variety of variables that influences the cutting tool wear in the Wood machining. Mostly in reason of the material characteristics, and considering the lackness of laboratorial resources in the companies, the present work proposes the use of a new method that allows measure the wear of those tools utilizing digital images obtained from digital scanners. This study verifies the trustfulness and the practicality of the proposal method to be used in companies and possible tool to facilitate future studies in the area of wood processing. In this work its shown a case study utilizing high speed steel (HSS) tools in wood milling processing of the specie *Eucalyptus grandis*, where was observed the progressive loss of area in the cutting tool surface. To process the wear measurement, was utilized a free image analysis software. The case study showed a curve of wear consistent with other studies of the area, leading to confirm the reliability of the proposed measurement method.

KEYWORDS: wood, machining, wear measure, cutting tools, digital scanner.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Relevância e justificativa	9
1.2. Hipótese e objetivos de pesquisa	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. Operações de fresamento	11
2.1.1. Fresamento de madeira	12
2.1.2. Desgaste de ferramentas em usinagem de madeira	16
2.1.3. Equipamentos para medição de desgaste em ferramentas de corte de madeira ..	19
2.2. Aspectos metrológicos ligados á medição de desgaste de ferramentas.	27
2.2.1. Erros associados aos processos de medições	30
2.2.1.1. Classificação dos erros	31
2.2.1.2. Incerteza de medição	33
2.2.1.3. Propagação de erros.....	33
2.2.1.4. Estimativa da incerteza de medição	34
2.2.2. Aspectos estatísticos ligados a análise de erros.....	35
2.2.2.1 Estimativa por ponto da média populacional	36
2.2.2.2. Intervalo de confiança com desvio padrão desconhecido	36
2.2.2.3. Teste de hipótese	37
2.2.2.4. Diferença entre tratamentos para amostras grandes	37
2.2.2.5. Dados pareados.....	38
2.3. Medições a partir de imagens digitais	38
2.3.1. Imagem óptica	39
2.3.2. Imagem digital.....	39
2.3.3. Calibração espacial.....	40
2.3.4. Transformação espacial	41
2.3.5. Aberrações ópticas.....	42
3. ASPECTOS TECNOLÓGICOS	43
3.1. Couple Charged Device (CCD).....	43
3.2. Limiarização	44
3.3. Digitalizador de mesa	45
3.4. Software ImageJ	50
3.5. Plugin Turboreg.....	51
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1. Experimentações de análise de desgaste.	53
4.2. Experimentos para calibração do digitalizador	60
4.3. Análises das imagens obtidas	66
4.4. Sobreposição de imagens	68
4.5. Digitalização de imagem das ferramentas após série de ensaios	72
4.6. Comparação da máscara com a imagem final do ensaio.....	73
4.7. Mensuração do Desgaste pela Sobreposição de Imagens	73
4.8. Medição dos comprimentos dos Blocos padrão.	75
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1. Calibração do sistema empregando-se blocos padrão.....	77
5.2. Experimentação para análise de desgaste.....	79
5.3. Experimentação para verificação de erros com relação à posição do objeto.	81

5.4. Experimentação para verificação de erros de repetibilidade.....	85
5.5. Experimentação para verificação de erros em diversos blocos	86
5.6. Análise qualitativa das imagens comparando-se com um projetor de perfil.....	89
5.7. Prováveis fontes de erros na utilização do sistema.	90
6. CONCLUSÕES.....	92
REFERÊNCIAS	94
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	98
ANEXO A - Imagens das experimentações.....	102

1. INTRODUÇÃO

A indústria madeireira no Brasil, em especial a de produção de móveis, vem sofrendo um processo de modernização ao longo dos últimos anos, com a profissionalização da empresa típica de origem familiar e a formação de arranjos produtivos locais que potencializam seu crescimento e a utilização de novas tecnologias.

Entretanto, ainda nota-se uma constante falta de recursos financeiros para o investimento em novas tecnologias e a baixa qualificação da mão-de-obra em seus quadros, dificultando o processo de modernização.

Dado o atual estágio de desenvolvimento tecnológico dessa indústria, via de regra, o momento para a substituição da ferramenta de corte é determinado pelo operador quando percebe que as peças estão com o acabamento comprometido ou pela definição de períodos baseados em experiências empíricas, o que leva a muitos equívocos e a desperdício de produção.

As condições de afiação das ferramentas de corte nos processos de fresamento de madeira têm impacto significativo sobre o acabamento superficial do material e sobre o número de operações necessárias para a obtenção da qualidade almejada e a lucratividade da operação.

A globalização e as oscilações cambiais constantes de moedas têm levado a uma maior competitividade e uma necessidade de maior eficiência nos processos produtivos, com redução de custos, maior flexibilidade e qualidade dos produtos.

Outro fator que vem caracterizando a época atual é a constante evolução computacional, acompanhada do barateamento de equipamentos de processamento de imagens digitais com ganhos de resolução e qualidade. Nesse sentido, pesquisas devem contribuir com soluções que venham aliar a capacidade disponibilizada pela informática e as constantes e peculiares demandas da indústria madeireira.

O presente trabalho visa auxiliar nessa demanda focando em uma das operações de usinagem mais comumente utilizadas por essa indústria, apresentando soluções práticas e de baixo custo utilizando digitalizadores.

1.1. Relevância e justificativa

Estimativas do ministério da indústria e comércio MDIC (2008) indicam que o comércio florestal no mundo movimentou 296 bilhões de dólares anualmente e o Brasil possui apenas 1,5% deste total. Embora isso represente uma boa parte da base exportadora brasileira, o País apresenta um grande potencial competitivo em função da oferta de matéria-prima e recursos naturais.

Uma das razões para esse potencial competitivo não se converter em resultados operacionais, está no atual estágio de desenvolvimento tecnológico de nossa indústria que geralmente encontra-se em um lento processo de modernização.

Dentro do segmento madeireiro a produção de móveis tem se destacado, principalmente com a formação de pólos industriais exportadores como os da região sul do País.

Para a fabricação de móveis, as operações de fresamento são quase que imprescindíveis, consumindo boa parte do tempo de processos e tendo impacto significativo sobre a qualidade de acabamento superficial e sobre os custos do produto final.

O método proposto procura aumentar o controle sobre as condições de usinagem em operações de fresamento. Controle esse que se traduziria em diminuição de retrabalhos, desperdícios de matéria-prima e diminuição do ônus ambiental dessa atividade.

Outro fator a ser considerado para o desenvolvimento do presente estudo é a utilização do método proposto como ferramenta auxiliar para a pesquisa na área de usinagem de madeira, que atuando como facilitador na obtenção de dados sobre a medição de desgaste pode ajudar em estudos para a compreensão desses mecanismos nas espécies disponíveis na flora brasileira.

Dentro da pesquisa bibliográfica, ficou evidente a pequena disponibilidade de material nessa área e, portanto espera-se poder contribuir para o desenvolvimento dessa área de conhecimento.

1.2. Hipótese e objetivos de pesquisa

A hipótese de pesquisa proposta por esse estudo é a de que “Imagens digitais obtidas pelos digitalizadores de mesa podem ser usadas como ferramentas metrológicas para estudos de desgaste em ferramentas de usinagem de madeira”.

Para a verificação dessa hipótese foram definidos dois objetivos: Verificar a acuracidade e precisão das medições do equipamento; Analisar a viabilidade do método para medição do desgaste de ferramentas de corte. A hipótese de pesquisa e o seu desdobramento podem ser vistos na Figura 1.1

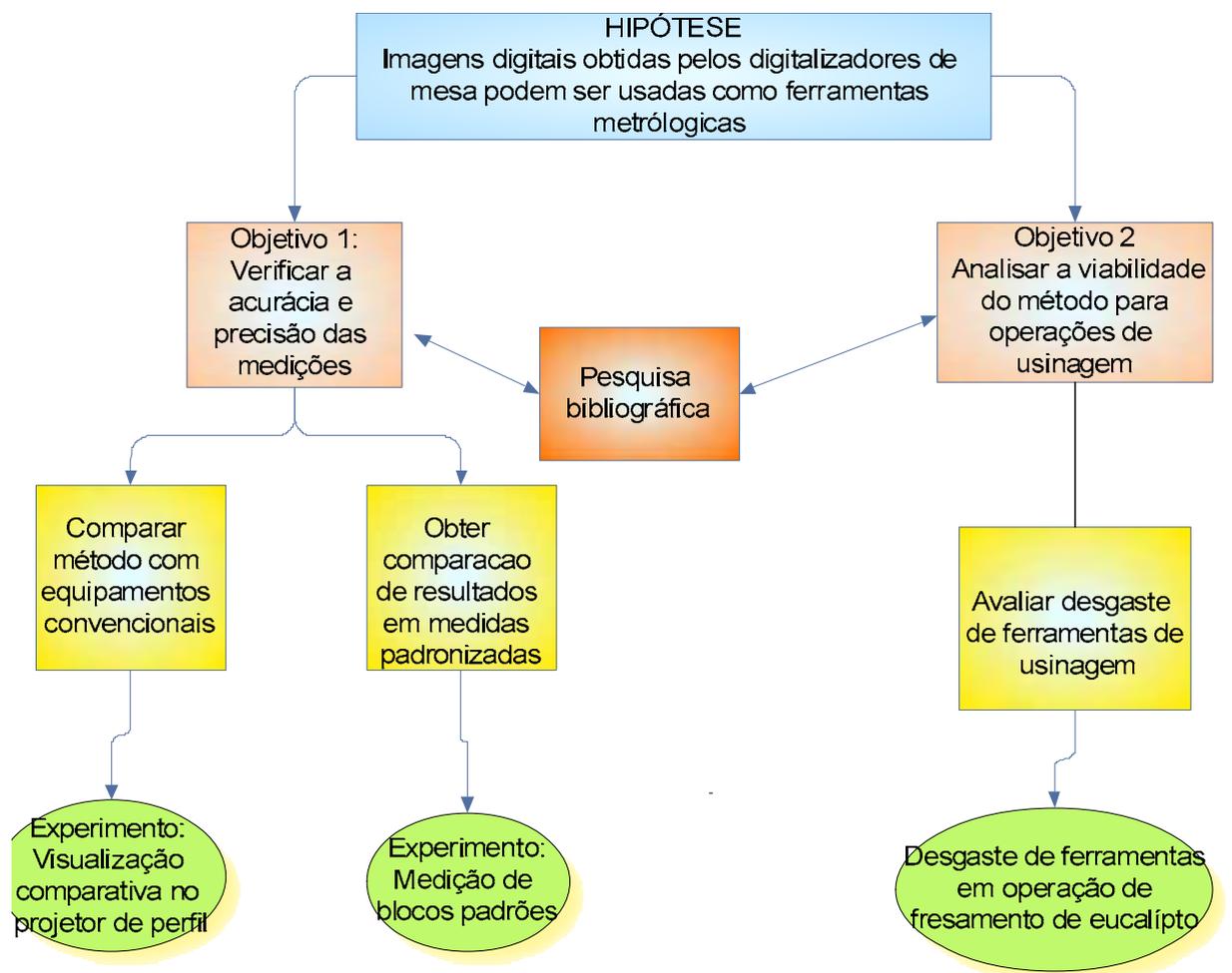


Figura 1.1 - Hipótese de pesquisa e seu desdobramento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica encontra-se dividida em três assuntos principais: o primeiro refere-se ao processo de fresamento e ao desgaste associado. O segundo relacionado sobre parâmetros metrológicos que envolvem a medição do desgaste das ferramentas de corte e por último às questões básicas da obtenção de medições a partir de imagens digitais.

2.1. Operações de fresamento

No levantamento bibliográfico efetuado verificou-se existência de poucos trabalhos nacionais na área de desgaste, quando foca-se no processamento de madeira e em específico nas operações de fresamento. Entretanto os conceitos envolvidos em outros processos de usinagem, como o processo de corte de madeira, são análogos e podem ser utilizados como referência teórica para o trabalho.

De acordo com Ferraresi (1977) o fresamento é definido como o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multi-cortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer.

Distinguem-se dois tipos básicos de fresamento:

- Fresamento cilíndrico tangencial: processo de fresamento destinado a obtenção de superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta. Quando a superfície obtida não for plana ou o eixo de rotação da ferramenta for inclinado em relação à superfície originada na peça, será considerado um processo especial de fresamento tangencial;
- Fresamento frontal: processo de fresamento destinado a obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta.

2.1.1. Fresamento de madeira

Segundo Gonçalves (2000), o processo de fresamento periférico é uma situação de usinagem, também chamada de processo de aplainamento para usinagem de madeira, e envolve a remoção de excesso de madeira da peça em forma de cavaco os quais são formados pelo contato intermitente da peça com uma ferramenta de uma ou mais facas que giram no porta-ferramentas. O conjunto do cabeçote porta-ferramentas com as lâminas de corte, mais os suportes de fixação e quebra cavacos, é de uso universal em máquinas de beneficiamento da madeira nos processos de aplainamento e fresamento nas mais variadas formas (rasgos, rebaixos, chanfros, molduramento de perfis etc.). Atualmente utilizam-se ferramentas de um único corpo mono ou multicortantes, com pastilhas ou lâminas de corte fixas ou intercambiáveis no corpo do cabeçote. Na Figura 2.1 é apresentado um cabeçote porta facas e uma fresa de corpo único, comumente utilizadas nessas operações.



Figura 2.1 - Cabeçote porta facas e fresa de corpo único. Fonte: Indfema ind.(2009).

De acordo com Weissenstein (1997) o fresamento ou aplainamento produzem um arco ciclóide que marca a superfície da madeira deixando marcas características em função das condições de usinagem e que é indicador da qualidade do acabamento superficial obtido conforme apresentado na Figura 2.2.

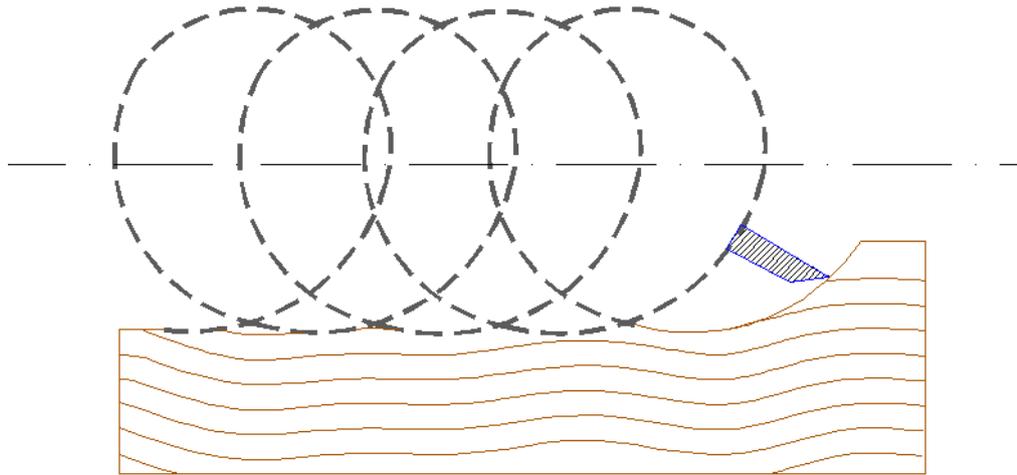


Figura 2.2 – Arco ciclóide no na operação de fresamento . Adaptado de Weissenstein (1997)

A seguir são apresentadas algumas definições fundamentais para a compreensão processo de fresamento segundo Ferraresi (1977):

- Movimentos entre a peça e aresta cortante:

Movimento de corte: é um movimento entre a peça e a ferramenta e, o qual sem um movimento de avanço origina somente uma única remoção de cavaco durante uma volta ou um curso;

Movimento de avanço: é um movimento entre a peça e a ferramenta que juntamente com o movimento de corte, originam um levantamento repetitivo ou contínuo de cavaco durante várias revoluções ou cursos. O movimento de avanço pode ser resultante de vários movimentos componentes, como por exemplo, o movimento de avanço principal e o movimento de avanço lateral;

Movimento efetivo de corte: é um movimento resultante da combinação dos movimentos de corte e de avanço realizados ao mesmo tempo.

- Direções dos movimentos

Direção de corte: é a direção instantânea do movimento de corte;

Direção de avanço: é a direção instantânea do movimento de avanço;

Direção efetiva de corte: é a direção instantânea do movimento efetivo de corte.

- Velocidades:

Velocidade de corte: é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte;

Velocidade de avanço: é a velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço;

Velocidade efetiva: de corte é a velocidade instantânea do ponto de aresta cortante, segundo a direção efetiva de corte.

- Ângulos:

Ângulo φ da direção de avanço: é o ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte;

Ângulo η da direção efetiva de corte: é o ângulo entre a direção efetiva de corte e a direção de corte;

Ângulo de folga α : também chamado de ângulo de incidência, é o ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte, medido no plano de medida da cunha cortante;

Ângulo de Cunha β : é o ângulo entre a superfície de folga e a superfície de saída medida no plano de medida da cunha cortante.

O processo de fresamento pode ser classificado como fresamento concordante se a ferramenta se move na mesma direção da peça ou fresamento discordantes no caso contrário. Na Figura 2.3 é apresentado o fresamento discordante mais comumente utilizado para a usinagem de madeira e as grandezas envolvidas.

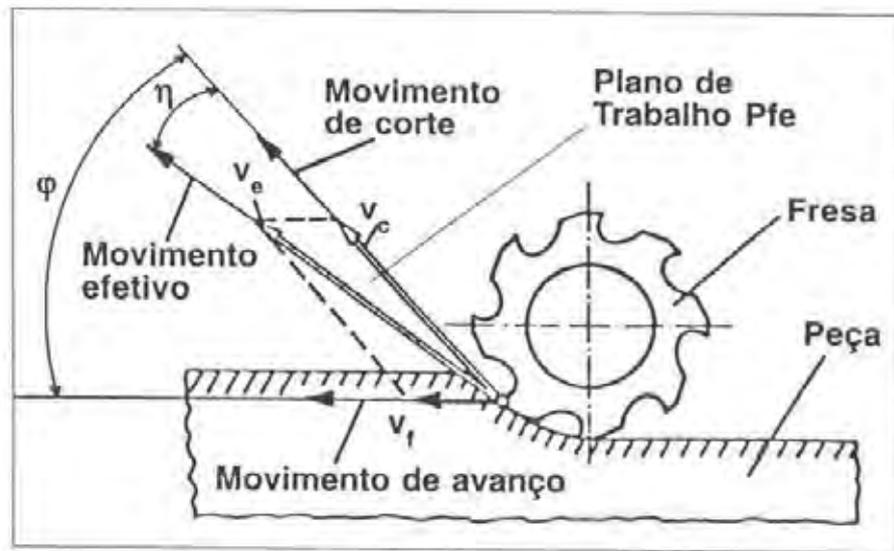


Figura 2.3 – Operação de fresamento. Fonte: norma ABNT 6162/88 in Gonçalves (2000).

Pfe: plano de trabalho é o plano que passando pelo ponto de corte escolhido contém as direções de corte e de avanço;

V_c : velocidade de corte;

V_e : velocidade efetiva;

V_f : velocidade de avanço ;

ϕ : Ângulo de direção de avanço;

η : Ângulo de direção efetiva.

Segundo Gonçalves (1989) o processo de fresamento pode ser classificado segundo o maquinário empregado. Na Figura 2.4 são apresentados exemplos de máquinas mais comumente utilizados em processos de fresamento de madeira.



Figura 2.4 - Máquinas para fresamento de madeira.

2.1.2. Desgaste de ferramentas em usinagem de madeira

Witte (1998) apresenta o conceito de vida da ferramenta como sendo o tempo necessário entre duas afiações e está ligado a largura da marca do desgaste produzido na ponta da ferramenta.

Gottlob (1996) mostra o desgaste da ferramenta de corte para madeira como sendo o deslocamento da aresta de corte conforme pode ser visto na Figura 2.5 e sua respectiva nomenclatura.

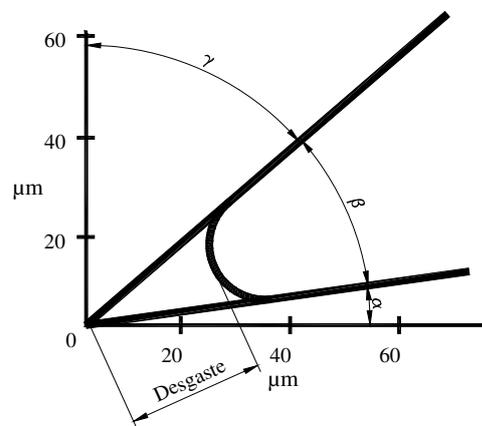


Figura 2.5 - Perfil da cunha de corte das ferramentas: ângulo de folga “ α ”, ângulo de cunha “ β ”, ângulo de saída “ γ ”. Fonte: Gottlob (1996).

No estudo dos diversos trabalhos científicos consultados o desgaste em ferramentas no corte de madeira é um processo complexo com diversas variáveis que interferem em sua progressão especialmente em função das características anisotrópicas e da grande quantidade de espécies de madeira diferentes disponíveis no mercado. O contato entre o gume cortante da ferramenta e a madeira em seu movimento de avanço gera a perda progressiva de material em função do comprimento usinado conforme apresentado por Gottlob (1996), Figura 2.6.

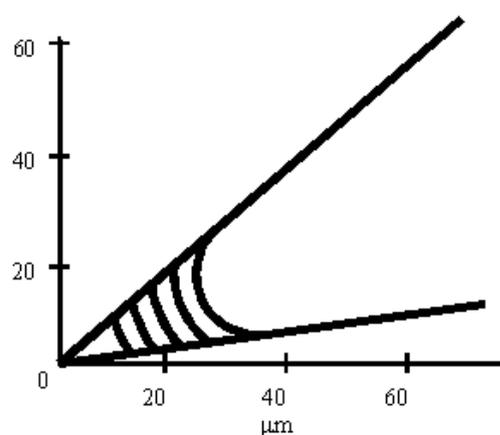


Figura 2.6 – Representação esquemática do desgaste progressivo da ferramenta em função do percurso usinado. Adaptado de Gottlob (1996).

As variáveis que interferem no processo de desgaste em usinagem de madeira apresentam-se em diversos trabalhos na literatura.

Farias (2000) estudou a usinagem de madeiras de duas espécies de eucalipto utilizando altas velocidades de avanço. Gonçalves (1990), Gonçalves (1993), Gonçalves (2000), Valarelli (1993), Gottlob (1991), Gottlob (1996), apresentam em seus trabalhos estudos que apontam essas variáveis em função de: material da ferramenta (stellite, aço rápido metal duro), velocidade de corte, velocidade de avanço, teor de sílica presente na madeira, presença de extrativos, temperatura, ataque galvânico, profundidade de corte, defeitos de alinhamentos, resistência mecânica das espécies, presença de contaminantes na madeira, direção de corte com relação às fibras, presença de alburno, rotação do eixo da ferramenta, temperatura, teor de umidade.

Gottlob (1996) desenvolveu um estudo sobre desgaste de ferramentas em operações de fresamento de madeira de *Eucalyptus grandis*, no estado verde com umidade média de 36 % e, madeira seca ao ar com umidade média de 14 %. Como materiais de ferramenta, usou o aço VC-131 e o stellite-l. Quatro rotações diferentes 3136, 4320, 5320 e 6220 rotações por minuto, correspondendo às velocidades de corte de aproximadamente 25, 35; 42 e 50 m.s⁻¹.

Ainda neste trabalho o autor verifica que o desgaste das ferramentas tanto de VC-131 como de Stellite-l é menor na rotação de 3136 rpm, tendo como base o tempo de usinagem ou o percurso de corte. O desgaste com a rotação de 4320 rpm apresenta maior desgaste se comparado com a curva de desgaste a 3136 rpm, e é inferior ao desgaste que ocorre a 6220 rpm. Aponta que na usinagem das madeiras, o desgaste das ferramentas é abrasivo e corrosivo. Conclui que na usinagem de madeira verde, quanto maior a velocidade de corte, maior é a diferença do desgaste comparativamente a madeira seca nas mesmas condições. E infere que existe predominância de desgaste por corrosão.

O mesmo autor afirma também que se o desgaste fosse puramente abrasivo sem outras influências, ele seria dependente apenas do percurso de corte, nestas condições, deveria haver uma total coincidência para todas as velocidades.

As curvas de vida para o Stellite-1 e VC-131, considerando o tempo de vida para 100 micrometros de desgaste contra a velocidade, podem ser expressas na forma da fórmula de Taylor $V^n \cdot T = C$

$$\text{Material VC-131 } (T_{vc}-51,2875).V^5=6,907.10^{17}$$

$$\text{Material stellite-1 } (T_s-155,276).V^3=10,140.10^{11}$$

Gottlob (1991), afirmou que um dos problemas mais sérios do processamento de madeiras e a perda do fio de corte das serras e facas de corte. A perda do fio de corte afeta: a qualidade do corte e a rugosidade das superfícies usinadas; aumenta energia consumida; os custos de manutenção das ferramentas; o custo de manufatura e reduz a produção.

2.1.3. Equipamentos para medição de desgaste em ferramentas de corte de madeira

Ferraresi (1977) indicou que a medição de desgaste em décimos de milímetros pode ser realizada com a utilização de uma lupa com retículo e ampliação de 8X, conforme mostrado na Figura 2.7



Figura 2.7 - Lupa de aumento de 8x e seu reticulo de medição. Fonte: Mitutoyo (2009).

Para medição de desgaste com maior acuracidade, Ferraresi (1977) indica um microscópio de oficina com mesa de avanço micrométrico que permite a medição de centésimos de milímetro (Figura 2.8).



Figura 2.8 - Microscópio de oficina. Fonte: Mitutoyo (2009).

Gottlob (1996) utilizou em seus experimentos uma mesa de coordenadas combinada com um relógio comparador milésimal conectado a uma placa de aquisição de dados, além de um microscópio binocular de luz refletida com ampliação de 25 vezes. A Figura 2.9 ilustra o equipamento.



Figura 2.9 - Aparato para medição de desgaste utilizando relógio comparador, mesa micrométrica e sistema de aquisição de dados. Fonte: Gottlob(1996).

Valarelli (1993) em seu estudo utiliza um projetor de perfis com lentes de ampliação e mesa de coordenadas micrométricas conforme apresentado na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Projetor de perfis com mesa micrométrica. Fonte: Mitutoyo(2009)

Outro equipamento com possibilidade de uso para análise de desgaste, embora menos usual, é a mesa de três coordenadas que permite a geração do perfil tridimensional de objetos com acuracidade micrométrica, pelo contato mecânico entre a ponta de uma sonda e a peça em análise (Figura 2.11). Mais recentemente foram desenvolvidos equipamentos que combinam medições ópticas com o contato mecânico.



Figura 2.11 - Mesa de três coordenadas acopladas ao sistema de aquisição digital de dados.

Slătineanu et al. (2007) propõe um sistema óptico capaz de monitorar o desgaste de ferramentas em operações de torneamento, acoplado-se um tubo de microscópio ao carro porta-ferramentas de um torno mecânico, conforme apresentado na Figura 2.12.

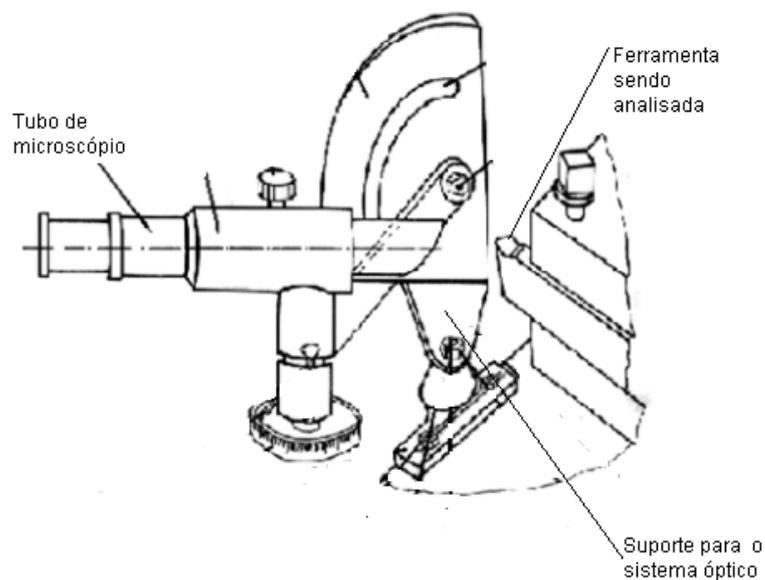


Figura 2.12 - Dispositivo óptico acoplado ao carro do porta-ferramentas de um torno para medição do desgaste. Adaptado de Slătineanu et al (2007).

Szwajka1 e Górski (2006) apresentaram uma abordagem para o monitoramento das condições das ferramentas em operações de plainamento em máquinas CNC, através da análise das vibrações medidas durante a operação. As amplitudes após

filtragem apresentaram relativa correlação ao desgaste da ferramenta conforme os resultados que se apresenta na Figura 2.13.

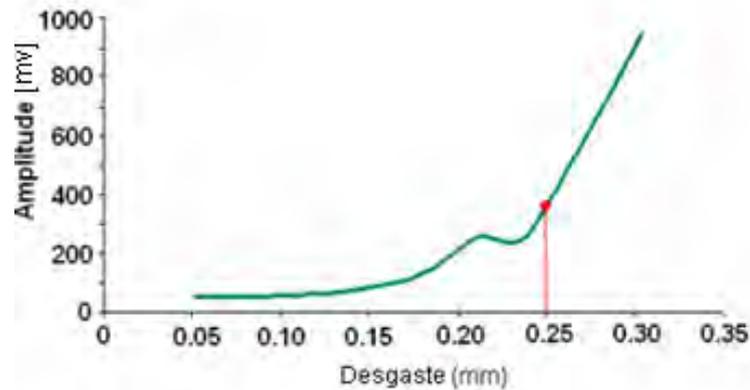


Figura 2.13 Correlação entre amplitude de vibração e desgaste da ferramenta em operações de fresamento de madeira em máquina CNC. Fonte: adaptado de Szwajka1 e Górski (2006).

Yan e Goebel (2000) utilizaram redes neurais para avaliar métodos computacionais baseados em inteligência artificial que permitam a melhor análise de sinais brutos de emissão acústica dentro do contexto de desgaste de ferramentas em operações de fresamento em aço. Os sinais se originaram de dois sensores de emissão acústica, dois sensores vibracionais e um sensor de monitoramento de potência. Como resultado os métodos se mostraram promissores desde que em condições experimentais estáveis.

Gisip, Gazo e Stewart (2007) em seu estudo sobre operações de fresamento de madeira refrigerado a ar, com ferramentas de carbeto de tungstênio, utilizam um microscópio óptico com câmera acoplada e “software” de análise de imagens digitais para medir o desgaste em operações de fresamento de painéis de madeira. As imagens mostrando a diferença de desgaste sobre diferentes temperaturas são apresentadas na Figura 2.14.

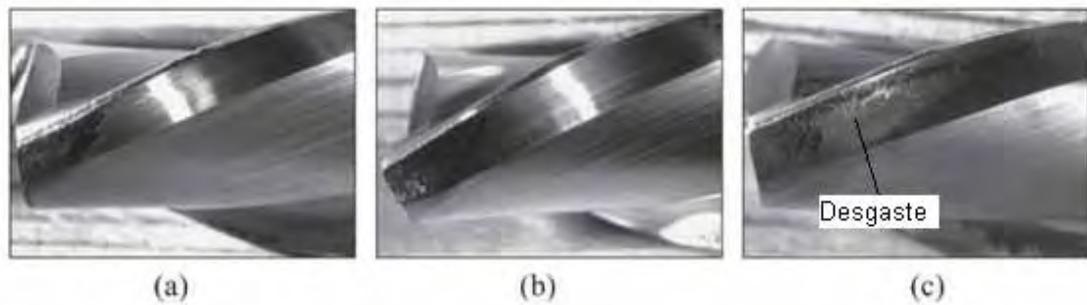


Figura 2.14 - Desgaste em ferramentas de carbeto de tungstênio com refrigeração a ar (a) $-6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) $4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e (c) $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fonte: Gisip, Gazo e Stewart (2007).

Matsumura, Murayama e Usui (2001) utilizam um micrômetro de escaneamento laser, acoplado a mesa da fresadora, para medir o desgaste da ferramenta durante sua movimentação fora da peça. A diminuição da profundidade e largura de corte indicam o desgaste lateral e da ponta da ferramenta, conforme apresentado na Figura 2.15.

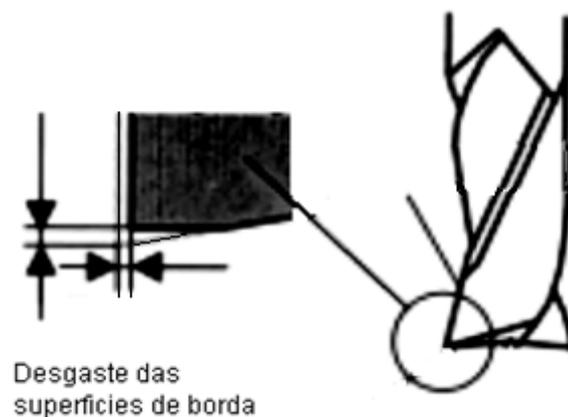


Figura 2.15 - Desgaste em fresa de usinagem de aço. Fonte: adaptado de Matsumura, Murayama e Usui (2001).

Fadare e Oni (2009) propuseram o desenvolvimento e apresentaram a aplicação de um sistema de visão artificial para a medição do desgaste de ferramentas. Uma vídeo-câmera de 4,8 megapixel acoplada a um computador pessoal obtém imagens da ponta da ferramenta iluminada por dois feixes de luz com ângulo de 45° de inclinação (Figura 2.16). Utilizando um editor de imagens é feita a detecção de bordas e a extração dos parâmetros de análise de desgaste. Comparativamente ao microscópio

óptico com ampliação de 8x, o autor obteve um erro absoluto médio de 3,2% para 32 amostras, que considera satisfatório para a aplicação considerada.

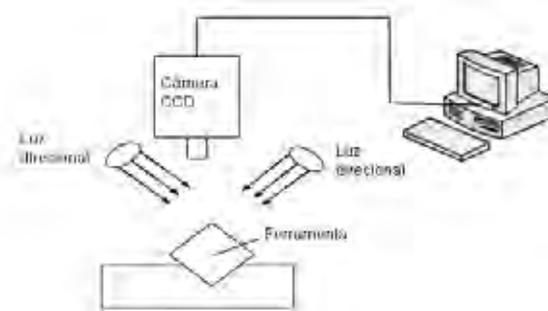


Figura 2.16 - Diagrama esquemático do sistema de visão para análise de desgaste. Fonte: Adaptado de Fadare e Oni (2009).

Wong et al. (1997) apresentaram o monitoramento das condições de ferramentas de usinagem utilizando padrões de laser difusos. Um feixe de laser de baixa intensidade é direcionado sobre a superfície usinada pela ferramenta e o feixe refletido projetado sobre uma tela semitransparente em um ângulo de incidência aproximado de 30°, conforme o diagrama da Figura 2.17. A imagem da tela é capturada por uma câmera CCD. Um “software” de processamento de imagens é utilizado para analisar a distribuição dos níveis de cinza da imagem. Como resultado os autores relatam que existem problemas com a correlação direta entre o acabamento superficial da peça e o desgaste da ferramenta. Entretanto o desvio padrão da distribuição pode ser um bom indicador principalmente nos estágios inicial e intermediário do processo de desgaste.

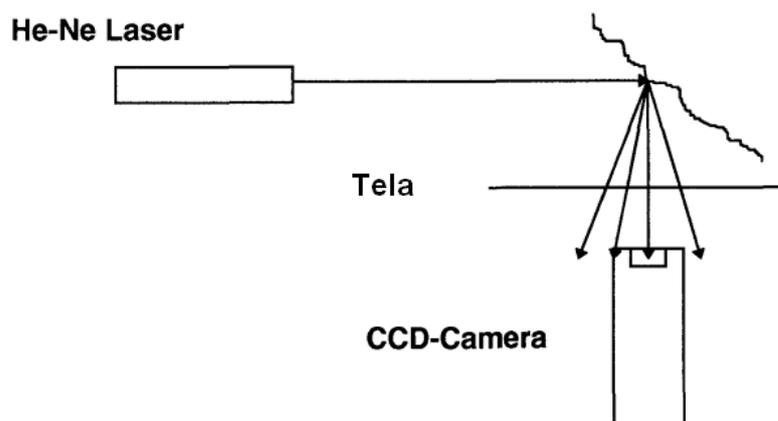


Figura 2.17 - Diagrama do sistema para análise de condições da ferramenta através de padrões difusos de laser em superfícies recém usinadas. Fonte adaptado de Wong et al. (1997).

Snr (2000) apresentou um estudo sobre sinais de sensores para medição de condições de desgaste de ferramenta em usinagem apresenta as seguintes variáveis que podem ser utilizadas para indicar a progressão do desgaste: emissão acústica, emissão ultra sônica, temperatura da ferramenta, forças de corte, vibração, acabamento de superfícies, análise de estresse da ferramenta, corrente do motor, magnetização da ferramenta, dimensão de peças usinadas e imagens ópticas e digitais.

Pfeifer e Wieggers (2000) apontaram em seu estudos a vantagem de utilizar sistemas de medição direta, em medição de desgastes de ferramentas em processo. Apresentam a visão artificial como tendo um grande potencial para esse fim e os cuidados necessários com a iluminação para a obtenção de imagens com boa acuracidade.

Jurkovic, Korosec e Kopac (2005) propuseram um nova abordagem para a medição de desgaste de ferramenta utilizando sistemas de visão CCD. Esta permite a visualização tridimensional da superfície desgastada o que possibilita a análise da formação de crateras na superfície de corte da ferramenta e não apenas o recuo das arestas de corte. Isto é possível através da projeção de linhas paralelas originadas por um feixe de laser. As distorções nas linhas são matematicamente calculadas para representarem a profundidade da cratera (Figura 2.18).

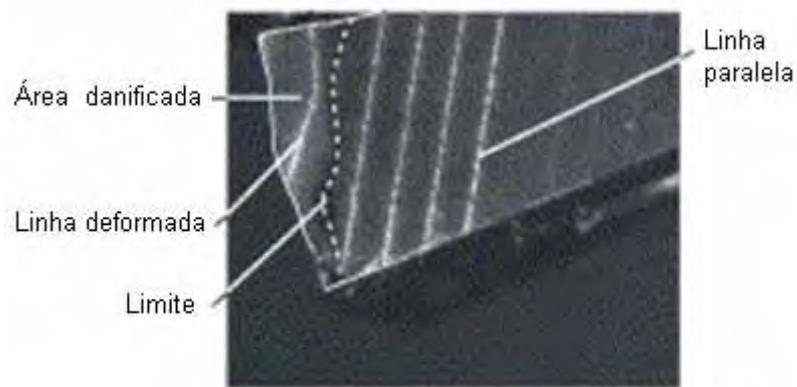


Figura 2.18 - Projeção de linhas de laser paralelas sobre a superfície da ferramenta para um sistema de medição tridimensional. Adaptado de Jurkovic, Korosec e Kopac (2005).

Diniz, Braghini e Teixeira (2008) utilizaram um microscópio eletrônico de varredura para obter informações sobre o mecanismo de surgimento do desgaste e sua mensuração, conforme apresentado na Figura 2.19.

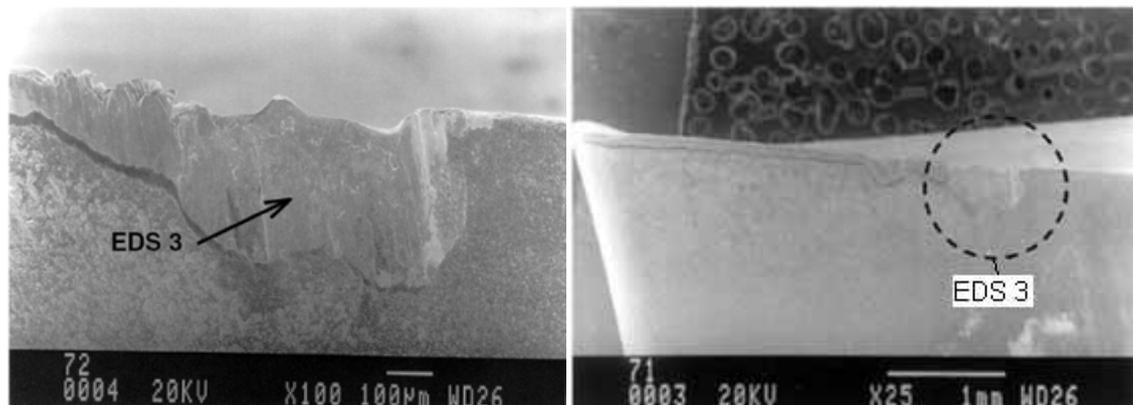


Figura 2.19 - Imagens da área de desgaste de ferramenta obtidas com um microscópio eletrônico de varredura. Fonte: Diniz, Braghini e Teixeira (2008).

2.2. Aspectos metrológicos ligados á medição de desgaste de ferramentas.

Para uma correta compreensão das questões metrológicas envolvidas adota-se o uso vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia adotada pelo INMETRO (2005) . Cujos conceitos de interesse para o presente estudo são:

- Incerteza de medição: Parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando;
- Exatidão de medição [accuracy of measurement / exactitude de mesure, f]: Grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando. O termo precisão não deve ser utilizado como exatidão.
- Repetitividade (de resultados de medições) [repeatability (of results of measurement) / répétabilité (des résultats de mesure), f]: Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição. Condições de repetitividade incluem: mesmo procedimento de medição; mesmo observador; mesmo instrumento de medição, utilizando nas mesmas condições; mesmo local; repetição em curto período de tempo.
- Erro (de medição) [error (of measurement) / erreur (de mesure), f]: resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando.
- Erro sistemático [systematic error / erreur systématique, f]: Média, que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando.
- Erro aleatório [random error / erreur aléatoire, f]: Resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando efetuadas sob condições de repetitividade.

Segundo Bechwith (1993) existem basicamente dois métodos de medição fundamentais:

- 1) Comparação direta com um primário ou secundário padrão;
- 2) comparação indireta pelo uso de um sistema calibrado.

Na comparação direta, para um sistema de medição em milímetros basta o uso de uma régua graduada para obter-se uma medição que se considera a régua um padrão

secundário, originado do padrão primário, que é o metro obtido pelas relações com a velocidade da luz.

Embora a medição por comparação direta torne o processo simples o método não é sempre adequado. Os sentidos humanos não são equipados para fazer comparações diretas de todas as quantidades com igual facilidade. Em muitos casos eles não são sensíveis o suficiente. No caso de uma medição com régua graduada em milímetros nossa acuracidade pode chegar a um milímetro, inviabilizando seu uso para diversas aplicações.

Beckwith (1993) ainda afirma que a comparação indireta faz o uso de alguma forma de dispositivo transdutor acoplado a uma cadeia de aparatos de conexão, chamados de sistema de medição. Essa cadeia de dispositivos converte os sinais de entrada em forma analógica, que então é processada e apresenta na saída como uma função conhecida do sinal original de entrada.

Fialho (2002) afirmou que a maior parte das quantidades ou relações que pretendemos obter não são fornecidas por leitura direta, mas calculadas a partir de valores experimentais e de grandezas correlacionadas.

O processamento da informação na comparação indireta é muitas vezes necessário para tornar a informação inteligível. Os sentidos humanos não são desenvolvidos para detectar a distensão em uma parte de uma máquina por exemplo. É necessária a ajuda de um sistema que percebe, converte e finalmente apresenta uma saída análoga na forma de uma distensão de uma escala ou gráfico ou leitura digital.

Processar um sinal analógico pode ser feito de várias formas. Geralmente é necessário aumentar a amplitude ou potência por algum tipo de amplificador ou em outros casos, extrair a informação desejada de uma massa de várias entradas pela filtragem. Em cada um dos vários casos, normalmente se faz o uso de métodos elétricos.

2.2.1. Erros associados aos processos de medições

Beckwith (1993) define erro como a diferença entre o resultado da medição e o valor real ou quantidade sendo medida.

Segundo Fialho (2002) qualquer medição científica ou valor experimental tem pouco valor a não ser que se tenha estimativa do seu erro ou incerteza e o valor reflita a acuracidade com que foi medido. A quase totalidade das grandezas físicas possui as seguintes características:

- Um valor numérico;
- Uma indeterminação;
- Uma unidade.

Ainda segundo Fialho(2002) deve-se sempre buscar o método mais simples e menos dispendioso o possível para o monitoramento de suas variáveis de controle, dentro da necessidade de sua aplicação e conseqüentemente do erro associado à medição.

Normalmente não se sabe o valor real da grandeza medida, portanto não podemos saber o erro, mas pode-se discutí-lo e estimar seu tamanho embora quase nunca se saiba sua real magnitude.

Beckwith (1993) caracteriza a existência dos dois tipos básicos de erro: sistemático e aleatório.

- Erro sistemático: que não pode ser descoberto por análises estatísticas por não apresentar distribuição e se origina de problemas, como por exemplo, a inclusão de sobrepeso em uma balança. Entretanto esses erros podem ser estimados por comparação com instrumentos mais acurados, do conhecimento de como o instrumento foi calibrado ou de experiências com instrumentos desse tipo em particular.

- Erro aleatório: que são randômicos e podem ser originados tanto em função da base de comparação do equipamento como em função das variações da amostra sendo medidas em etapas sucessivas.

Normalmente os erros sistemáticos e aleatórios ocorrem simultaneamente e na prática o erro total é o resultado da soma do erro aleatório e sistemático, conforme apresentado na Figura 2.19.

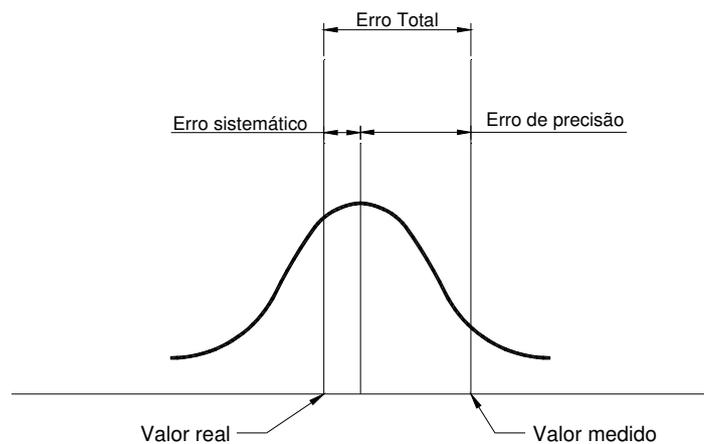


Figura 2.19 - Erros associados a uma medição. Fonte: Beckwith (1993).

2.2.1.1. Classificação dos erros

Beckwith (1993) definiu para fins de discussão os erros classificados como:

a) Erros sistemáticos:

- Erros de calibração;
- Erros humanos recorrentes com certa consistência;
- Erros causados por defeitos no equipamento;
- Erros de carregamento;
- Limitações da resolução do sistema.

b) Erros aleatórios:

- Erros humanos;
- Erros causados por distúrbios nos equipamentos;
- Erros causados por flutuações nas condições experimentais;

- Erros derivados de sensibilidade insuficiente do sistema de medição;
- Erros ilegítimos;
- Enganos durante o experimento;
- Erros computacionais após o experimento.

c) Erros algumas vezes aleatórios e sistemáticos:

- Erros de fricção e histerese do equipamento;
- Erros de calibração;
- Variações no teste ou condições ambientais;
- Erros resultantes entre variações de procedimentos ou definição entre experimentos.

Beckwith (1993) afirmou que o erro sistemático mais comum é o erro de calibração que ocorre quando a escala do instrumento não é ajustada corretamente para a leitura do valor a ser medido de maneira apropriada. Os erros de definição de zero levam todas as leituras a serem incrementadas ou decrementadas por um valor constante, mas os procedimentos de calibração tendem a eliminá-lo, testando o sistema de medição a partir de um padrão.

Fialho(2002) disse que os equipamentos de medição também podem introduzir erros auto-resultantes, devido falhas de fabricação, projeto ou manutenção. Como em escalas de graduação, componentes elétricos e etc. Normalmente esse tipo de erro é consistente e por isso tende a ser eliminado pelas calibrações. Quando a entrada varia com o tempo, entretanto fazer a correção se torna complicado.

Beckwith (1993) afirmou que o erro de carregamento é de particular importância. Refere-se à influência do procedimento de medição no sistema sendo testado. O processo de medição inevitavelmente altera as características de ambos: a fonte da quantidade medida e o sistema de medição em si mesmo.

Ainda segundo Beckwith (1993) erros aleatórios também são de várias formas típicas, os experimentos podem ser inconsistentes na estimativa entre sucessivas

medições, podendo surgir de distúrbios fora do sistema de medição como temperatura ou vibrações mecânicas ou o sistema de medição podem incluir processos pobremente controlados que conduzem a variações aleatórias no sistema de saída.

2.2.1.2. Incerteza de medição

Beckwith (1993) afirmou que quando se estima a incerteza de medição, usualmente definem-se dois tipos de erros: sistemático e aleatório e dois tipos de experimento: amostra simples ou amostra repetitiva.

Uma amostra refere-se a uma medição única de certa quantidade, quando repetimos diversas vezes a medição da mesma amostra podemos estimar estatisticamente o erro de aleatório na medição.

Após obter os erros aleatórios e sistemáticos devemos combiná-los de forma a obter a incerteza total da medição. Essa combinação é definida muito fortemente de forma empírica e deve ser na forma da raiz quadrada dos quadrados dos erros encontrados, o que propicia um alto grau de confiabilidade pela combinação dos intervalos de confiança obtidos a partir dos erros.

2.2.1.3. Propagação de erros

Outro fator considerado na avaliação dos erros trata-se da questão da obtenção de grandezas resultantes de combinação de medições, como no caso de áreas, que considera os erros nas duas dimensões observadas. Fialho (2002) apontou uma maneira de obter-se o resultado dessa propagação pela aplicação do método de Kleine e McClintock. Segundo esse método o resultado do cálculo de um erro é uma função das variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Chamando-se Δz o erro do resultado e $\Delta x_1, \Delta x_2$ e Δx_n os erros das variáveis independentes tem-se o resultado apresentado na Equação (1)

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n\right)^2} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n\right)^2} \quad (1)$$

2.2.1.4. Estimativa da incerteza de medição

Dois conceitos fundamentais formam a base para a análise dos erros de medição. O primeiro é a distribuição de erros que caracteriza a probabilidade de que um erro de um determinado tamanho ocorra. E o segundo a amostragem de uma população.

Normalmente tem-se apenas um conjunto limitado de observações, ou amostra, do qual se infere as características de uma população maior e da qual se pressupõe uma determinada distribuição.

Usando-se esta suposta distribuição, estima-se a probabilidade de diferença entre a média de valores de uma amostra pequena e o verdadeiro valor de uma população maior. Essa probabilidade de diferença ou intervalo de confiança, fornece uma estimativa da incerteza de medição associada com a amostra medida.

Erros experimentais também podem ser vistos em termos da população. Se forem feitas medições de uma mesma amostra repetidamente, cada medição apresentará uma pequena diferença devido ao erro aleatório. Portanto a população dos erros aleatórios é teoricamente infinita.

Ao analisarem-se dados experimentais, a distribuição gaussiana ou normal deve ser a primeira a ser considerada, pois descreve a população de possíveis erros em uma medição quando varias fontes de erros contribuem simultaneamente para o total do erro aleatório na medição. Essas fontes devem ser não relacionadas, randômicas e grosseiramente de mesmo tamanho.

2.2.2. Aspectos estatísticos ligados a análise de erros

Para uma população infinita de dados, cada um representando uma única quantidade em que cada dado difere em magnitude de outro apenas como resultado de um erro aleatório. Em uma distribuição gaussiana a função densidade de probabilidade é dada pela Equação (2).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

Em que x é o valor de uma determinada medição, μ é o valor médio da população inteira e σ o desvio padrão da população inteira;

No caso da distribuição gaussiana, para a maioria dos estudos que considera razoável uma margem de confiança de 99,9% estabelece-se o critério $\mu \pm 3\sigma$ (Figura 2.20).

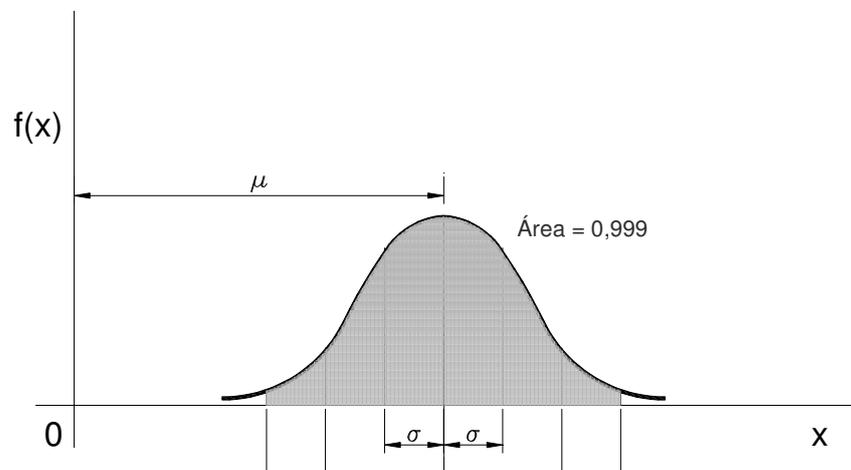


Figura 2.20 - Probabilidade de um determinado valor x , estar dentro do intervalo μ mais ou menos três σ , em um fenômeno que segue uma distribuição Gaussiana.

Um critério comumente utilizado para desconsiderar valores de medição obtidos é quando excederem a esses valores limites, pois existe chance muito remota de estarem corretos.

Carpinetti (1996) nos apresenta a modelagem estatística para o cálculo de análise de hipóteses experimentais como se segue.

2.2.2.1. Estimativa por ponto da média populacional

Dada uma amostra x_1, x_2, \dots, x_n , com \bar{x} como media amostral, sabe-se do teorema do limite central que para um número grande de amostras ($n > 30$) a distribuição de erros tende a normalidade conforme a Equação (3).

$$\bar{x} \cong N\left(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (3)$$

E que a distribuição reduzida se apresenta conforme a Equação (4).

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \cong N(0,1) \quad (4)$$

2.2.2.2. Intervalo de confiança com desvio padrão desconhecido

Como na prática o valor de σ não é conhecido, para amostras grandes, o desvio padrão amostral é usado no cálculo de μ conforme a Equação (5).

$$\bar{x} - Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + Z_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Em que o parâmetro μ possui probabilidade $(1-\alpha)$ ou confiança $(1-\alpha) * 100 \%$.

Para amostras pequenas usa-se análise similar com a distribuição t de “student” com $v = (n-1)$ graus de liberdade no lugar da distribuição normal reduzida que é apresentada na Equação (6).

$$\bar{x} - t_{\alpha/2,n} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2,n} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

2.2.2.3. Teste de hipótese

Uma hipótese estatística é uma afirmação sobre parâmetros de uma população, a partir da amostra da população. Duas hipóteses são construídas conforme se segue:

H0: Hipótese de nulidade e H1: Hipótese alternativa.

O teste de hipótese testa a validade de uma hipótese nula contra uma hipótese alternativa definindo dois tipos de erro:

Erro do tipo 1: rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira; e erro do tipo 2 aceitar a hipótese nula sendo ela falsa.

2.2.2.4. Diferença entre tratamentos para amostras grandes

A estatística para testes de diferenças entre dois tratamentos é dada pela Equação (7).

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \delta}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (7)$$

Sendo σ_1 e σ_2 substituídos por S_1 e S_2 para amostras grandes.

Para um teste de hipótese, em que a hipótese nula é que não existe diferença entre os tratamentos e a hipótese alternativa é que os tratamentos são diferentes tem se:

$$H_0 = \mu_1 - \mu_2 = \delta = 0$$

$$H_1 = \mu_1 - \mu_2 = \delta \neq 0$$

A rejeição da hipótese nula acontecerá se o valor da estatística z cair fora da faixa em cinza apresentada na Figura 2.21, ou seja $Z < -Z_{\alpha/2}$ ou $Z > Z_{\alpha/2}$.

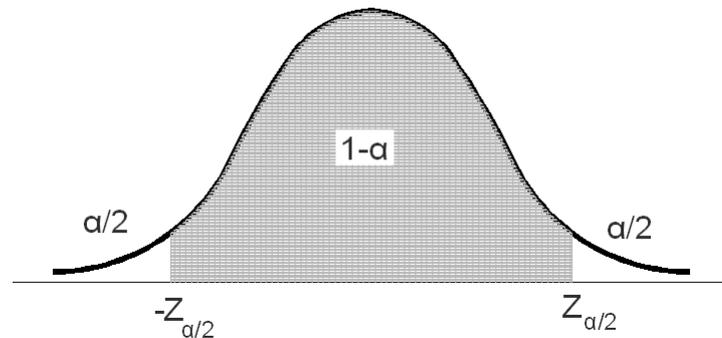


Figura 2.21 - Região de rejeição da hipótese nula.

2.2.2.5. Dados pareados

Um planejamento útil na eliminação de fatores não controlados de variabilidade de resposta é dado pela análise de dados em pares ou blocos. Procura-se obter amostras aleatórias mais similares possíveis e analisa-se a diferença (d) entre os valores desses pares, obtendo-se como resultado uma distribuição normal. Isto permite verificar a existência de diferença entre tratamentos, pela estatística dada pela Equação (8).

$$Z = \frac{\bar{d} - \delta_0}{S_d \sqrt{n}} \quad (8)$$

O teste de hipóteses é desenvolvido conforme o caso anterior considerando-se δ igual a zero.

2.3. Medições a partir de imagens digitais

Nessa parte da revisão são levantados aspectos relevantes para a obtenção de medições a partir do uso de imagens digitais.

2.3.1. Imagem óptica

Segundo Wu, Merchant e Castleman (2008) pode-se considerar que uma imagem óptica corresponda e pode ser representada por uma função contínua de duas variáveis espaciais. Ou seja, as coordenadas de posição (x,y) são números reais e a intensidade de luz é um número real não negativo. Essa representação matemática pode ser chamada de imagem contínua.

2.3.2. Imagem digital

Jahne (2002) nos mostra que computadores não conseguem manipular imagens contínuas, mas apenas matrizes de números digitais. Portanto têm-se grades que corresponderão o melhor possível a imagem óptica de onde se originaram.

Um ponto de uma grade bidimensional é chamada de pixel, que representa uma irradiação em uma posição correspondente da grade. No caso mais simples os pixels estão localizados em uma grade retangular conforme apresentado na Figura 2.22

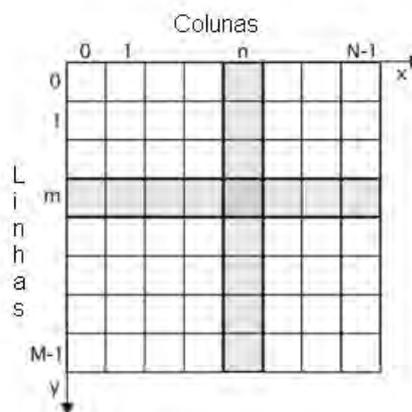


Figura 2.22 - Representação de imagens digitais por matriz de pontos discretos em uma grade retangular
Fonte: Jahne(2002).

Utiliza-se uma notação de matrizes para representar essa grade, onde o primeiro índice m , denota a posição da linha e o segundo n a posição da coluna. Cada pixel

representa não apenas um ponto mas uma região retangular da imagem, a célula elementar da grade. O valor associado ao pixel deve representar a média da irradiação correspondente à célula de maneira apropriada.

2.3.3. Calibração espacial

Wu, Merchant e Castleman (2008) informam que o tamanho do pixel pode ser calculado ou medido. O cálculo depende do espaçamento do pixel na imagem do sensor e da magnificação do sistema óptico e geralmente pode ser calculado pela fórmula da Equação (9).

$$\delta x = \frac{\Delta x}{M_o M_a} \quad (9)$$

Onde δ_x e Δ_x são os valores de espaçamentos do pixel no objeto e na imagem do sensor respectivamente e M_o a magnificação do sistema óptico e M_a a magnificação da câmera adaptada.

Muito freqüentemente esses números não estão disponíveis. O espaçamento do pixel deve ser então medido por uma escala calibrada. Isso implica na necessidade de um programa de computador que possa ler as coordenadas x e y do pixel. Uma vez digitalizada a escala são localizados dois pixels que possuem distância conhecida. Então o calculo do tamanho do pixel fica conforme se apresenta na Equação (10).

$$\delta = \frac{D}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (10)$$

Onde δ é o espaçamento do pixel, D é a distancia de calibração e (x1, y1) e (x2, y2) são as localizações dos dois pixels na imagem gravada.

Para acuracidade na estimativa de δ os dois pontos devem estar o mais distante possível.

2.3.4. Transformação espacial

As operações de transformação espacial utilizadas nos desenvolvimento desse estudo, devem apenas permitir a movimentação dos pontos da imagem com relação a sua origem para que possam ser sobrepostas, sem ocasionar mudança nas distâncias relativas entre os pontos de cada imagem, o que causaria alterações nas medidas a serem obtidas. Segundo Wu, Merchant e Castleman (2008) a definição geral para uma operação geométrica desse tipo é dada pela Equação (11).

$$g(x, y) = f(a(x, y), b(x, y)) \quad (11)$$

Onde $f(x,y)$ é a imagem de entrada e $g(x,y)$ a imagem de saída. As funções de transformação espacial $a(x,y)$ e $b(x,y)$ especificam a relação física entre os pontos da imagem de entrada e os correspondentes pontos da imagem de saída.

Dentre as operações básicas estão a translação, rotação e ampliação ou redução

- Translação

Aplicando-se a Equação (12) a imagem de entrada, todos os pontos serão movidos pela mesma distância de $\sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ em relação a origem.

$$g(x, y) = f(x + x_0, y + y_0) \quad (12)$$

- Ampliação ou Redução

A Equação (13) apresenta uma operação que irá ampliar ou reduzir a imagem pelo fator M_x na direção x e M_y na direção y.

$$g(x, y) = f[x/M_x, y/M_y] \quad (13)$$

- Rotação

Rotações rígidas com centro sobre a origem e através de um ângulo é feita segundo a Equação (14).

$$g(x, y) = f[x \cdot \cos(\theta) - y \cdot \text{sen}(\theta), x \cdot \text{sen}(\theta) + y \cdot \cos(\theta)] \quad (14)$$

Para efetuar rotações com centro em outro ponto é necessário inicialmente transladar esse ponto para a origem, rotacionar e depois transladar de volta para o ponto original.

2.3.5. Aberrações ópticas

Segundo Gasvik (2002) as equações de propagação de raios na teoria da óptica Gaussiana são corretas na primeira ordem de inclinação dos ângulos dos raios incidentes de refração ou reflexão de superfícies.

Quando aproximações de altas ordens são usadas para as funções trigonométricas, saídas da predição gaussiana serão encontradas. Nem sempre será verdade que todos os raios deixando um ponto do objeto irão exatamente se encontrar para formar um ponto da imagem ou que a magnificação em um dado plano será constante (Figura 2.23). Tais desvios do comportamento Gaussiano ideal são conhecidos como aberrações de lentes. Em adição, as propriedades das lentes podem ser dependentes do comprimento de onda, dando origem às aberrações cromáticas.

Embora programas computacionais permitam projetar lentes com o mínimo de aberrações, em sistemas reais de altas ordens estas ainda estarão presentes e não existem parâmetros de projetos suficientes para eliminar todas elas. Aberrações monocromáticas de terceira ordem podem ser divididas em dois grupos. O primeiro chamado de aberrações esféricas que tornam a imagem deteriorada e não clara. E o segundo tipo que cobre a curvatura de campo e distorção, deformando a imagem.

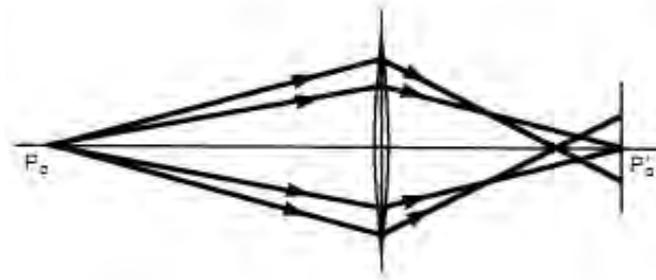


Figura 2.23 Esquema indicando o surgimento de aberrações ópticas Gasvik (2002).

3. ASPECTOS TECNOLÓGICOS

A seguir são apresentadas questões referentes às tecnologias empregadas no desenvolvimento da pesquisa.

3.1. Couple Charged Device (CCD)

Os dispositivos CCD são amplamente utilizados em equipamentos para digitalização de imagens, sejam câmeras fotográficas, filmadoras ou digitalizadores de mesa. Inventados como dispositivos de memória digital por George Smith e Willard Boyle em 1969, possibilitaram na década de 90 o barateamento e a utilização de dispositivos digitalizadores em larga escala.

Efford (2000) apresentou os CCDs como dispositivos matriciais compostos por unidades capacitadas sensíveis a luz. Quando os fótons atingem a superfície de silício de uma dessas células promovem o desprendimento de elétrons, gerando uma voltagem proporcional a intensidade de irradiação. Por meio de um sinal de “clock” as cargas em cada uma das células são transferidas para a célula adjacente (Figura 3.1).

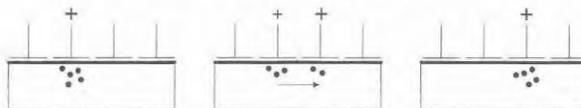


Figura 3.1 - Transferência de cargas entre duas células adjacentes do CCD. Fonte: Efford (2000).

Pelos consecutivos pulsos, as cargas são direcionadas até o registrador de saída que, por sua vez, aplicam a tensão lida a um circuito amplificador conectado a um conversor analógico digital, que completa a obtenção do sinal básico da imagem (Figura 3.2).

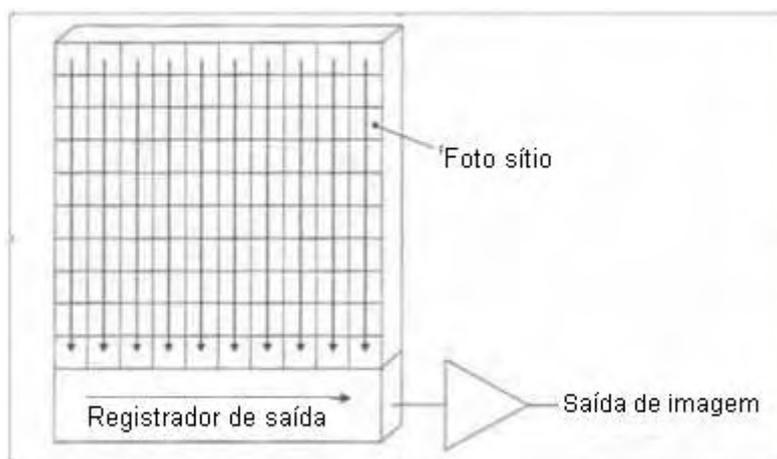


Figura 3.2 - Fluxo das cargas pela superfície do CCD. Fonte: Efford (2000).

3.2. Limiarização

Segundo Russ (2007) a seleção de características de uma imagem é um importante pré-requisito para a maioria de análises de medição. Tradicionalmente, uma simples maneira de se fazer essa seleção é pela definição de uma faixa de valores de brilho na imagem original, selecionando-se os pixels dentro dessa faixa como pertencendo a imagem de fundo e excluindo todos os demais. Dessa maneira a imagem resultante é exibida como uma imagem binária em branco e preto para apresentar as regiões correspondentes. Não existe um padrão para quais características serem brancas ou pretas a escolha depende do particular equipamento sendo utilizado e da preferência do analista.

Esse processo de seleção é usualmente chamado de limiarização (thresholding). A limiarização pode ser executada interativamente usando-se uma máscara colorida para mostrar o resultado da mudança de faixas. Em alguns “softwares”, o usuário

ajusta controles virtuais de deslizamento ou marca uma região no histograma para selecionar a faixa de valores de brilho. O histograma de brilho é um gráfico indicando o número de pixels na imagem que contem cada determinado nível de brilho (Figura 3.3.).

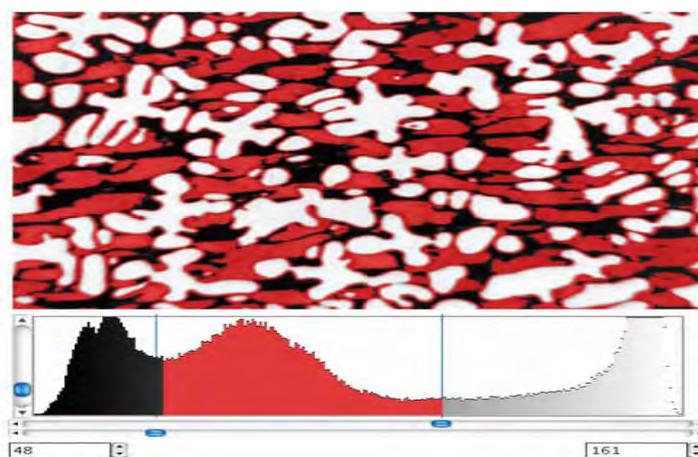


Figura 3.3 - Exemplo de aplicação do processo de limiarização. Fonte: Russ (2007).

Ajustes manuais de limiarização produzem um resultado considerado correto pela inspeção do olho humano, mas em muitos casos o ajuste manual deve ser evitado se possível. Além de ser incompatível com o processamento automático, diferentes resultados são obtidos por diferentes operadores. Limiarização manual são possivelmente responsáveis pela maioria de erros de análise, mais que qualquer outra causa.

3.3. Digitalizador de mesa

Na Figura 3.4 são apresentadas esquematicamente as partes componentes de um digitalizador de documentos que por simples definição são sistemas conversores analógico digital que por um sensor óptico acoplado a um sistema óptico-mecânico, capturam os fótons refletidos por um objeto e transformam as variações de cor e intensidade em uma imagem digital que é entregue a um sistema de armazenamento.



Figura 3.4 - Diagrama esquemático dos componentes de um digitalizador de mesa.

Dentre as tecnologias disponíveis no mercado, embora se encontre uma grande variedade de fabricantes, dois tipos se destacam. Diferenciam-se principalmente pelo tipo de iluminação e sistema óptico empregado para a obtenção de imagens. A grande maioria de sistemas são CCDs (Couple Charged Device) convencionais que utilizam lâmpadas fluorescentes. E um segundo grupo numeroso são os com iluminação tipo LED (diodos emissores de luz) que utilizam a tecnologia CIS (Contact Image Sensor), apresentados na Figura 3.5.

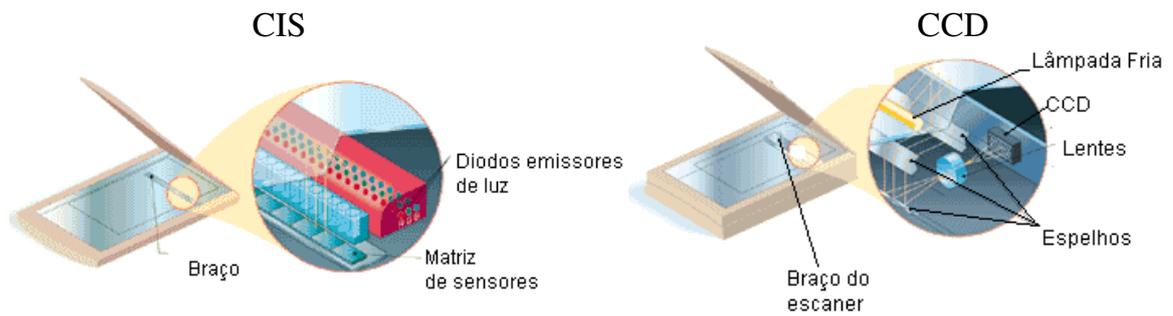


Figura 3.5 - Principais sistemas utilizados em digitalizadores de mesa. Adaptado de Canon Inc.

Nos sistemas convencionais o braço do digitalizador é composto por um sistema óptico de focagem, o sensor e uma fonte de iluminação (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Braço do digitalizador.

Esse conjunto é acionado por um motor de passo acoplado a uma redução que permite por meio de uma correia dentada de acionamento, o deslocamento do conjunto em valores compatíveis com a resolução horizontal (Figura 3.7).

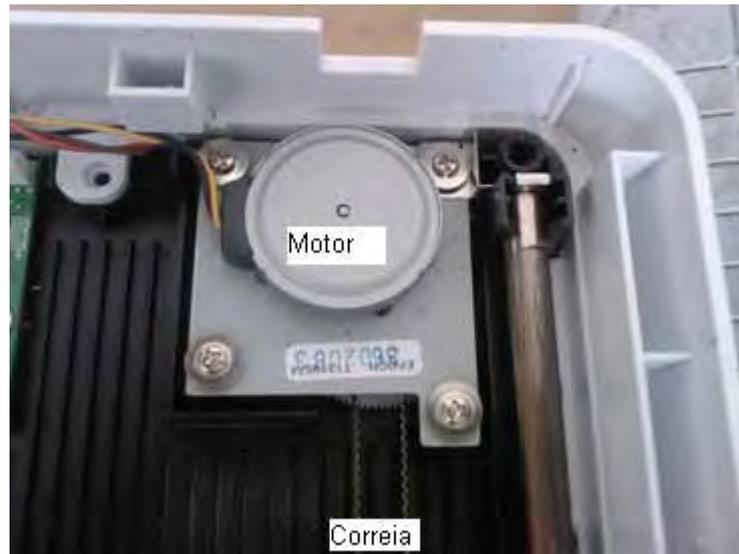


Figura 3.7 - Motor de passo e correia de acionamento do braço do digitalizador.

O braço é movimentado sob a superfície do vidro do digitalizador executando a varredura linha por linha da imagem sobre o vidro que se encontra exatamente no foco do sistema óptico do sensor.

O último componente essencial é composto pela interface USB, conforme mostra a Figura 3.8.



Figura 3.8 - Placa de circuito com a interface USB do digitalizador.

Os digitalizadores que utilizam a tecnologia LIDE comparativamente aos demais, são mais leves, tem redução de consumo de 90% da energia normalmente empregada e

sua alimentação é fornecida pela porta USB do microcomputador, eliminando a necessidade de alimentação externa.

Para a obtenção de iluminação utiliza um diodo emissor de luz composto por três cores (vermelho, verde e azul) que embora seja energeticamente mais eficiente, possui intensidade e brilho inferior a lâmpadas de xenônio ou fluorescente, causando perda de qualidade na reprodução da imagem.

Os digitalizadores LIDE (“LED indirect Exposure”) ou de exposição indireta a luz led, possuem um sensor maior que o convencional (em torno de 4,5 cm), mais propriamente uma matriz de sensores, tendo a mesma largura do vidro do digitalizador. Adotando a tecnologia CIS (Contact Image Sensor) apresentada na Figura 3.9, elimina a necessidade de espelhos e lentes para ajustar a imagem ao tamanho do sensor o que possibilita a redução das dimensões do digitalizador e a eliminação de aberrações de curvatura de campo. Essas aberrações são causadas pela perda de foco nas bordas das lentes devido ao seu ângulo largo. Estas lentes precisam ser utilizadas para compensar o pequeno espaço disponível entre o sensor e o objeto sendo digitalizado.

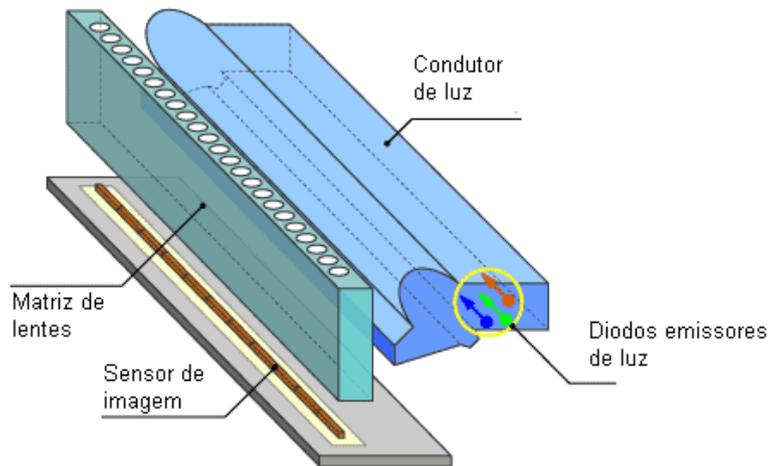


Figura 3.9 - Esquema do sistema “Contact Image Sensor”, adaptado de Canon Inc.

3.4. “software” ImageJ

O “software” para a análise e mensuração de imagens digitais utilizado foi o “ImageJ”, desenvolvido pelo National Institute of Health do governo dos Estados Unidos da América é disponibilizado gratuitamente em <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, não podendo ser utilizado para fins comerciais, sendo de domínio público é referenciado por especialistas na área como de excelente qualidade, não perdendo em capacidade para “softwares” proprietários nas características fundamentais para este estudo. Outra vantagem é que o programa é constantemente aperfeiçoado através de pesquisadores do mundo todo, com a inclusão de subprogramas chamados “plugins” desenvolvidos em Java e de código também aberto. Estes auxiliam na execução de tarefas específicas, permitindo automatizar o trabalho, obterem características únicas e personalizar o “software” para o trabalho considerado.

O “ImageJ” tem uso intensivo em centros de pesquisa para análises na área de microscopia quantitativa e que analogamente faz uso de imagens digitais. A Figura 3.10 mostra uma tela de apresentação com as informações básicas do referido programa e a corrente versão utilizada para esta pesquisa.

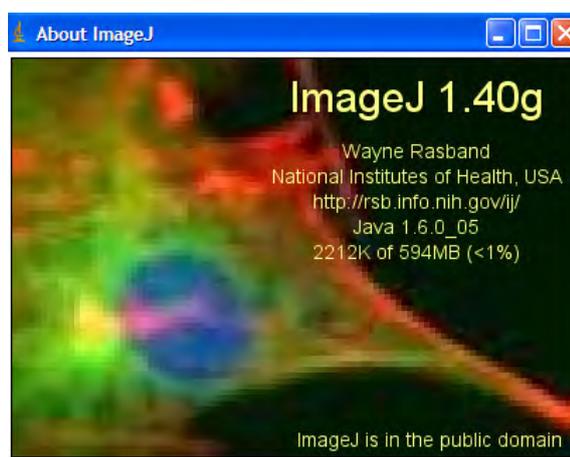


Figura 3.10 - Tela do programa “ImageJ”.

3.5. Plugin Turboreg

Thévenaz (2009) desenvolvedor do complemento turboreg descreveu esse software como se segue: O propósito do plugin turboreg é alinhar, ou em outras palavras coincidir duas imagens, uma chamada de fonte e a outra alvo. Três modos de alinhamento estão disponíveis: manual, automático e lote. Em todos três casos, é dado ao usuário oportunidade para interagir especificamente com algumas referências, que estabelecem a correspondência inicial entre as duas imagens. No modo automático e de lote, as referências da imagem fonte são automaticamente refinadas para melhor coincidir com aquelas da imagem alvo. No modo manual esse procedimento de refinamento é desativado. A maior parte do tempo, não requer entradas do usuário porque o programa é robusto e as condições iniciais são suficientemente acuradas.

Após completar o processo de registro, o complemento usa a posição final das marcações da fonte e alvo para criar uma imagem transformada que tem o tamanho do alvo e que contém a versão transformada da imagem fonte. A transformação é tal que as referências da fonte são correspondidas para aquelas do alvo. Nos modos automático de lote, as referências da fonte são refinadas para minimizar a diferença da média quadrática entre o alvo e a imagem transformada.

O plugin também pode ser chamado por uma macro ou por outro plugin. Neste último caso, o registro pode ser executado silenciosamente se desejado, e os resultados do processo podem ser resgatados para futuro processamento.

Os cinco tipos de transformações disponibilizado são:

- Translação (Translation): Uma linha reta é correspondida para outra linha reta de idêntica orientação, com a conservação da distância entre quaisquer par de pontos. Uma única referência em cada imagem fornece uma completa descrição de uma translação. A regra de correspondência é da forma $\mathbf{x} = \mathbf{u} + \Delta\mathbf{u}$;
- Corpo rígido (Rigid Body): A distância entre quaisquer par de pontos é conservada. uma única referência é necessária para descrever o componentes translacional da transformação de corpo rígido, enquanto o

componente rotacional é dado por um ângulo θ . A regra de correspondência é da forma $\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}$;

- Rotação com alteração de escala (Scaled rotation): Uma linha é correspondida para outra linha. Mais do que isso, o ângulo entre qualquer par de linhas é conservado. Um par de referências em cada imagem é necessário para dar uma completa descrição da transformação. A regra de correspondência $\mathbf{x} = \lambda \begin{Bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}$;
- Transformação linear seguida de translação (Affine): Uma linha reta é correspondida para outra linha reta, com a conservação dos ângulos próximos entre linhas (linhas paralelas ou coincidentes permanecem paralelas ou coincidentes). Em duas dimensões, três referências em cada imagens são necessárias para dar uma completa descrição de uma transformação. A regra de correspondência é da forma $\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u}$;
- Bilinear: uma linha é correspondida para uma seção cônica. Em duas dimensões, quatro referências em cada imagem são necessárias para dar a uma completa descrição da transformação. A regra de correspondência é da forma $\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{Bmatrix} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{b} u_1 u_2 + \Delta \mathbf{u}$.

A posição das referências podem ser armazenadas e depois resgatadas. Entretanto o tamanho da fonte e da imagem alvo são checados. Discrepâncias não são permitidas.

A computação pode favorecer velocidade ou acuracidade. Se a velocidade for favorecida, uma das várias conseqüências é que a imagem modificada será computada da fonte pela interpolação do vizinho mais próximo. Se a acuracidade é favorecida, então uma de várias conseqüências é que a interpolação (cubic-spline) é executada no lugar.

4. MATERIAL E MÉTODOS

As experimentações desenvolvidas como estudo de caso foram realizadas no Laboratório de Processamento da Madeira do Campus Experimental de Itapeva – UNESP e no Laboratório de Metrologia de Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Ressalta-se que o estudo de caso foi utilizado para testar a metodologia empregada, entretanto o método pode ser aplicado em vários outros processos de fresamento de madeira, com diferentes tipos de geometria de ferramentas, espécies de madeira ou condições de usinagem, desde que seja possível o alinhamento da aresta de corte com o vidro do digitalizador.

4.1. Experimentações de análise de desgaste.

Para o experimento de usinagem foi utilizada uma ferramenta em aço rápido (HSS) fabricada pela empresa LEITZ Ferramentas classe 620 - AISI T4, com teores médios em sua composição de 18% de tungstênio, 4% de cromo, 1% de vanádio e 5% de cobalto. Suas dimensões são de 39,4 mm de largura por 4,2 mm de espessura, típica para o processamento de madeira (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Ferramenta tipo “faca” utilizada na experimentação.

A ferramenta e o porta-ferramentas foram preparados com a geometria ilustrada na Figura 4.2

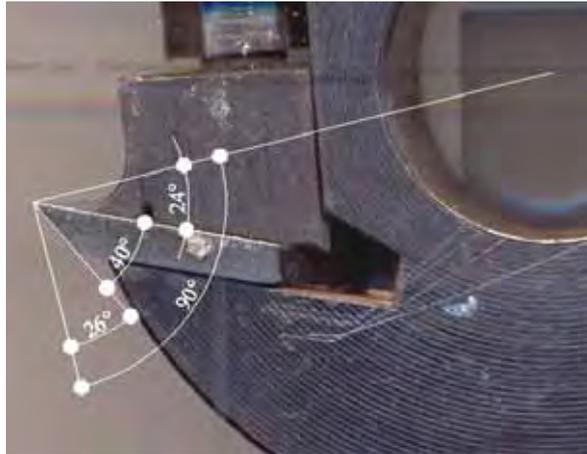


Figura 4.2 – Ilustração dos ângulos da ferramenta posicionada no cabeçote porta-ferramentas.

- Ângulo de posicionamento e fixação das facas no porta-ferramentas com inclinação de 24° em relação ao eixo da máquina;
- Ângulo de cunha = 40° ;
- Ângulo de saída = 24° ;
- Ângulo de folga = 26° ;

A ferramenta foi instalada em um cabeçote porta-ferramentas com diâmetro externo de 90 mm e furo de 30 mm. O cabeçote possibilita a instalação de duas facas (Figura 4.3), mas para essa experimentação utilizou-se apenas uma faca para contato com a madeira, a fim de acelerar o processo de desgaste. A segunda foi recolhida para atuar apenas como contrapeso e evitar o desbalanceamento do conjunto.

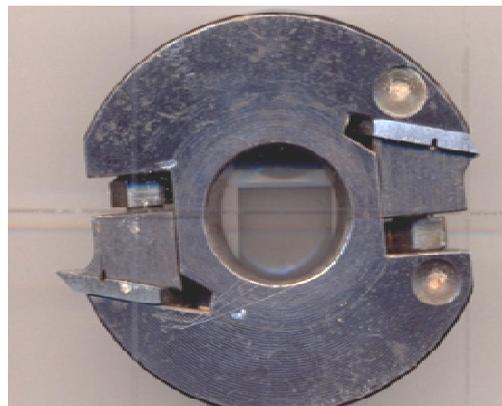


Figura 4.3 - Cabeçote porta-ferramentas utilizado nos experimentos.

Uma modificação feita na ferramenta foi à usinagem de um canal de um milímetro de espessura na face inferior para permitir uma melhor fixação e evitar o desalinhamento da faca com relação ao eixo da máquina (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Adaptação para garantir o posicionamento da ferramenta no porta-ferramentas

Anteriormente a execução dos ensaios de usinagem, a ferramenta de corte foi afiada em uma afiadora conforme mostrado na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Afição da ferramenta de corte para recuperar a integridade da aresta principal de corte.

Para a calibração do paralelismo das superfícies do rebolo com a aresta de corte, a fim de garantir o valor do ângulo de cunha " β " em 40° , empregou-se um relógio comparador (Figura 4.6).



Figura 4.6 - Verificação do ângulo de cunha e paralelismo no processo de afiação.

Para a realização dos ensaios de usinagem, o conjunto faca e porta-ferramentas foi montado em uma fresadora de eixo vertical do tipo “tupia” (Figura 4.7) com as seguintes características técnicas: Potência instalada de 3 CV; Dimensões da mesa 830 x 980 mm e rotação nominal 4634 rpm.



Figura 4.7 - Tupia empregada no experimento de usinagem.

Para garantir uma velocidade de avanço constante, utilizou-se um alimentador de avanço (Figura 4.8) da marca Invicta, cuja velocidade foi aferida fornecendo uma leitura de 13,5 m/min, também típico para esse tipo de operação.



Figura 4.8 - Alimentador de avanço empregado nos ensaios de usinagem para deixar constante a velocidade de avanço da experimentação.

O encosto da mesa da tupa foi revestido com uma chapa de MDF e ajustado para garantir a profundidade adotada (Figura 4.9). Utilizou-se parafina na mesa da máquina para garantir o deslizamento constante da peça em usinagem.

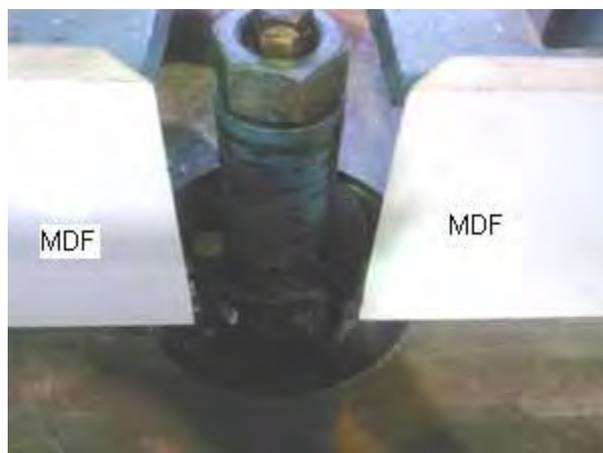


Figura 4.9 - Encosto da tupa empregado no experimento.

Nessas condições a velocidade de corte na experimentação foi calculada em 22 m/s.

A cada 40 metros lineares de madeira usinada, o porta-ferramentas era removido, deixando-se inalteradas as demais condições de usinagem. A ferramenta era digitalizada sem ser retirada do porta-ferramentas (Figura 4.10). Isso foi possível alinhando-se o plano de folga com o vidro do digitalizador de mesa.



Figura 4.10 – Ferramenta de corte posicionada no digitalizador de mesa para registro da imagem do desgaste.

Para garantir um maior contraste nas imagens obtidas, utilizou-se uma lâmpada fria de 30 watts posicionada logo acima do conjunto, observando que esta não criasse reflexos indesejáveis.

Tomou-se o cuidado de fazer a limpeza da lâmina com um solvente orgânico antes da tomada de cada imagem e a remoção de qualquer material particulado no vidro do digitalizador.

O Digitalizador de mesa (Figura 4.11) utilizado foi o modelo scanjet 3800 da marca HP com as especificações técnicas apresentadas na Tabela 4.1.



Figura 4.11 - Digitalizador de mesa scanjet 3800 marca HP utilizado nos experimentos de medição do desgaste da ferramenta de corte.

Tabela 4.1 - Especificações técnicas do digitalizador scanjet HP3800.

Nome	Descrição
Tipo do scanner	Mesa com adaptador de materiais transparentes (TMA)
Tamanho	450 mm x 287 mm 59 mm
Peso	3,1 kg
Elemento Digitalizador	Dispositivo de carga acoplada (CCD)
Interface	USB 2.0 de alta velocidade
Resolução de Hardware	2400 x 4800 dpi

Os corpos de prova de madeira usinados (Figura 4.12) foram da espécie *Eucalyptus grandis*, com densidade média de 610 Kg/m^3 e com teor umidade próximo de 10%. Suas dimensões foram de 35x35x1200 mm, aproximadamente retilíneas e selecionadas para não apresentarem defeitos que viessem a acelerar ou retardar o processo de desgaste da ferramenta.

Figura 4.12 – corpo de prova de madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada no experimento de usinagem.

Os corpos de prova de madeira eram usinados até o ponto em que o alimentador não conseguisse tracioná-las. A Figura 4.13 ilustra o banco de ensaios de usinagem usando as amostras.



Figura 4.13 – Vista geral do banco de ensaios durante a usinagem das amostras de madeira.

Foram usinados 1760 metros lineares de corpos de prova, ponto onde se observou a produção de superfícies irregulares nas amostras, conhecidas no meio industrial como “batida de facas” e o aumento da vibração do equipamento.

4.2. Experimentos para calibração do digitalizador

Inicialmente realizou-se a calibração do digitalizador posicionando-se um bloco padrão classe 0 de 30 mm com desvio de $0,14 \mu\text{m}$ a 20°C horizontalmente com seu centro geométrico coincidindo com o centro geométrico do vidro do digitalizador.

Foram digitalizadas 34 imagens do bloco em seqüência e depois repetiu-se o mesmo processo posicionando o bloco verticalmente.

Para o experimento de calibração do digitalizador de mesa foram utilizados dois conjunto de blocos padrão em aço da classe 0, sendo o primeiro apresentado na Figura 4.14.

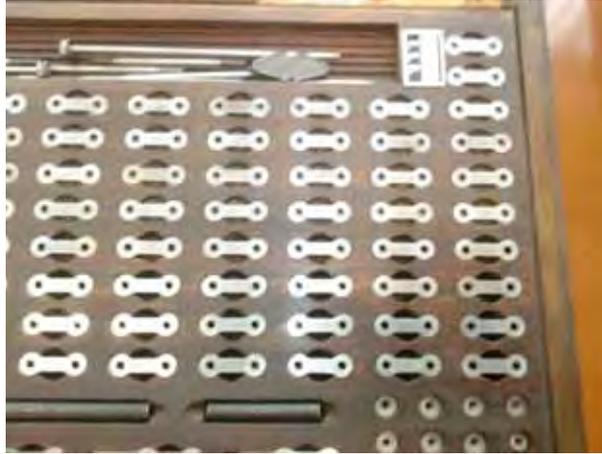


Figura 4.14 – Primeiro conjunto de blocos padrão metrológicos utilizados no experimento de calibração do digitalizador de mesa

No primeiro experimento foram distribuídos vários blocos em linhas horizontais ao longo do vidro do digitalizador, com dimensões aumentando em uma linha e diminuindo na linha seguinte, conforme mostrado nas Figuras 4.15 e 4.16



Figura 4.15 - Experimentação I: digitalização de uma seqüência de blocos.



Figura 4.16 - Experimentação I: Indicação da posição da seqüência de blocos.

No experimento II o vidro do digitalizador de mesa foi dividido em 15 áreas diferentes indicadas por uma letra e um número (Figura 4.17). Um bloco padrão de 22,50 mm, foi digitalizado no centro de cada uma dessas áreas.

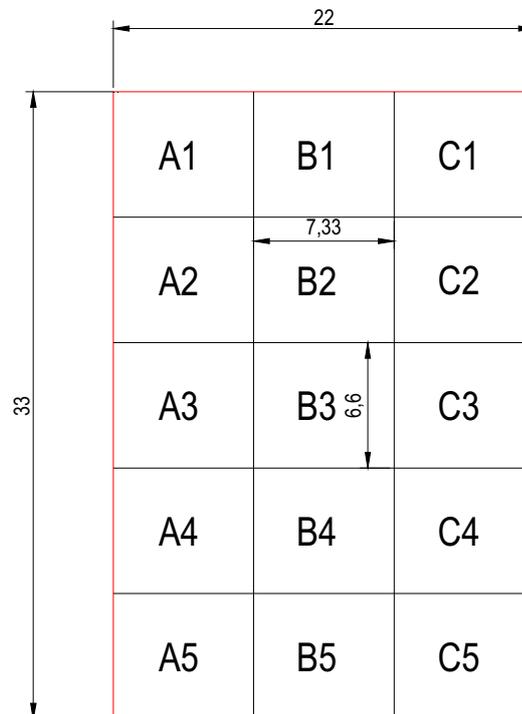


Figura 4.17 - Experimentação II: Diagrama indicando as áreas onde foram feitas a digitalização do bloco padrão de 22,50mm.

No experimento III (Figura 4.18), dois blocos padrões foram colocados na região central do vidro do digitalizador. Estes foram sucessivamente digitalizados contra um fundo branco sem nenhuma interferência no conjunto peça / digitalizador por 30 vezes. Procurou-se executar a operação no mais curto espaço de tempo possível para evitarem-se variações na temperatura ou interferência de vibrações.



Figura 4.18 - Experimentação III: Bloco sendo digitalizado na mesma posição com fundo branco em destaque.

Na experimentação IV, procurou-se fazer uma análise qualitativa das imagens comparadas ao projetor de perfil da marca Nikon, muito utilizado por pesquisadores na área de desgaste de ferramentas para madeira. A Figura 4.19 apresenta o projetor de perfil empregado, no qual se utilizou uma lente com ampliação de 10x.



Figura 4.19 - Projetor de perfil empregado na experimentação de análise qualitativa das imagens.

Especificações técnicas do projetor de perfil:

- Medição do desgaste das ferramentas de corte de forma direta (gume cortante da ferramenta);
- Marca do equipamento NIKON;
- Lentes de ampliação de 10x;
- Mesa de coordenadas XY com ajuste de posicionamento por micrômetro milesimal.

Após o tratamento da imagem de uma ferramenta digitalizada, foi feita a sua impressão em acetato com uma ampliação de 10x e resolução de 1200 dpi em uma impressora laser modelo 2600n marca HP. O acetato foi colocado sobre o visor do projetor de perfis (Figura 4.20) e foi possível observar a proximidade das duas imagens.



Figura 4.20 - Experimento IV: Análise qualitativa das imagens obtidas, comparadas com um projetor de perfis.

Em virtude de haverem surgido dúvidas, se o formato dos blocos padrão poderiam interferir sobre a interpretação das medições, optou-se por executar nova experimentação com blocos padrão de formato retangulares, mostrado na Figura 4.21.



Figura 4.21 – Novo conjunto de blocos padrão utilizados na experimentação.

A nova calibração foi executada para os eixos x e y com o bloco apresentado na Figura 4.22 e a calibração anterior foi descartada.

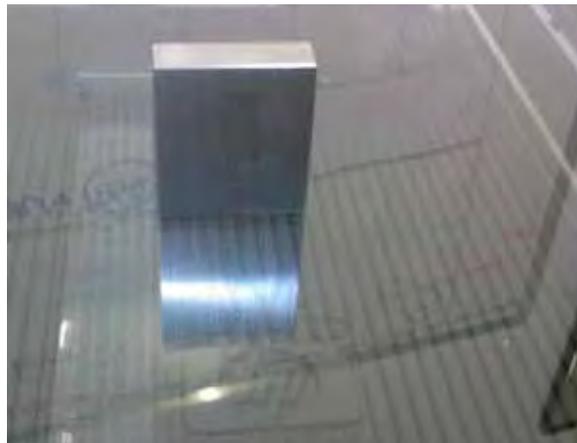


Figura 4.22 - Bloco padrão de 30 mm utilizado no processo de calibração do digitalizador.

Para uma melhor verificação do erro de posicionamento dividiu-se o vidro do digitalizador de mesa verticalmente em divisões de 11 centímetros, definindo a linha de eixo I e II. Horizontalmente definiu-se um eixo com a origem localizada no centro do digitalizador de mesa e de comprimento de 11 cm conforme ilustra o diagrama da Figura 4.23.

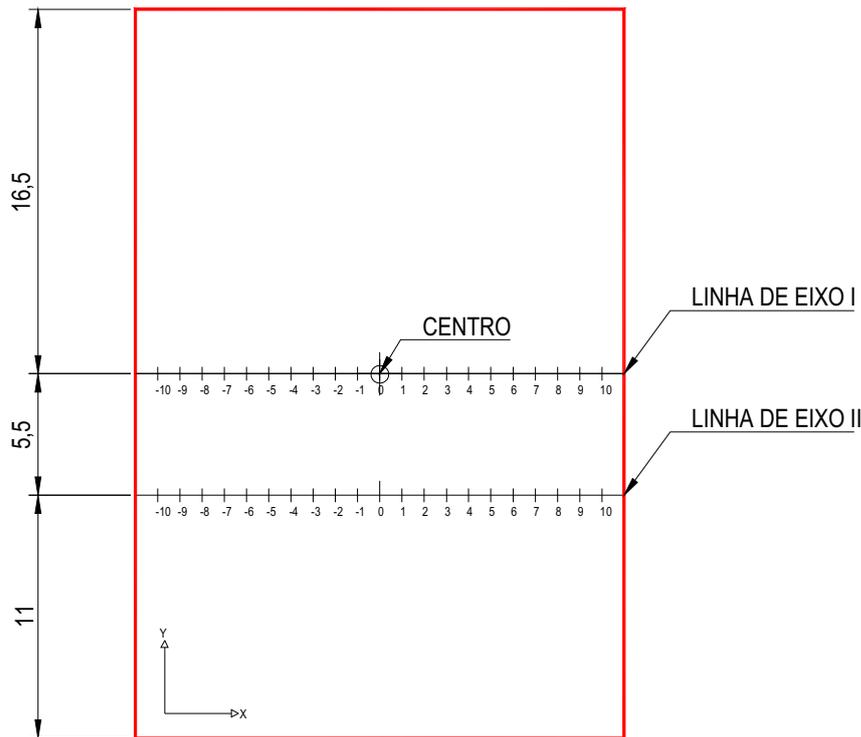


Figura 4.23 – Diagrama indicando os eixos traçados para a identificação dos pontos de medição.

4.3. Análises das imagens obtidas

Para medir-se o desgaste da ferramenta, entendido como a perda de área da superfície de folga, fez-se a mensuração da área perdida durante cada etapa do ensaio de usinagem, analisando-se imagens com 2400 pontos por polegada de resolução obtidas com o digitalizador de mesa.

A escolha do equipamento adequado para a produção das imagens teve como fator determinante a resolução em dpi (dots per inch) ou pontos por polegada que é o número de pontos diferenciáveis em 25,4 mm. A acuracidade mínima necessária para o objetivo do estudo é de um centésimo de milímetro. Portanto para obter-se uma acuracidade dessa ordem é necessário que o digitalizador reconheça pelo menos 2540 pontos em uma polegada, ou seja, 2540 dpi. Dentre os equipamentos disponíveis no mercado, escolheu-se um com resolução óptica de 2400 dpi que atinge em 95% a resolução necessária para o projeto e tem custo de mercado atual de R\$ 400,00.

Cabe uma observação que a resolução a ser considerada na escolha do equipamento foi à óptica, pois a resolução interpolada anunciada nos manuais técnicos dos equipamentos é obtida por artifícios matemáticos que podem gerar imprecisão na imagem e não correspondem fielmente ao real, principalmente se considerarmos a escala utilizada. Para subsidiar a escolha do equipamento foram necessárias diversas pesquisas e consultas sobre as tecnologias de digitalização disponíveis bem como os tipos de sensores ópticos e seus problemas com relação a aberrações e distorções, recaindo a escolha pelo equipamento de melhor qualidade baseado nesses parâmetros.

A Figura 4.24 mostra a imagem da ferramenta logo após o processo de afiação, já aberta pelo programa.



Figura 4.24 - Digitalização da imagem da ferramenta após afiação.

Inicialmente tomou-se cuidado especial com a limpeza tanto da mesa do digitalizador como da própria ferramenta procurando se eliminar elementos estranhos, com auxílio de uma flanela macia embebida em solvente orgânico.

Após este primeiro passo, digitalizou-se apenas a área do perfil de corte da ferramenta com resolução óptica máxima de 2400 pontos por polegada. As imagens foram obtidas em tons de cinza para diminuir a possibilidade de distorções e diminuir o “gasto” de memória em seu processamento.

Para evitarem-se distorções ou aberrações ópticas, resultado da utilização de lentes convexas pelo digitalizador posicionou-se a ferramenta na região central da mesa. Outro cuidado foi à criação de um gabarito para garantir o mesmo alinhamento em relação às laterais da mesa possibilitando assim uma fácil e garantida sobreposição das imagens a serem comparadas.

4.4. Sobreposição de imagens

O “software” do digitalizador não permitiu a criação de imagens de igual área e mesmo com o gabarito, pequenas rotações e translações acabaram ocorrendo quando tomou-se as imagens em seqüência, já que a resolução adotada é teoricamente suficiente para permitir uma acuracidade de 0,0106 mm. Portanto o primeiro passo foi a sobreposição dessas imagens de maneira que a posição da ferramenta com relação aos eixos x e y sejam idênticas em todas. Utilizou-se para isso o “plugin” align stacks e TurboReg.

Como foram necessárias varias etapas para a utilização desses complementos os fluxogramas de utilização são mostrados respectivamente na Figura 4.25 e 4.26, que contem três colunas, a primeira indica as atividades a serem executadas, a central as telas e imagens que serão abertas no programa e à esquerda as seleções ou opções que devem ser utilizadas naquela etapa ou as características da imagem sendo processada (nome do arquivo, cor e tamanho em pixels) o resultado é um conjunto de imagens uniformes e que podem ser efetivamente comparadas.

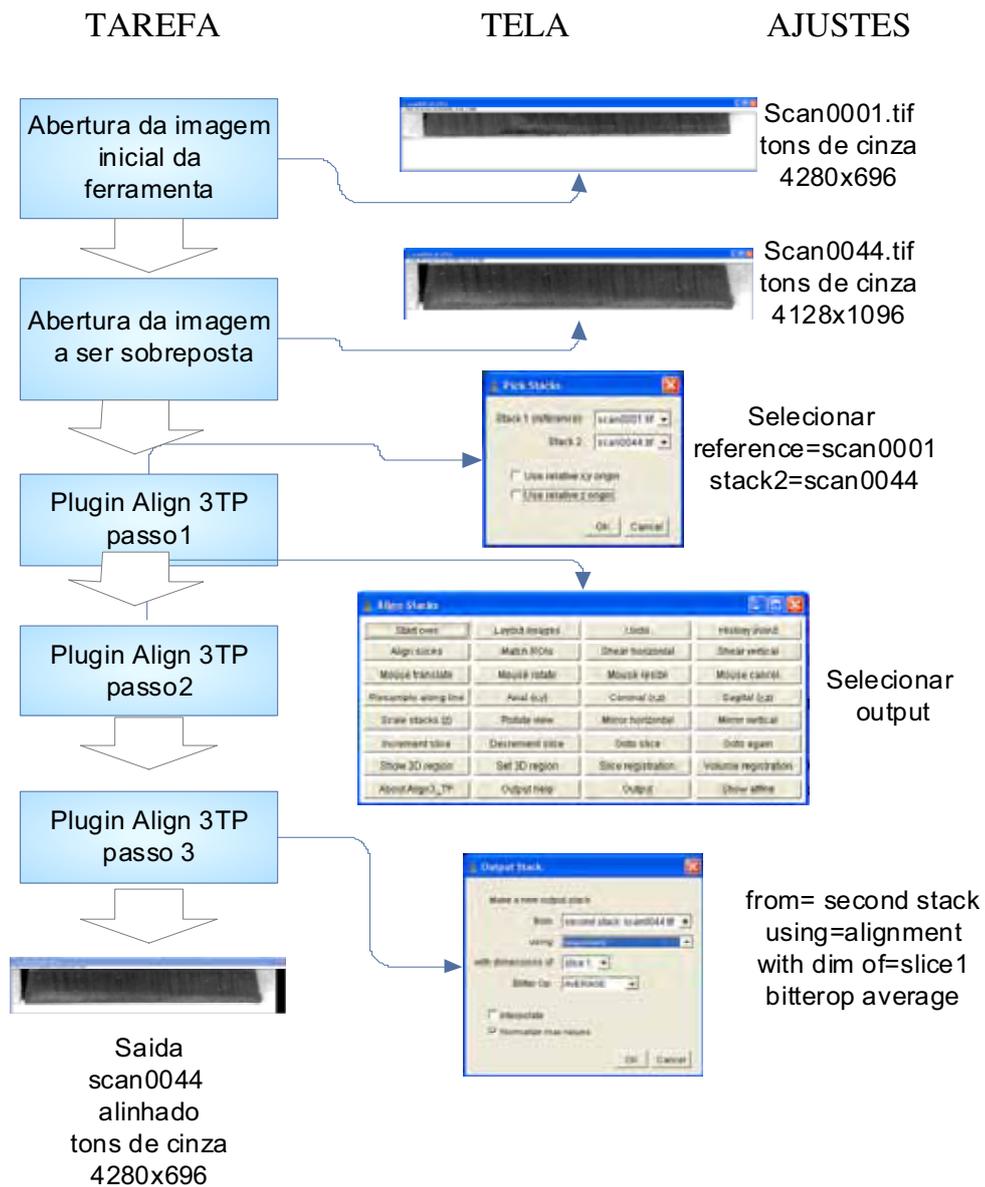


Figura 4.25 Diagrama indicando as etapas para a utilização do plugin (alignTP) com indicação das opções a serem selecionadas dentro do “software”.

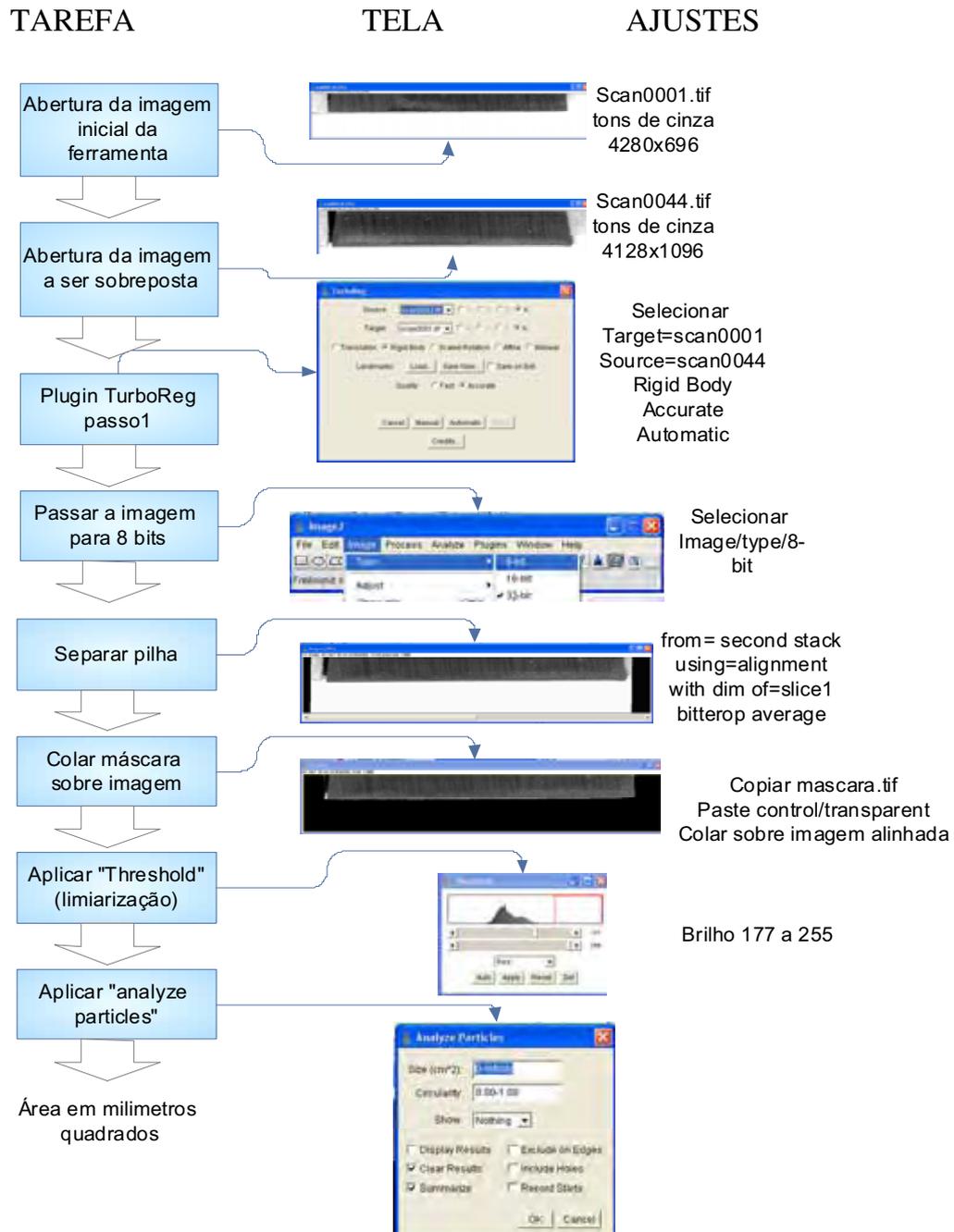


Figura 4.26 Diagrama indicando as etapas para a utilização do plugin (TurboReg) com indicação das opções a serem selecionadas dentro do "software".

Com a imagem inicial da ferramenta criou-se um gabarito ou imagem de referência com a qual foi feita a comparação com as demais imagens das sucessivas etapas de usinagem. Nesta fase inicial de processamento procurou-se por impurezas ou corpos estranhos e eliminou-se com o comando "eraser tool" impedindo que o erro fosse incorporado nas análises seguintes.

Utilizando o comando de limiarização (Threshold) do programa “ImageJ” transformou-se a imagem colorida para o modo monocromático (1 bit) utilizando-se como coeficientes de limiarização os níveis de brilho de 0 a 177 (Figura 4.27).



Figura 4.27 - Aplicação do comando de limiarização denominado “Threshold”.

O histograma da imagem, que apresentava a frequência de pontos na imagem em função da intensidade dos pixels permitiu selecionar os pontos de menor brilho que correspondia à área da ferramenta na figura. Neste caso ressalta-se a importância da utilização de um fundo claro, ou mesmo com iluminação difusa, no processo de digitalização para garantir imagens de alto contraste.

Na Figura 4.28 é apresentado a caixa de seleção e o correspondente histograma da imagem. Na região central do histograma é visto a concentração de pontos de menor luminosidade que correspondem à ferramenta e estão nitidamente separados do resto da imagem. Por meio de duas barras na caixa de seleção determina-se o valor máximo e mínimo de luminosidade dos pontos (pixels) de interesse a serem selecionados.

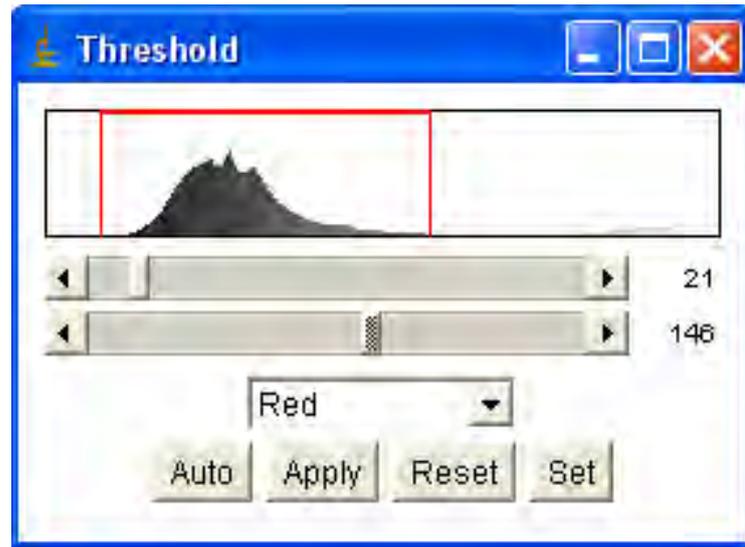


Figura 4.28 - Aplicação do comando de limiarização “Threshold”.

Invertendo-se a imagem para uma melhor visualização na sobreposição, obteve-se a máscara que serviu como referência para a comparação com as imagens posteriores da ferramenta (Figura 4.29).



Figura 4.29 – Máscara de referência para a medição do desgaste.

4.5. Digitalização de imagem das ferramentas após série de ensaios

Após cada quarenta metros lineares, fez-se a remoção do porta-ferramentas e repetiu-se o mesmo processo de limpeza para a eliminação de corpos estranhos. Digitalizou-se a superfície de folga da ferramenta com resolução de 2400 dpi seguindo o mesmo procedimento empregado na ferramenta recém afiada (Figura 4.30).



Figura 4.30 – Imagem do perfil de corte da ferramenta desgastada, após a o ensaio de usinagem.

4.6. Comparação da máscara com a imagem final do ensaio

Abrindo-se no programa simultaneamente as imagens iniciais (máscara de referência) e finais da seqüência considerada no ImageJ e com o auxílio dos “plugins” do programa é feita a sobreposição e o alinhamento.

A região da aresta cortante final, fica nitidamente menor que a região original evidenciada pela área clara na zona de transição entre a máscara e a ferramenta. Isto é ilustrado na Figura 4.31.



Figura 4.31 – Sobreposição das imagens digitalizadas nas situações anteriores e posteriores aos ensaios de usinagem.

4.7. Mensuração do desgaste pela sobreposição de imagens

Para a correta quantificação das áreas da imagem inicialmente é necessário fazer o correto ajuste da escala da imagem, pois as imagens digitais são medidas em “pixels” e é necessário fazer a conversão para seu equivalente métrico. Para esta função utiliza-se comando “setscale” no “ImageJ”. Em uma caixa de diálogo são fornecidas as distâncias em pontos por polegada e seu correspondente real em

milímetros conforme apresentado na Figura 4.32. No caso deste estudo, usa-se a calibração obtida pela experimentação com blocos padrão.

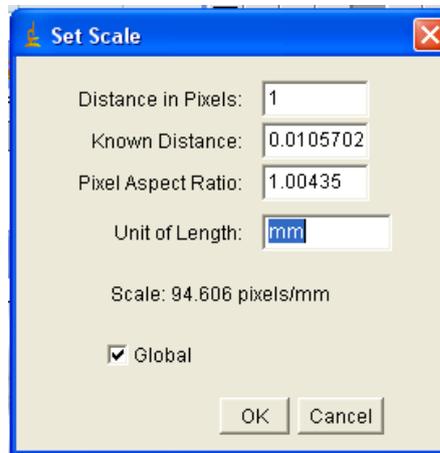


Figura 4.32 – Tela de ajuste de escala da imagem.

Na seqüência re replica-se o comando de limiarização (threshold), ilustrado na Figura 4.33, e com o novo histograma isolam-se os pontos claros da imagem que correspondem justamente à área perdida da aresta e conseqüentemente ao fundo, utilizado na digitalização.

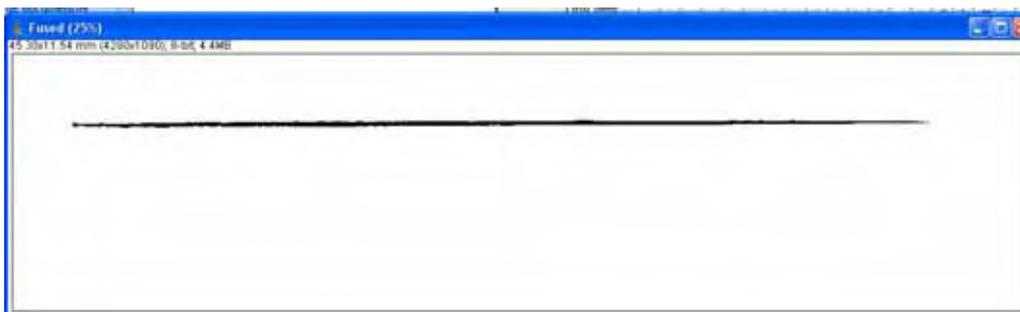


Figura 4.33 – Isolamento dos pontos claros da imagem com o comando de limiarização (threshold).

O ImageJ possui o comando “Analyze Particles” que permite analisar os pontos pertencentes à imagem pelos critérios como forma e dispersão. No caso deste estudo basta que o programa efetue a contagem dos pontos (pixels) pertencentes à imagem e faça sua conversão para o equivalente em área. Os ajustes necessários são mostrados na Figura 4.34.

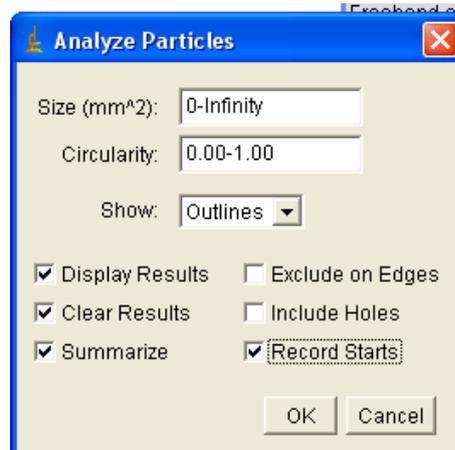


Figura 4.34 – Tela com os ajustes para o comando “Analyze Particles”.

Como resultado obtém-se uma imagem onde permanecem apenas as regiões limítrofes das áreas removidas e a quantificação dessas áreas na forma de uma tabela (Figura 4.35), concluindo-se o procedimento de quantificação da área de desgaste.

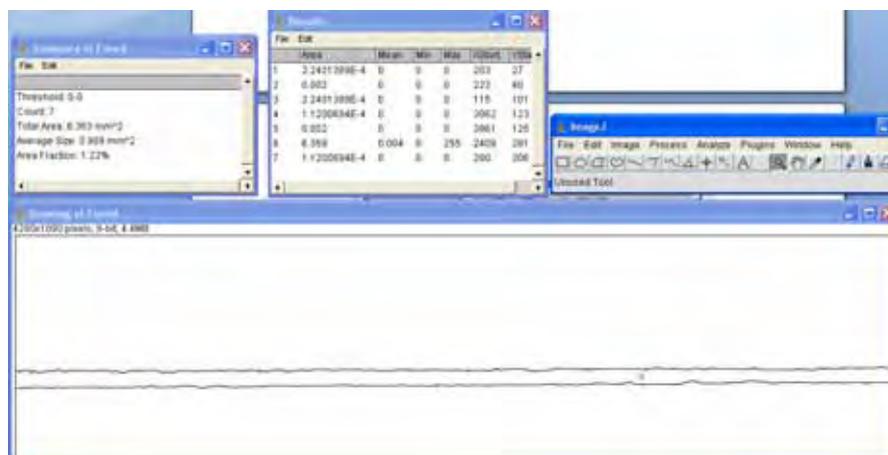


Figura 4.35 – Resultado final da análise indicando as áreas de desgaste e sua respectiva quantificação.

4.8. Medição dos comprimentos dos blocos padrão.

Nas experimentações com blocos padrões os mesmos procedimentos para a obtenção das imagens anteriores foram adotados. A partir desse ponto as imagens digitalizadas dos blocos foram processadas no programa ImageJ onde traça-se uma

linha com o auxílio do comando “line” indo de uma borda a outra da imagem do bloco conforme a ilustração da Figura 4.36 .

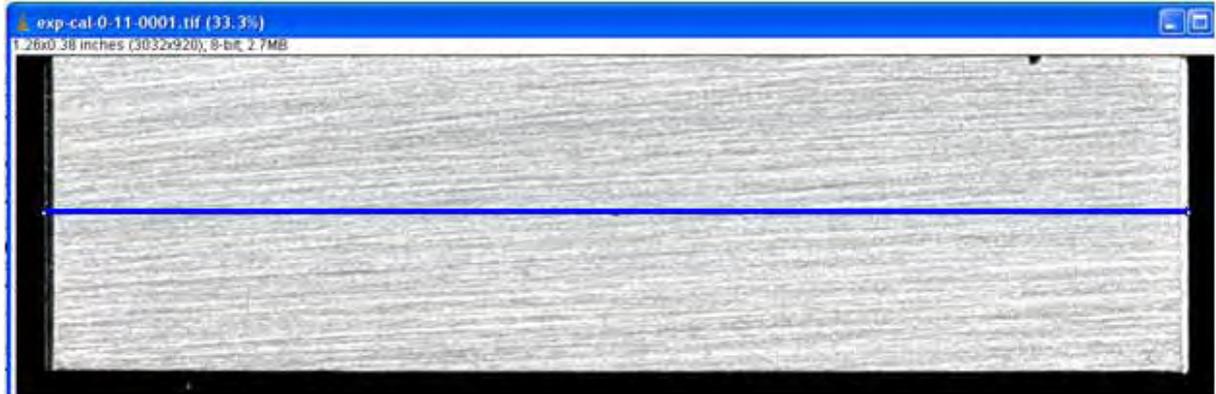


Figura 4.36- Representação da linha de medição traçada sobre a imagem do bloco padrão.

Por último, o comando “measure” é utilizado para obter-se o número de pontos equivalente da linha traçada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Calibração do sistema empregando-se blocos padrão.

Foram tomadas 32 medições do bloco padrão de 30 mm, com sua dimensão alinhada ao eixo x. Com o resultado em número pixels obtidos, obteve-se um valor médio de 2838,3 com desvio padrão de 2,5. A Figura 5.1 apresenta o histograma de frequência de distribuição dos erros de medição subdividido em dez classes.

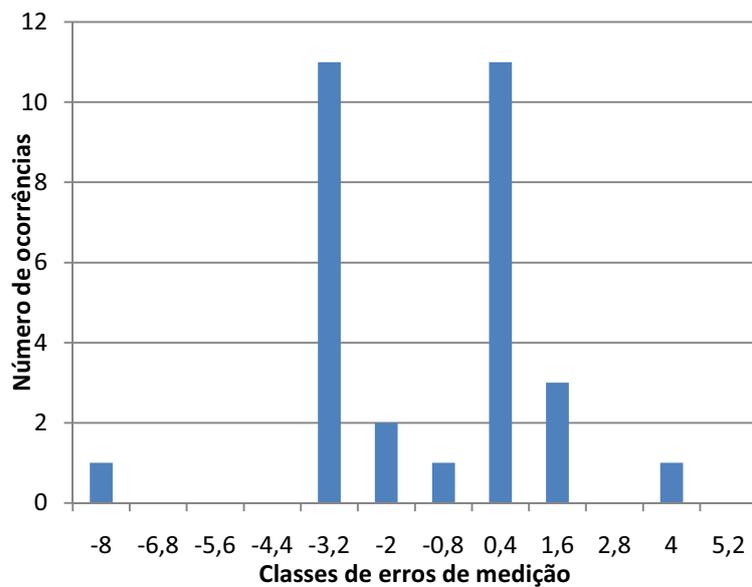


Figura 5.1 – Histograma da frequência de erros de medição do eixo x.

Para o eixo y repetiu-se a medição para 38 amostras, resultando em um valor médio de 2826,0, com desvio padrão de 1,7. A Figura 5.2 apresenta o respectivo histograma de frequência de erros.

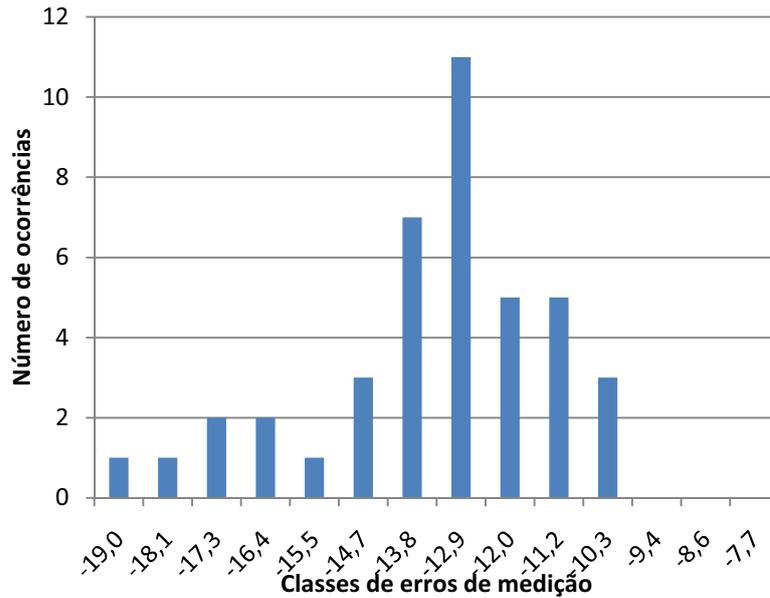


Figura 5.2 – Histograma da frequência de erros de medição do eixo y.

Com isso pode-se calcular o espaçamento do pixel segundo a aplicação da Equação (10) como se segue:

$$\delta = \frac{D}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (10)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{2 * 30,0014^2}}{\sqrt{2838,3^2 + 2826,0^2}}$$

$$\delta \cong 0,001057 \text{ mm}$$

E para cada eixo de medição tem-se:

$$\delta_x = 30,0014 / 2838,3 \cong 0,0105 \text{ mm}$$

$$\delta_y = 30,0014 / 2826,0 \cong 0,0106 \text{ mm}$$

Com razão entre eixos de $\delta_x / \delta_y \cong 1,00435$

Comparativamente em relação à resolução anunciada pelo fabricante de 2400 pontos por polegada, que resultaria em 2834 pontos em 30 mm, se obtém uma diferença média de 4 pixels a menos na direção y e 8,3 pixels a mais na direção x, mostrando uma excelente acuracidade do equipamento mesmo sem calibração.

A diferença de erros apresentada entre os eixos x e y, apesar de mínimas eram esperadas, uma vez que o sistema de varredura em x é puramente eletrônico pelo CCD e em y depende do sistema mecânico acionado pelo motor de passo.

5.2. Experimentação para análise de desgaste

Como resultado da experimentação, obteve-se as curvas indicando a progressão do desgaste da ferramenta em termos da perda de área da cunha cortante e recuo médio da aresta em função do comprimento de usinagem de madeira, apresentadas respectivamente nas Figuras 5.3 e 5.4. As imagens digitalizadas utilizadas para a medição do desgaste apresentam-se no Anexo A.

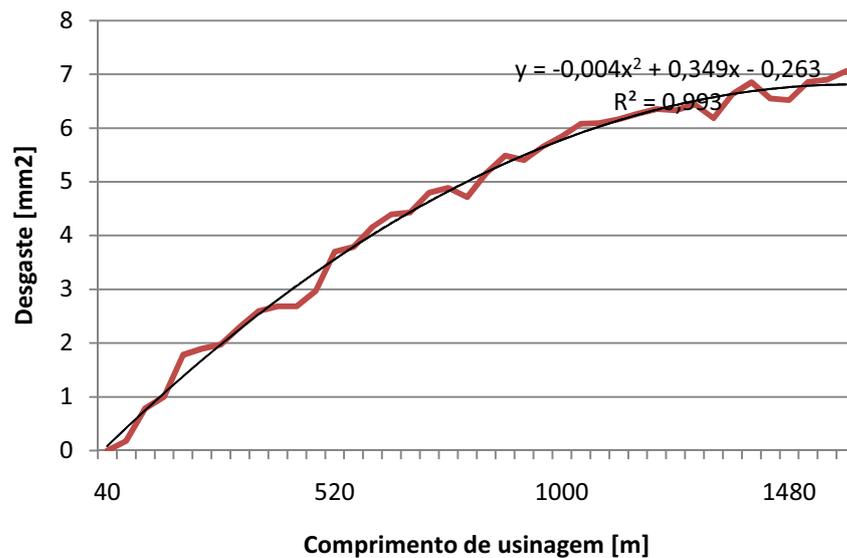


Figura 5.3 - Desgaste da ferramenta em função do comprimento de usinagem.

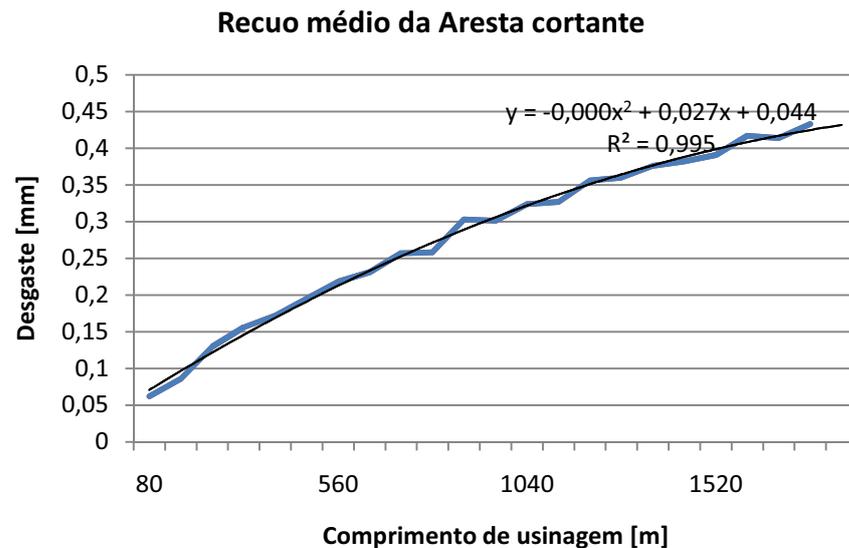


Figura 5.4 - Recuo médio da aresta cortante em função do comprimento de usinagem e curva polinomial ajustada para o conjunto de dados

Em seus estudos Gottlob (1996) apresentou uma curva de desgaste do aço VC-131 fresando a mesma espécie de madeira com tendência de curvatura similar a Figura 5.4. Essa tendência era esperada já que os mecanismos de desgaste atuando são os mesmos, o que reafirma a conformidade dos resultados obtidos. Entretanto os valores não permitem comparação direta, pois a geometria e o material das ferramentas diferem.

Um fenômeno observado no cálculo da área e que não esta de acordo com o comportamento do desgaste, foi à diminuição e não o aumento da área perdida da aresta da madeira entre duas medições consecutivas. Pode-se atribuir esse fato a erros aleatórios presentes no processo de medição e, portanto deve-se utilizar valores médios para as análises a fim de minimizar essas distorções.

Com relação às informações que podem ser extraídas da curva obtida, Valarelli (1993) e Gonçalves (2000) apontam que um recuo da aresta de corte (V_b) de até 0,2 mm deve ser utilizado apenas para desbaste e acabamento moderado, não sendo indicado para operações de acabamento fino. Isto ocorre no experimento por volta dos 500 metros usinados levando a definir esse ponto como momento de re-afiação da ferramenta dependendo da qualidade de acabamento da operação.

A inclinação da curva do gráfico da Figura 5.4 indica uma velocidade de desgaste duas vezes maior no trecho de 0 a 500 m e depois ocorre uma desaceleração

progressiva. Esse fenômeno é apontado por Gottlob (1996) e se deve ao arredondamento da aresta de corte, sendo necessária uma remoção de massa da aresta cada vez maior para obter-se a mesma perda de área.

Outro fenômeno peculiar no ensaio foi o desgaste em forma de parábola ocorrido na aresta cortante da ferramenta e que fica evidenciado na Figura 5.5. Este se deve provavelmente ao fato de que a ferramenta possuía largura maior (39 mm) que as peças usinadas que possuíam largura de 35 mm, deixando as laterais da ferramenta menos solicitadas.



Figura 5.5 - Imagem apresentando a região de desgaste em cor clara mais pronunciada na região central da ferramenta.

Um fator a ser considerado nessa metodologia é que removendo-se a ferramenta a cada 40 metros lineares pode ter havido interferência no processo de desgaste uma vez que, como conclui Gottlob (1996), a temperatura no gume cortante tem influência significativa sobre a velocidade do desgaste e o sucessivo processo de parada para medição interferiu nessa variável.

5.3. Experimentação para verificação de erros com relação à posição do objeto.

O bloco de 22,50 mm do primeiro conjunto de blocos padrão foi digitalizado em cada uma das áreas do vidro do digitalizador e os resultados são apresentados na Figura 5.6

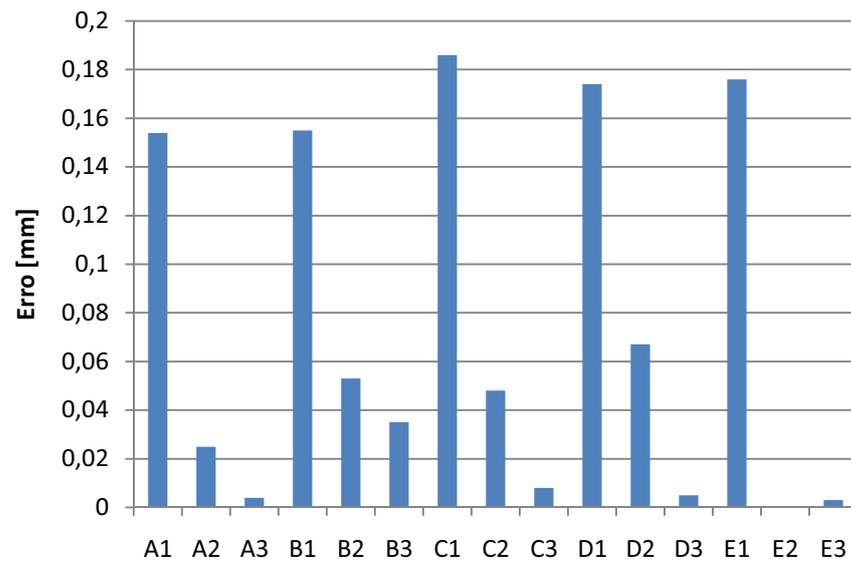


Figura 5.6 - Erro de medição em milímetros em cada posição com relação ao valor dimensional do bloco padrão.

Esse experimento inicial teve caráter apenas exploratório e serve como indicativo do comportamento do sistema.

Utilizando-se o bloco de 30 milímetros do segundo conjunto de blocos padrão foi realizada a sua digitalização por 32 vezes com seu centro geométrico localizado no eixo I (definido no item 4.2 da metodologia) a 50 milímetros a esquerda do centro do vidro do digitalizador. Os resultados são apresentados na Figura 5.7. A média calculada foi de 0,02 milímetro e o desvio padrão de 0,009 milímetro.

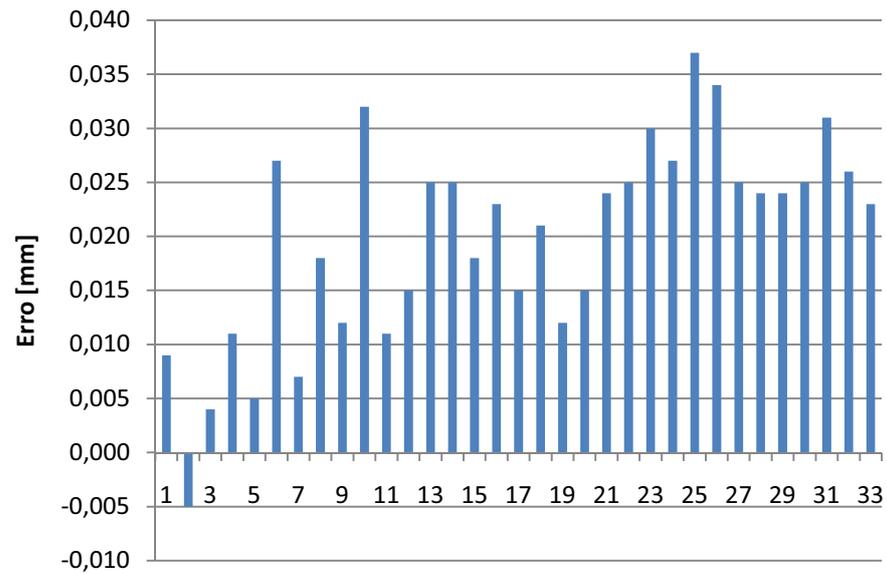


Figura 5.7 - Diferença entre o valor real da dimensão do bloco padrão de 30 mm do conjunto 2 e o valor obtido na medição com seu centro deslocado a cinco centímetros a esquerda da origem.

O mesmo procedimento foi repetido agora se posicionando o centro do bloco padrão 80 milímetros a direita do centro do digitalizador. O resultado dos erros de medição encontra-se apresentado na Figura 5.8. A média foi calculada em menos 0,232 milímetro e o desvio padrão em 0,008 milímetro.

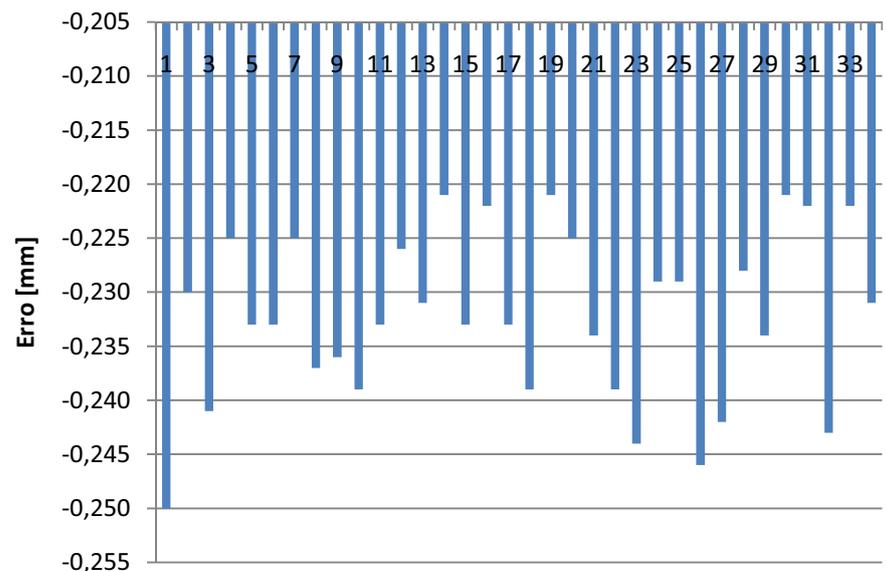


Figura 5.8 - Diferença entre o valor real da dimensão do bloco padrão de 30 mm do conjunto 2 e o valor obtido na medição com seu centro deslocado a oito centímetros a direita da origem.

Por último, nessa seqüência de experimentos, foi posicionado o centro geométrico do mesmo bloco padrão no centro da linha de eixo II, definido no item 4.2., que está deslocada onze centímetros abaixo do centro do vidro do digitalizador. Os resultados são apresentados na Figura 5.9 e a média dos erros para este experimento foi de 0,002 milímetro e desvio padrão de 0,012 milímetro.

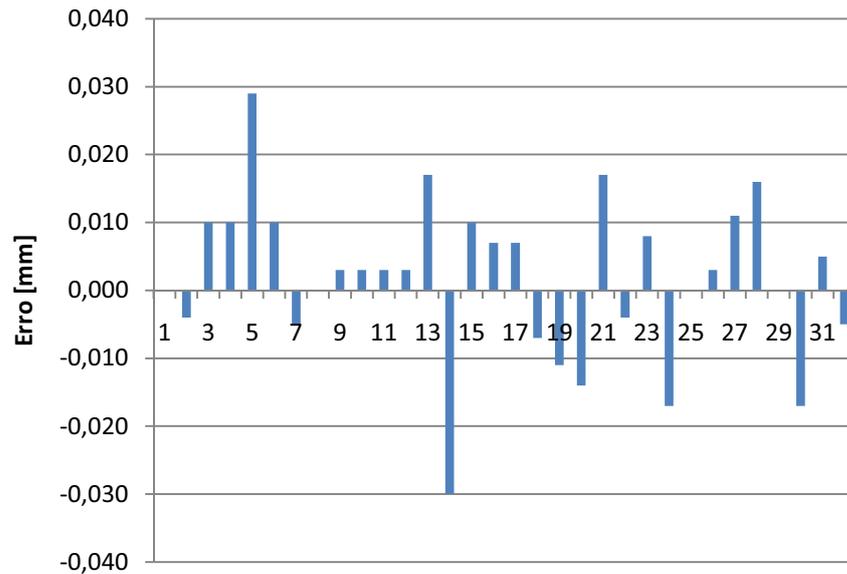


Figura 5.9 - Diferença entre o valor real da dimensão do bloco padrão de 30 mm do conjunto 2 e o valor obtido na medição com seu centro deslocado onze centímetros abaixo do centro do vidro do digitalizador.

Os resultados mostram uma tendência de diminuição nos valores medidos quando se desloca da esquerda para a direita o centro do bloco padrão. Embora a dispersão de resultados, representada pelo desvio padrão, se mantenha praticamente inalterada, o valor médio sofre substancial mudança. Isto se deve provavelmente a um desalinhamento do sistema óptico e compromete os resultados tomados fora da região de calibração.

Com relação ao deslocamento vertical, como esperado não se apresentou alteração significativa nos valores das medições, o que sugere o posicionamento da aresta cortante da ferramenta na posição vertical como maneira de diminuir-se o efeito de um possível desalinhamento do sistema.

5.4. Experimentação para verificação de erros de repetibilidade

Fazendo-se a análise das imagens obtidas em seqüência e na mesma posição com o bloco de 25 mm do primeiro conjunto de blocos padrão na posição central do vidro do digitalizador, obtiveram-se como resultados os erros das medições que estão apresentado na Figura 5.10.

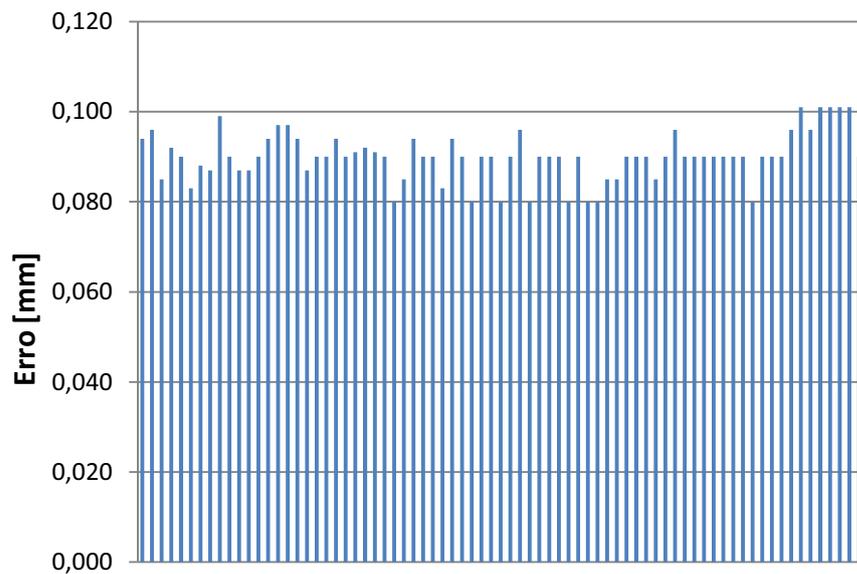


Figura 5.10 - Diferença entre o valor real da dimensão do bloco padrão de 25 mm do conjunto 1 e o valor obtido na medição.

O erro médio foi calculado em 0,09 mm e o desvio padrão em 0,005 mm e embora o erro absoluto chegue até um décimo de milímetro nas medições, o que seria considerado elevado, fica claro que os resultados tem pequena variação em torno da média, o que leva a supor a presença de um erro sistemático.

Repetiu-se o mesmo experimento utilizando o bloco padrão de 30 mm, e os resultados dos erros obtidos são apresentados na Figura 5.11

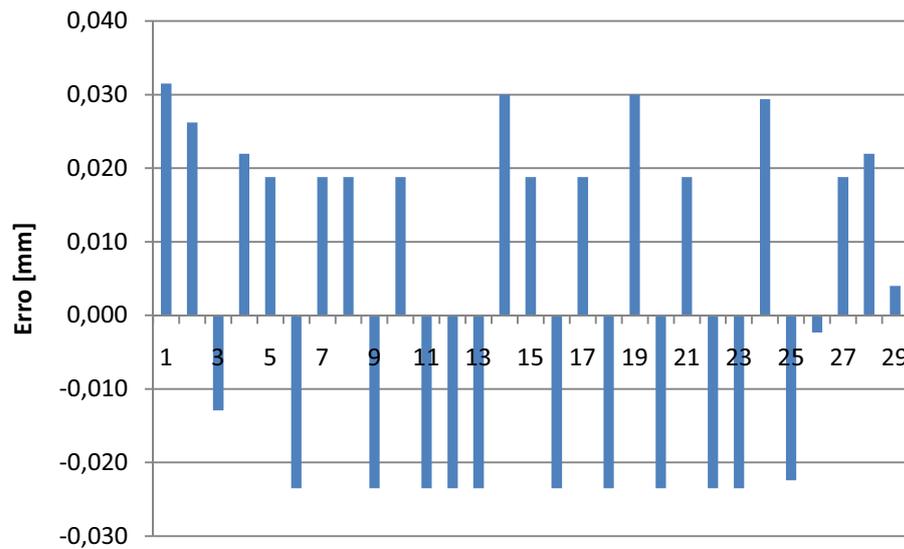


Figura 5.11 - Diferença entre o valor real da dimensão do bloco padrão de 30 mm do conjunto 2 e o valor obtido na medição.

Na Figura 5.11 observa-se uma consistência maior nos resultados, com média 0,003 e desvio padrão de 0,022. Isto indica que o sistema é capaz de reproduzir os resultados considerando-se a acuracidade de um centésimo de milímetro que é a capacidade de resolução do sensor óptico. Verifica-se também que existem problemas com os resultados obtidos com o primeiro conjunto de blocos padrão devido ao valor médio apresentado.

5.5. Experimentação para verificação de erros em diversos blocos

Foram feitas medições no mesmo ponto do vidro do digitalizador com blocos de diversas medidas do conjunto 1 de blocos padrão. Os resultados são apresentados na Figura 5.12.

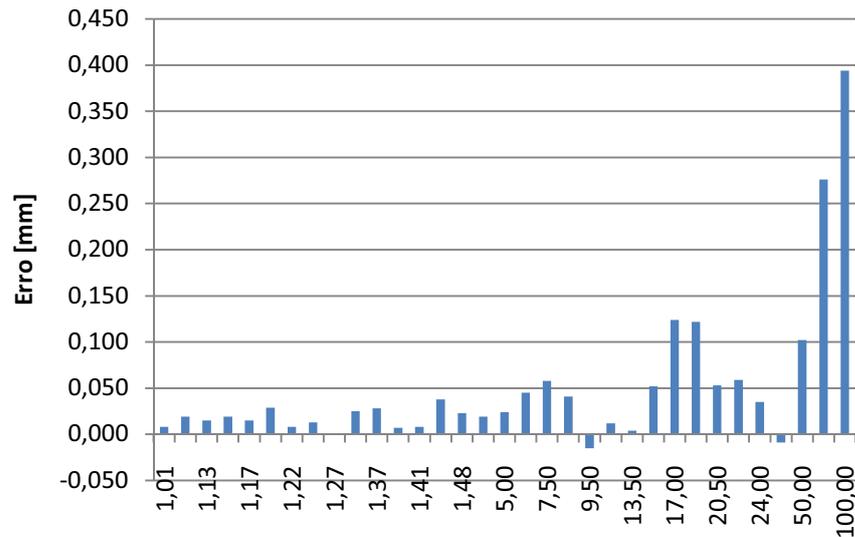


Figura 5.12 erros obtidos entre a medição e o tamanho real de diversos blocos padrão do conjunto 2

Novamente observam-se valores sempre positivos acima da média, levando a concluir pela presença de um erro sistemático.

Com o segundo conjunto de blocos foram feitas medições para os blocos de 6, 20 e 50 mm com número de 32 amostras por bloco, que são apresentados nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15.

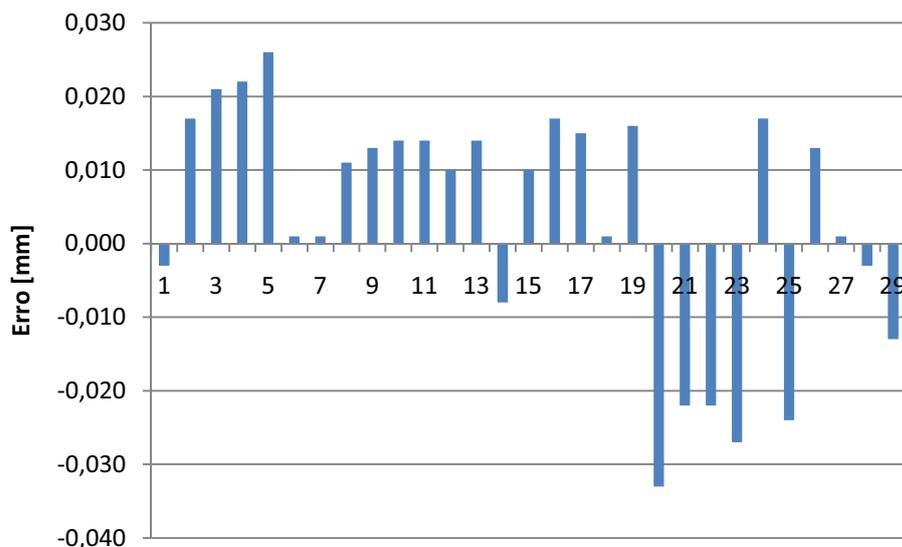


Figura 5.13 - Diferença entre o valor real da dimensão do bloco padrão de 6 mm do conjunto 2 e o valor obtido na medição.

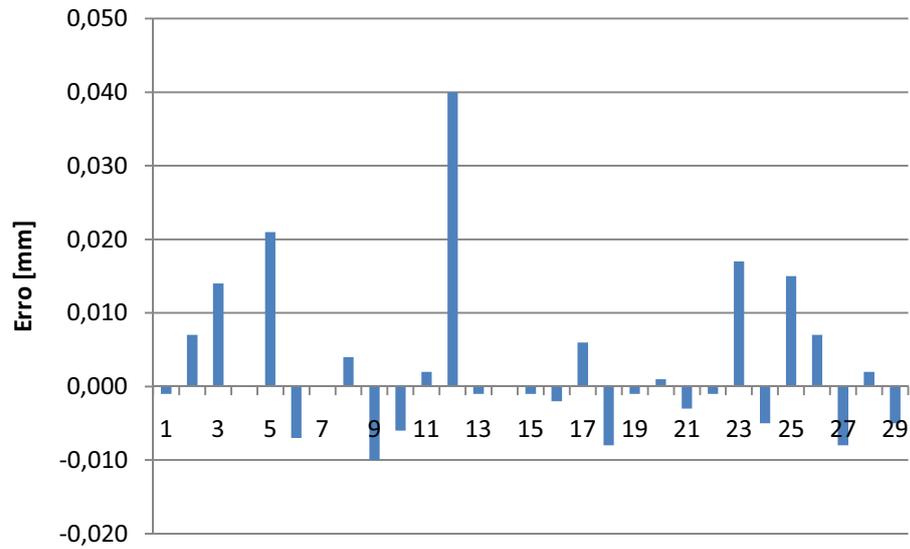


Figura 5.14 - Diferença entre o valor real da dimensão do bloco padrão de 20 mm do conjunto 2 e o valor obtido na medição.

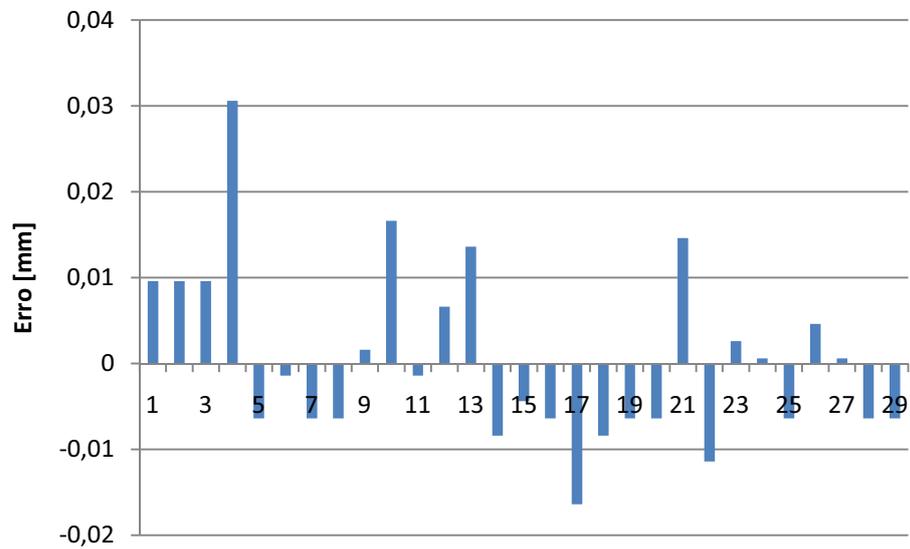


Figura 5.15 - Diferença entre o valor real da dimensão do bloco padrão de 50 mm do conjunto 2 e o valor obtido na medição.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as médias e desvio padrão para cada conjunto de medição dos blocos

Tabela 5.1 - médias e desvio padrão para cada conjunto de medições dos blocos

<i>Dimensão do Bloco</i>	<i>Média dos erros</i>	<i>Desvio padrão dos erros</i>
(mm)	(mm)	(mm)
6	0,0034	0,0163
20	0,0027	0,0105
30	0,0025	0,0225
50	0,0018	0,0131

Nos três casos obteve-se média abaixo de 0,004 mm e desvio padrão próximo a 0,02 mm indicando uma grande exatidão do método independentemente do tamanho do corpo de prova.

As análises do primeiro conjunto de blocos padrão resultaram em médias muito superiores ao segundo conjunto, isso provavelmente se deve ao ângulo das lentes do digitalizador, fazendo com que qualquer afastamento entre a superfície da ferramenta e do vidro do digitalizador ocasione erros grosseiros de leitura, afastamento este que resultam da forma peculiar do primeiro conjunto.

5.6. Análise qualitativa das imagens comparando-se com um projetor de perfil

As imagens em acetato foram sobrepostas ao visor do projetor de perfil, conforme descrito no item 4.2, evidenciando uma grande exatidão entre as imagens ampliadas em 10x. Visualmente não é possível diferenciar uma da outra, levando a interpretar que os resultados da medição executados pela sensibilidade humana conduziram a resultados iguais. Observa-se apenas que uma ampliação dessa magnitude é utilizada comumente para aferir desgastes em ferramentas de corte de grandes dimensões, como a faca do experimento que possui 40 mm de largura. No

Anexo A são apresentadas algumas fotos do acetato sobre o visor do projetor de perfil.

Uma vantagem da utilização desse método sobre o projetor de perfil reside na possibilidade de calibração de desgastes alinhados fora do plano ortogonal da aresta de corte, pois a máscara de referência serve como indicador da posição inicial da aresta permitindo a correta mensuração de picos e vales mesmo que toda a superfície inicial tenha sido removida.

5.7. Prováveis fontes de erros na utilização do sistema.

Dentre as possíveis fontes de erro do digitalizador utilizado nesta pesquisa destacam-se:

- Aceleração e desaceleração do braço: Embora a caixa de redução reduza os efeitos de erros de posicionamento do motor de passo e, segundo Pawlak (2007), os motores de passo não acumulem erros angulares ao longo de rotações completas. Seria prudente a obtenção de áreas de imagem maiores que a necessária em seu comprimento para permitir a estabilização da velocidade de varredura do braço;
- Aberrações e distorções geométricas causadas pelas lentes: Recomenda-se a utilização da região central do vidro do digitalizador, onde os ângulos de incidência dos raios são menores;
- Distorções causadas pelo desalinhamento do sistema óptico: Neste caso apenas os procedimentos de calibração podem detectar erros que podem se encontrar na casa de centésimos de milímetro. Em manuais técnicos são citadas grades para calibração, entretanto não são intencionadas para este tipo de aplicação;
- Afastamento da superfície da ferramenta do vidro do digitalizador: Conforme observado pelo conjunto de blocos padrão 1, mesmo o afastamento da ordem de um milímetro pode levar a distorções na casa dos décimos de milímetro na imagem, inviabilizando o uso para o tipo de aplicação pretendida caso ocorra.

- Operações de rotação e translação das imagens: Devido ao fato das imagens digitais serem discretas, quaisquer operações de transformação podem conduzir a distorções com relação a imagem óptica e portanto devem ser evitadas. O cuidadoso posicionamento da ferramenta no mesmo ponto e com a mesma orientação tendem a minimizar esse problema, o que pode ser facilitado pela utilização de gabaritos e suportes para a ferramenta;
- Operações de limiarização: Os valores de limiarização tem interferência significativa sobre os resultados, portanto uma vez que estes valores forem definidos para a operação de geração da máscara, devem ser mantidos para todas as demais operações.
- Iluminação: Os níveis de luminosidade na obtenção da imagem digital devem ser mantidos constantes e, portanto sugere-se a utilização de iluminação auxiliar fixa para garantir um maior contraste. Também os ajustes de “software” de brilho e contraste uma vez definidos não devem ser alterados.
- Tipo de imagem: Imagens coloridas devem ser evitadas para afastar a possibilidade de aberrações e a melhor utilização do sistema CCD em uma faixa estreita do espectro.

6. CONCLUSÕES

- O método apresentado se mostrou bastante rápido após a definição de alguns procedimentos, como a utilização de gabaritos e a remoção do porta-ferramentas, sem alterar os ajustes da máquina de usinagem tornando possível diminuir para horas o tempo para obtenção dos resultados de uma série completa de desgaste em operações de usinagem de madeira;
- As medições lineares se mostraram confiáveis dentro da capacidade de resolução do modelo que é da casa de um centésimo de milímetro com um desvio de dois centésimos.
- Os passos para efetuar as medições são simples e um pequeno manual bastaria para um operador de nível médio utilizá-lo em uma empresa com um custo mínimo;
- Apesar da simplicidade do método, cuidados devem ser tomados iguais aos necessários a qualquer medição metrológica;
- O processo de calibração é indispensável para a obtenção de medições com a acuracidade necessária;
- A melhor área para obtenção de imagens no vidro do digitalizador é a região central, devendo-se evitar a proximidade com as bordas laterais;
- Houve compatibilidade entre os resultados obtidos para a experimentação e os trabalhos de usinagem de madeira presentes na literatura, bem como a acuracidade se mostra satisfatória para a maioria dos estudos analisados;
- Comparativamente ao projetor de perfil o método proposto apresenta grandes vantagens para sua utilização na análise de ferramentas de corte para madeira entre elas: Possibilidade de estudo de ferramentas do tipo faca; Existência de referências da posição inicial da aresta de corte; Medição de áreas e recuos médios; Arquivamento das imagens com possibilidade de resgate de dados de cada etapa; Velocidade na obtenção das medições; Baixo custo; Portabilidade;

Conclui-se portanto que o método como alternativa para o contexto da pesquisa na área madeireira, em que quantidades exaustivas de ensaios são necessárias para caracterizar um material extremamente heterogêneo, é viável e interessante tanto do ponto de vista técnico como operacional.

Dentre as questões que não ficaram respondidas e abrem perspectivas de trabalhos futuros estão o desenvolvimento de um “software”, em português, para a análise dessas imagens, o estudo dos digitalizadores tipo LIDE para verificar seu desempenho comparativo e o levantamento de curvas de desgaste para diversas espécies de madeira de forma a contribuir com o conhecimento nessa área.

REFERÊNCIAS

- ASVIK, K. J. G. **Optical Metrology**. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2002.
- BECHWITH, T. G.; MARANGONI, R. D.; LIENHARD J. H. **Mechanical measurements**, USA: Addison-wesley, 1993.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Relatório Setorial da Indústria de Móveis no Brasil**. Brasília: MDIC, 2008.
- CALDEIRANI J. F.; DINIZ A. E. Influence of Cutting Conditions on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, Rio de Janeiro, V.24, N.1, 2002.
- CARPINETTI, L.C.R. **Planejamento de Experimentos**. São Carlos: Seção de Publicações – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996.
- DIMLASNR, D. E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 40, pg. 1073–1098, 2000.
- DINIZ, A. E.; BRAGHINI, A. J.; TEIXEIRA, F. Tool wear damage caused by abundant emulsion in milling operation of PH stainless steel, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, Apr./June, 2008.
- DOEBELIN, E. O. **Measurement systems: applications and design**, USA: McGraw-Hill, 2004.
- EFFORD, N. **Digital Image Processing: a practical introduction using Java**. USA: Addison Wesley, 2000.
- FADARE, D. A.; ONI, A. O. Development and application of a machine vision System for measurement of tool wear. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, vol. 4, n. 4, june, 2009.
- FARIA, J. C. **Estudo da usinagem em torneamento da superliga à base de níquel NIMONIC 80A**. 2007. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

FARIAS, G. M.; WEINGAERTNER. Fresamento em alta velocidade (HSC) de madeiras reflorestadas de “*Eucalyptus grandis*” e “*Eucalyptus dunni*”. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 2000 **Anais**, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2000.

FERRARESI, D. **Fundamentos de usinagem dos metais**. São Paulo: Ed. Edgar Blucher, 1977.

FIALHO, A. B. **Instrumentação Industrial – Conceitos, Aplicações e Análises**. São Paulo: Editora Érica, 2002.

GISIP, J.; GAZO, R.; STEWART, H. A. Effects of refrigerated air on tool wear. **Wood and Fiber Science**, v.39, n.3, p. 443 – 449, 2007.

GONÇALVES, M. T. T. **Contribuição para o estudo da usinagem de madeiras**. 1990. 241 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. 1.ed. Bauru: Document center xerox -USC, 2000.

GONÇALVES, M. T. T. **Proposta de metodologia para a medição dos esforços de corte na usinagem de madeira**. 1993. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**, São Paulo: Edgard Blucher, 2000.

GOTTLOB, W. J. **Determinação da vida de ferramentas de aço AISI classe D-6 do stellite-1 na usinagem de madeira de “*Eucalyptus grandis*”**. 1996. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

GOTTLOB, W. J. **Os materiais das ferramentas usadas na usinagem da madeira**. 1991. Tese (Mestrado em engenharia mecânica)– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

INDFEMA – Indústria de ferramentas para madeiras. Catálogo e especificações de fresas. Disponível em <http://indfema.com.br/>. Acesso em 10 dez. 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **portaria 29/95**, Brasília, 1995.

JÄHNE, B. **Digital image processing**. Berlin, Alemanha: Springer, 2002.

JANSEN, R. **Computational Image Quality**. USA: SPIE, 2001.

JURKOVIC, J.; KOROSSEC, M.; KOPAC, J. New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, Pg. 1023-1030, July, 2005.

LIRA, F. A. **Metrologia nas Indústrias**. São Paulo: Erica, 2001.

MATSUMURA, T.; MURAYAMA, T.; USUI, E. Tool wear monitoring in milling process With laser scan micrometer. **Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium**, USA: Springer, pg. 764 – 768, 2001.

MITUTOYO – Indústria de equipamentos para metrologia. Catálogo e especificações de aparelhos de medição. Disponível em <http://mitutoyo.com/>. Acesso em 20 dez. 2009.

NATIONAL INSTITUTE OF HEALTH – Orgão de saúde do governo Norte Americano. Informações e “download” do programa ImageJ. Disponível em <http://rsb.info.nih.gov/ij/>. Acesso em 6 de out. 2009.

PAWLAK, A. M. **Sensors and actuators in mechatronics: Design and Applications**. USA: Taylor & Francis Group, 2007.

PFEIFER, T.; WIEGERS, L. Reliable tool wear monitoring by optimized image and illumination control in machine vision. **Measurement**, v. 28, pg. 209-218, October, 2000.

RUSS, J. C. **The image processing handbook**. USA: Taylor & Francis Group, 2007

SILVA, E. R.; MURAMATSU, M. O fenômeno do “speckle” como introdução a metrologia óptica no laboratório didático. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 2, p. 283-286, 2007.

SLĂTINEANU, L.; DODUN, O.; COTEAȚĂ, M.; MUNTEANU, A.; ILII, S. Optical device for the study of the turning tool wear, **Fascicle of Management and Technological Engineering**, V. 6, n.16, technical university “Gh. Asachi” of Iași, 2007.

Snr, D. E. D. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations -a review of methods. **International journal of machine tools & manufacture**, United Kingdom, V.40, p. 1073-1098, 2000.

SZWAJKA, K.; GÓRSKI, J. Evaluation Tool Condition of Milling Wood on the Basis of Vibration Signal, **Journal of Physics: Conference Series 48 - International Symposium on Instrumentation Science and Technology**, Poland, p. 1205–1209, 2006.

VALARELLI, I. D. **Estudo do desgaste de serra circular com inserto de metal duro para usinagem de madeira**. 1993. 135 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

WANG, W. H.; WONG, Y.S.; HONG, G.S. 3D measurement of crater wear by phase shifting method. **Wear**, Vol. 261, p 164-171, 2006.

WEISSENSTEIN, C. **Afiação de ferramentas para usinar madeira e seus derivados**. Bento Gonçalves: SENAI / CETEMO, 1997.

WITTE, H. **Máquinas Ferramenta: Elementos Básicos de Máquinas e Técnicas de Construção**. São Paulo: Hemus, 1998.

WONG, Y. S.; NEE, A. Y. C.; LI, X. Q.; RELSDORF, C. Tool condition monitoring using laser scatter pattern. **Journal of materials processing technology**, v.63, n. 13, p. 205-210, 1997.

WU, Q.; MERCHANT, F.; CASTLEMAN, K. **Microscope Image Processing**. USA: Elsevier, 2008.

Y. C. TASAN; M. B. de ROOIJ; D. J. SCHIPPER; Measurement of wear on asperity level using image-processing techniques. **Wear**, Vol. 258, p. 83–91, 2005.

YAN, W.; GOEBEL, K. Feature Selection For Tool Wear Diagnosis Using Soft Computing Techniques. In: ASME - MANUFACTURING IN ENGINEERING DIVISION, 2000, New York. **Proceedings**, Vol.11, p 157-163, 2000.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CALDEIRANI FILHO, J.; DINIZ A. E. Influence of Cutting Conditions on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, Jan./Mar, 2002.

DHAR, N. R.; ISLAM S.; KAMRUZZAMAN, M.; PAUL, S. Wear behavior of uncoated carbide inserts under dry, wet and cryogenic cooling conditions in turning C-60 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, Abr./Jun, 2006.

KURADA, S.; BRADLEY, C. A review of machine vision sensors for tool condition monitoring. **Computers in Industry**, v.34, pg. 55-72, October, 1997.

MACHADO, A. W.; SOUKI, B. Q. Simplificando a obtenção e a utilização de imagens digitais - scanners e câmeras digitais, **Revista Dental Press**, Ortodontia Ortopedia Facial, Maringá, v. 9, n. 4, p. 133-156, 2004.

NIDAL, H.; ABU-ZAHRA; TAYSIR, H. N. Calibrated method for ultrasonic on-line monitoring of gradual wear during turning operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 37, pg. 1475-1484, October, 1997.

ORABYI, S. E.; ALASKARI, A. M. Surface topography assessment techniques based on an in-process monitoring approach of tool wear and cutting force signature, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. Rio de Janeiro, v. 30, n. 3, Jul./Set, 2008.

PRICKETT, P.W.; JOHNS, C. An overview of approaches to end milling tool monitoring. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v.39, pg.105-122, 1999.

SILVA, E. R.; MURAMATSU, M. O fenômeno do speckle como introdução à metrologia óptica no laboratório didático. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 2, p. 283-286, 2007.

SINGER, W.; TOTZEK, M.; GROSS, H. **Handbook of Optical Systems** Alemanha: Wiley-VCH, V.2, 2005.

SZE, S. M.; NG, K. K. **Physics of Semiconductor Devices**. USA: Wiley-Interscience, 2007.

TAS, Y. C.; ROOIJ, M. B.; SCHIPPER, D. J. Measurement of wear on asperity level using image-processing techniques. **Wear**, v.258, pg. 83–91, 2005.

WILCKEN, C. F.; MORAES R. C. B.; HADDAD, M. L.; PARRA, J. R. P. Técnica de medição de área foliar consumida por insetos através de digitalizador de imagens. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55, p.2, 1998.

ANEXO A – Imagens das Experimentações

A partir da análise das imagens digitais foram obtidos resultados os para as áreas de desgaste apresentados na Tabela 1

Tabela 1 - Resultado da experimentação de desgaste

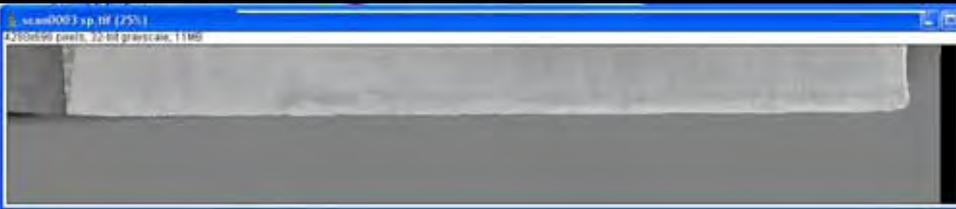
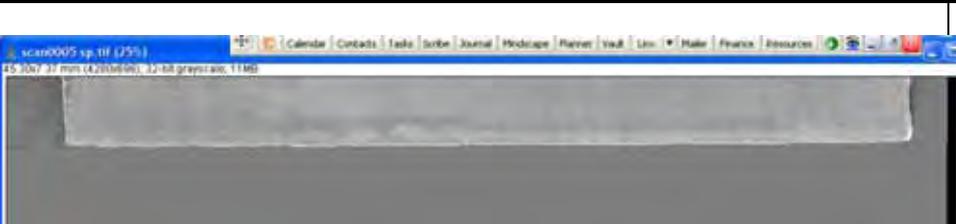
Material Usinado	Material da ferramenta	
Eucalyptus Grandis	Aço Rápido	
Metros	Imagem	Area (mm ²)
0		Total Area: 0.001 mm ²
40		Total Area: 0.177 mm ²
80		Total Area: 0.784 mm ²
120		Total Area: 1.007 mm ²
160		Total Area: 1.783 mm ²

Tabela 1 - Resultado da experimentação de desgaste-cont

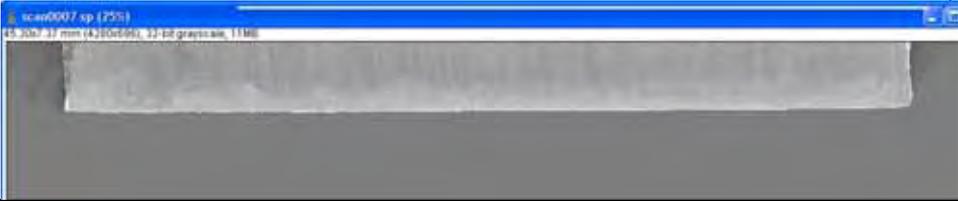
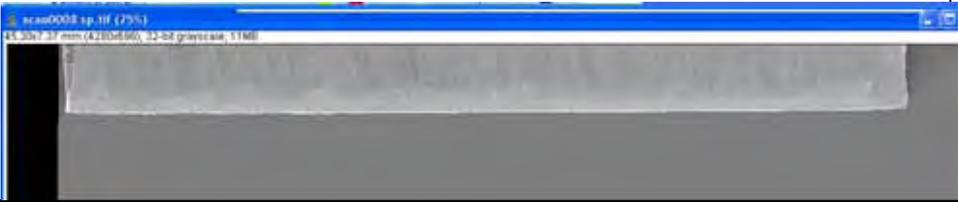
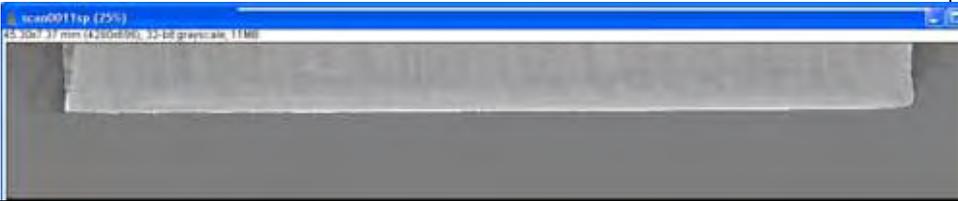
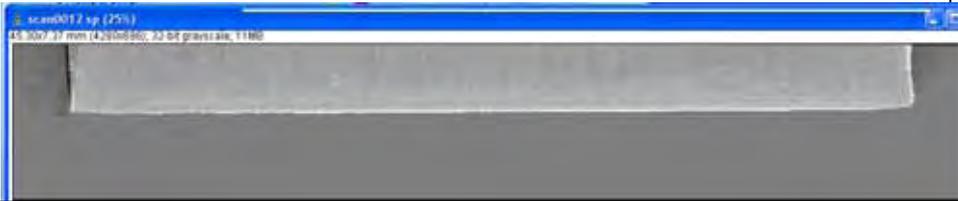
Material Usinado	Material da ferramenta	
Eucalyptus Grandis	Aço Rápido	
Metros lineares	Imagem	Area (mm ²)
200		Total Area: 1.897 mm ²
240		Total Area: 1.972 mm ²
280		Total Area: 2.300 mm ²
320		Total Area: 2.593 mm ²
360		Total Area: 2.684 mm ²
400		Total Area: 2.682 mm ²

Tabela 1 - Resultado da experimentação de desgaste-cont

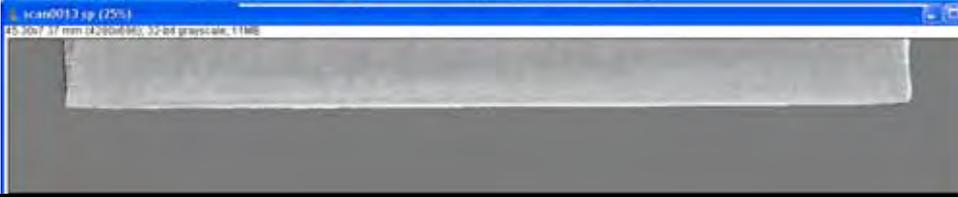
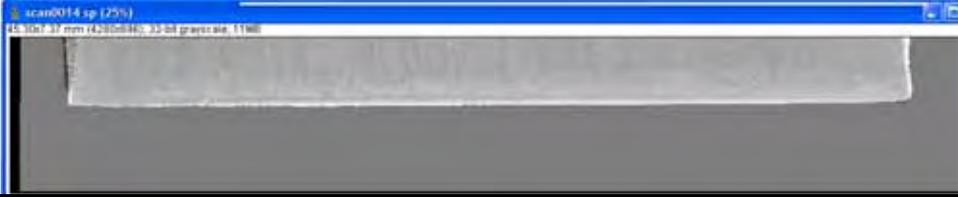
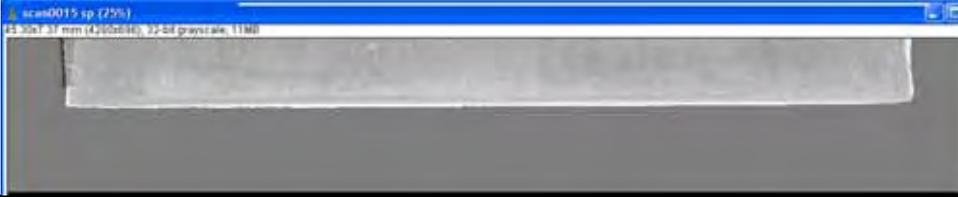
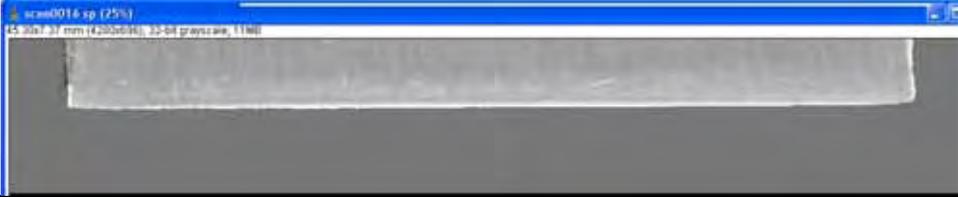
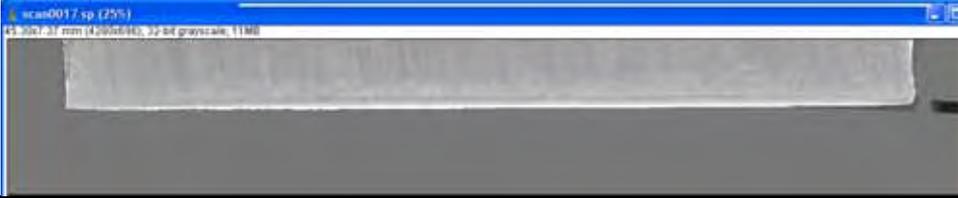
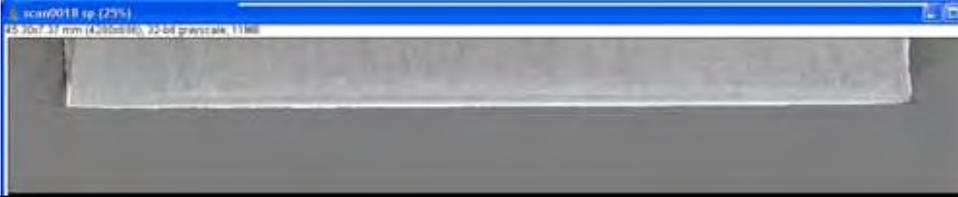
Material Usinado	Material da ferramenta	
Eucalyptus Grandis	Aço Rápido	
Metros lineares	Imagem	Area (mm ²)
440		Total Area: 2.868 mm ²
480		Total Area: 2.971 mm ²
520		Total Area: 3.701 mm ²
560		Total Area: 3.788 mm ²
600		Total Area: 4.164 mm ²
640		Total Area: 3.596 mm ²

Tabela 1 - Resultado da experimentação de desgaste-cont

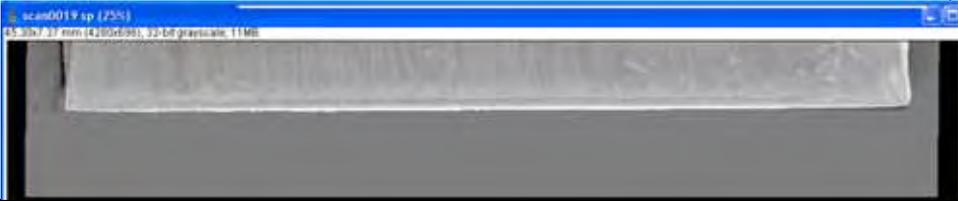
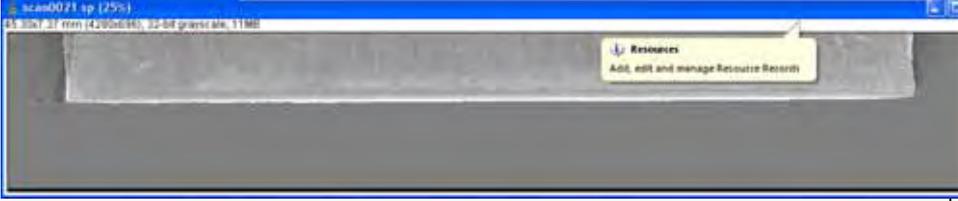
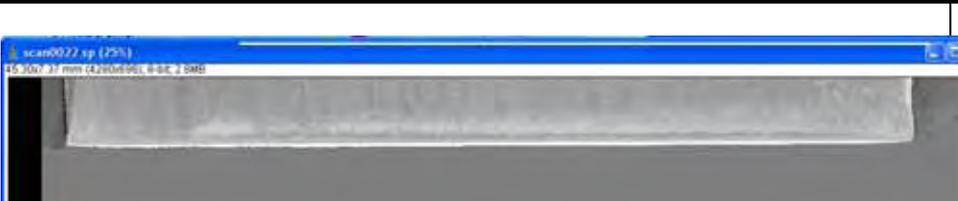
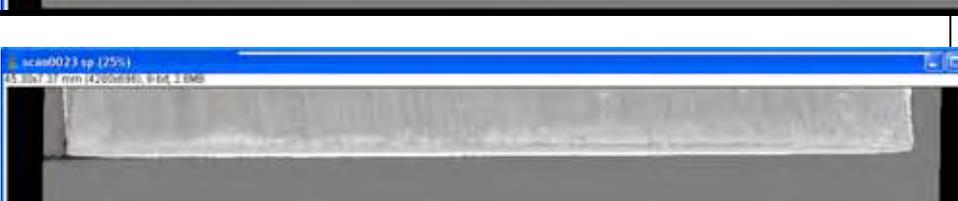
Material Usinado	Material da ferramenta	
Eucalyptus Grandis	Aço Rápido	
Metros lineares	Imagem	Area (mm ²)
680		Total Area: 4.394 mm ²
720		Total Area: 4.429 mm ²
760		Total Area: 4.794 mm ²
800		Total Area: 4.888 mm ²
840		Total Area: 4.569 mm ²
880		descartado

Tabela 1 - Resultado da experimentação de desgaste-cont

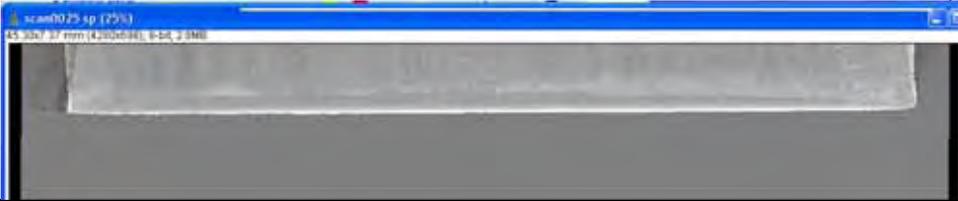
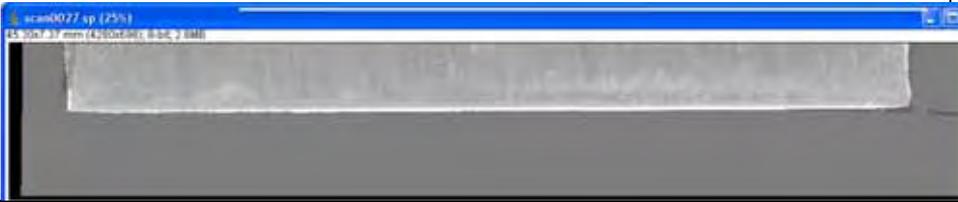
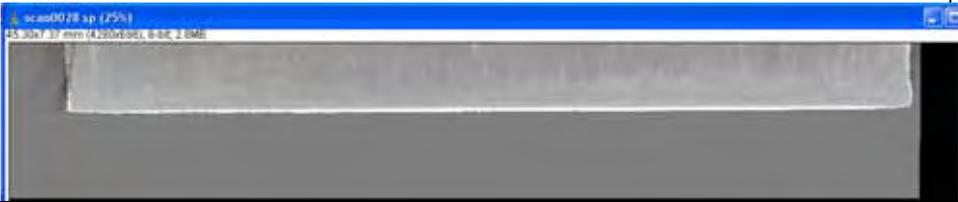
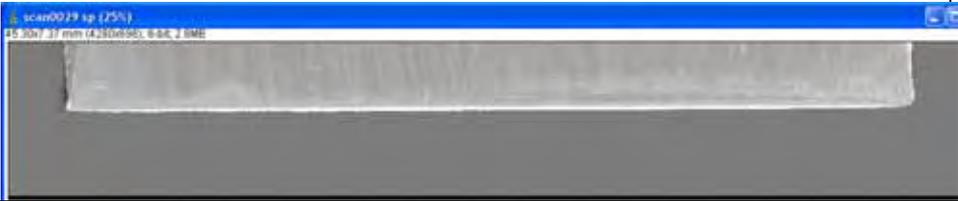
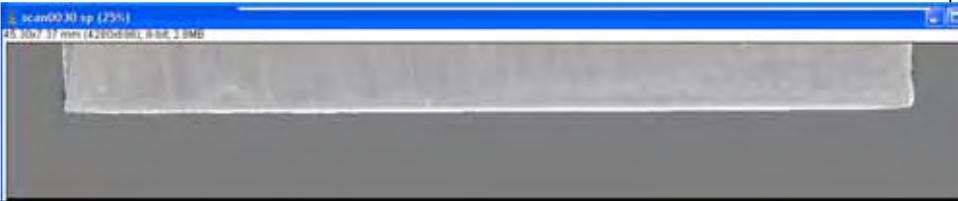
Material Usinado	Material da ferramenta	
Eucalyptus Grandis	Aço Rápido	
Metros lineares	Imagem	Area (mm ²)
920		Total Area: 4.712 mm ²
960		Total Area: 5.160 mm ²
1000		Total Area: 5.484 mm ²
1040		Total Area: 5.369 mm ²
1080		Total Area: 5.400 mm ²
1120		Total Area: 5.658 mm ²

Tabela 1 - Resultado da experimentação de desgaste-cont

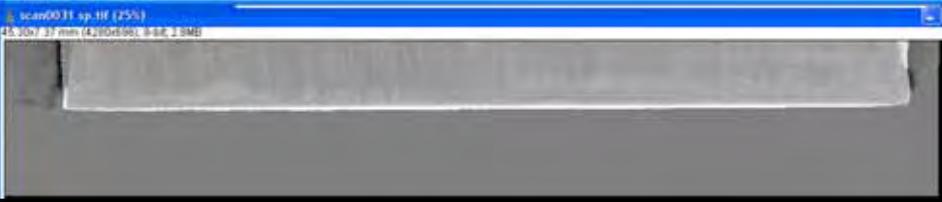
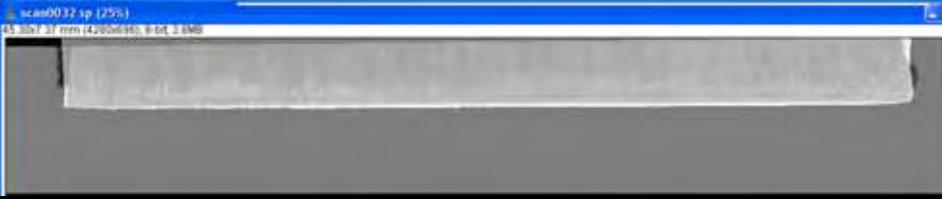
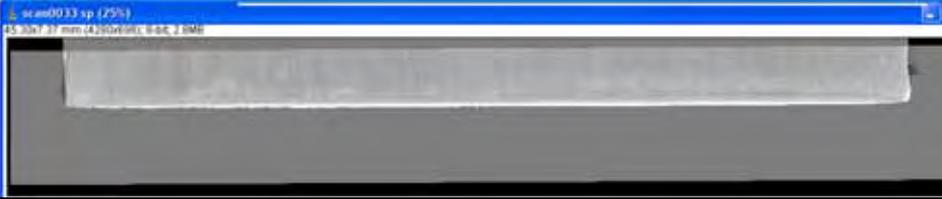
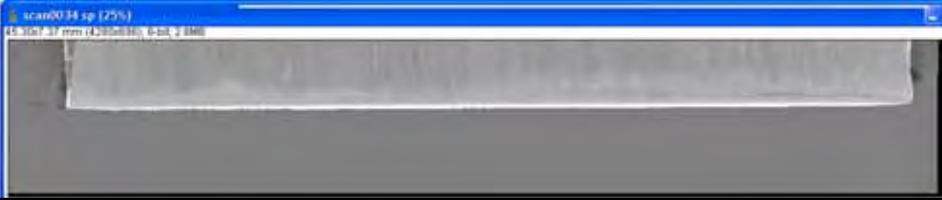
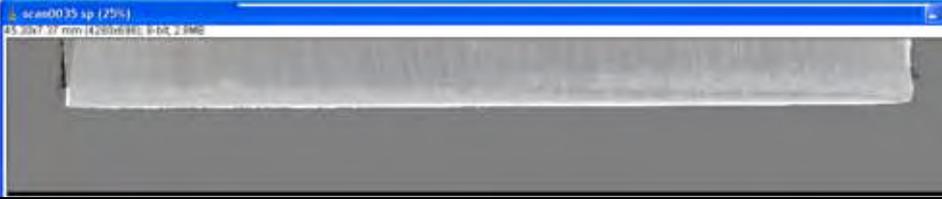
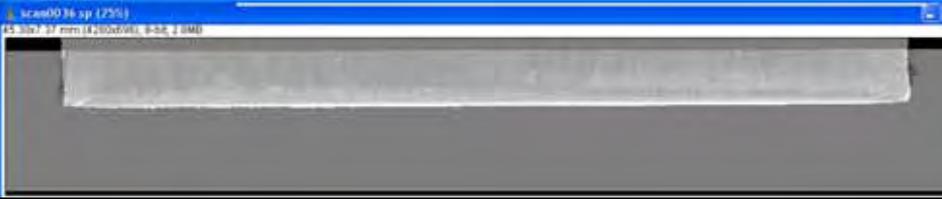
Material Usinado	Material da ferramenta	
Eucalyptus Grandis	Aço Rápido	
Metros lineares	Imagem	Area (mm ²)
1160		Total Area: 5.847 mm ²
1200		Total Area: 6.085 mm ²
1240		Total Area: 6.097 mm ²
1280		Total Area: 6.162 mm ²
1320		Total Area: 6.260 mm ²
1360		Total Area: 6.357 mm ²

Tabela 1 - Resultado da experimentação de desgaste-cont

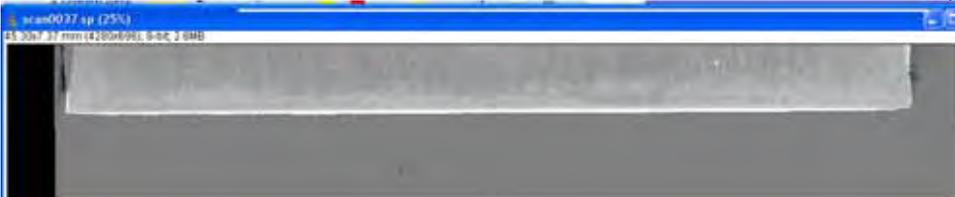
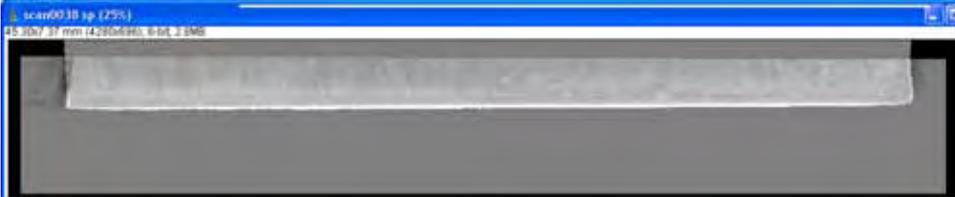
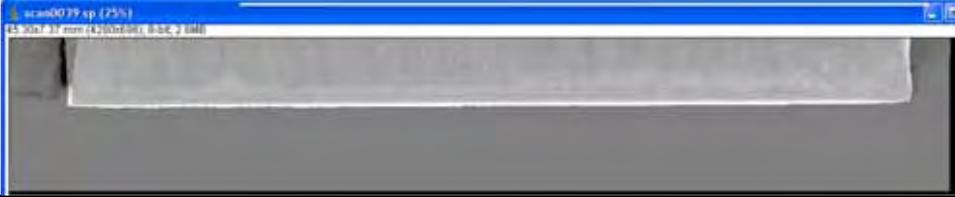
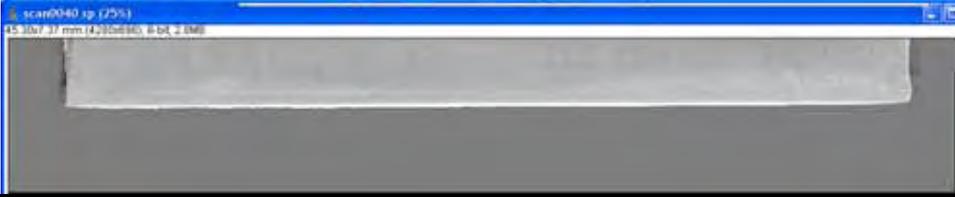
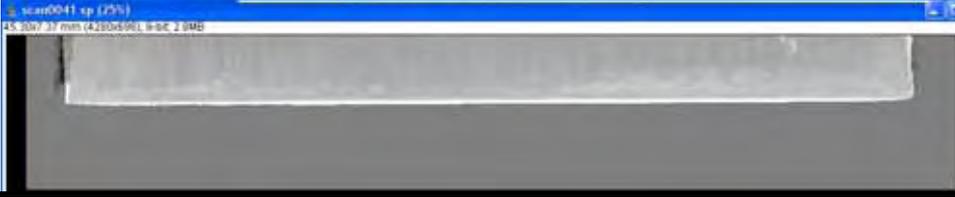
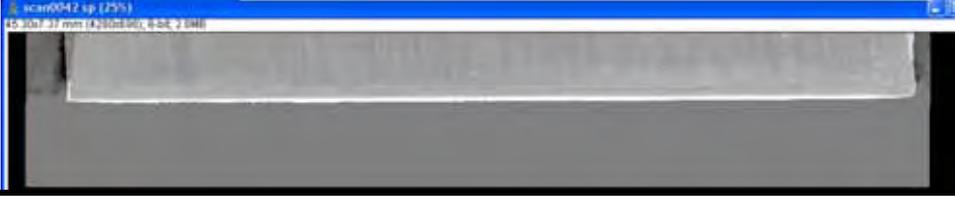
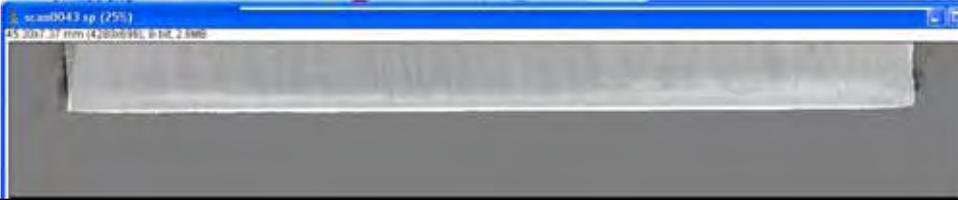
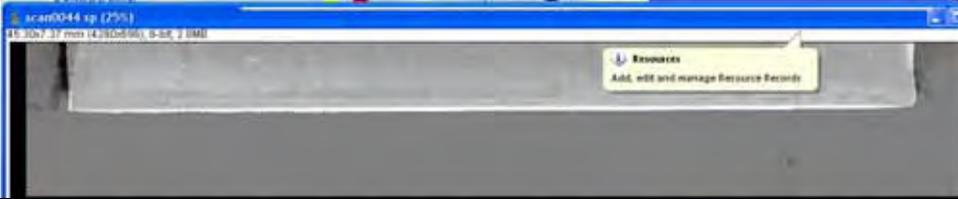
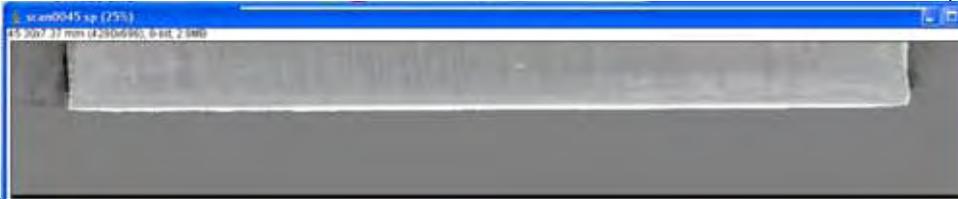
Material Usinado	Material da ferramenta	
Eucalyptus Grandis	Aço Rápido	
Metros lineares	Imagem	Area (mm ²)
1400		Total Area: 6.338 mm ²
1440		Total Area: 6.444 mm ²
1480		Total Area: 6.185 mm ²
1520		Total Area: 6.632 mm ²
1560		Total Area: 6.855 mm ²
1600		Total Area: 6.553 mm ²

Tabela 1 - Resultado da experimentação de desgaste-cont

Material Usinado	Material da ferramenta	
Eucalyptus Grandis	Aço Rápido	
Metros lineares	Imagem	Area (mm ²)
1640		Total Area: 6.519 mm ²
1680		Total Area: 6.858 mm ²
1720		Total Area: 6.902 mm ²
1760		Total Area: 7.058 mm ²

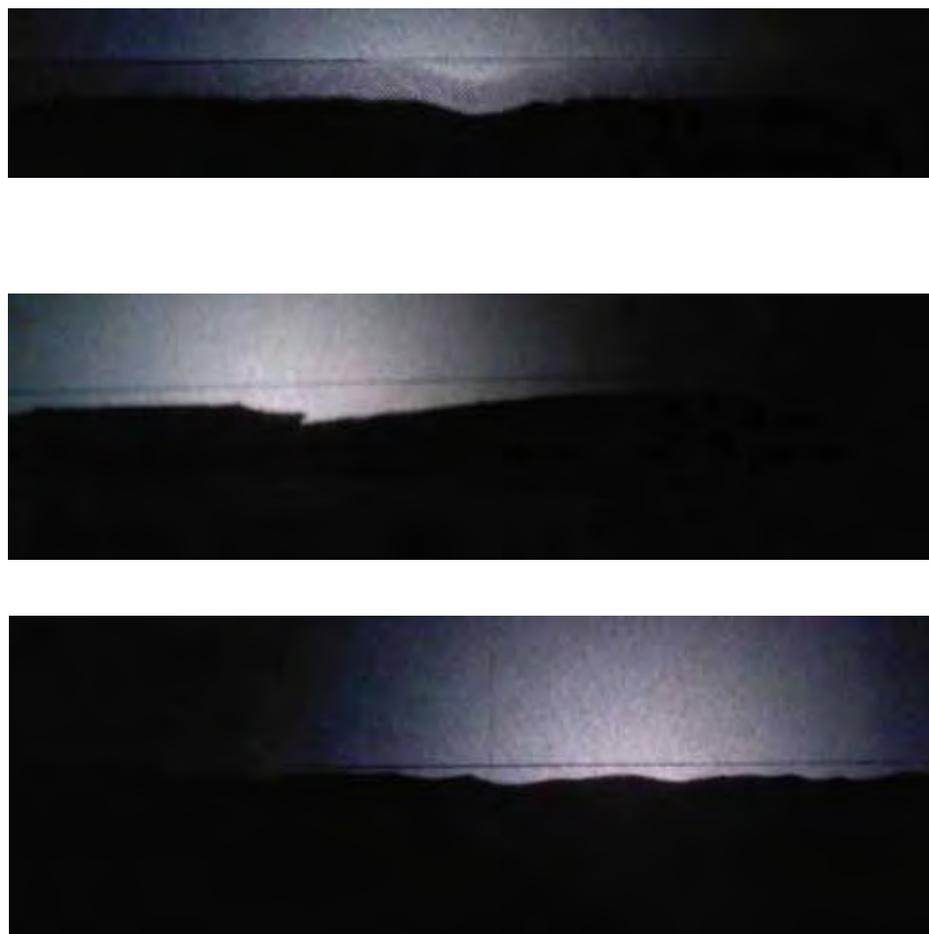


Figura 1 - Sobreposição do acetato com a impressão da imagem de uma ferramenta ampliada 10x, no visor do projetor de perfil com a mesma ferramenta sendo exibida com ampliação de 10x.