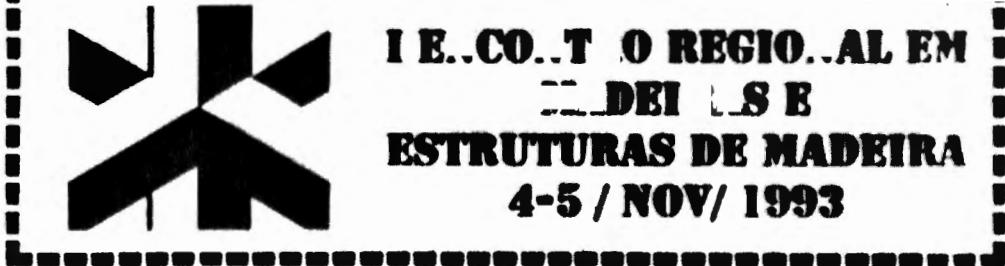


I ENCONTRO REGIO..AL EM  
MADEIRAS E  
ESTRUTURAS DE MADEIRA  
4-5 / NOV/ 1993

ANAIS

V. I





I E..CO..T O REGIO..AL EM  
DEI LS E  
**ESTRUTURAS DE MADEIRA**  
**4-5 / NOV/ 1993**

**PROMOÇÃO:**

EPUSP/PEF - Depto. de Engenharia de Estruturas  
e Fundações da Escola Politécnica da USP  
IBRAMEM - Instituto Brasileiro da Madeira  
e das Estruturas de Madeira

**COMISSÃO TÉCNICA:**

Akemi Ino  
Almir Sales  
Carlito Calli Júnior  
Francisco Antônio Rocco Lahr  
Mauro Augusto Demarzo  
Osmar Barros Júnior  
Pedro Afonso de Oliveira Almeida  
Péricles Brasiliense Fusco

**ORGANIZAÇÃO:**

Coordenação de Eventos da Escola Politécnica da USP



Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves \*  
Rosaldo Tiago Ruffino \*\* 030.600

## RESUMO

O presente trabalho, objetiva o desenvolvimento de uma nova técnica de medição das forças de corte na usinagem da madeira. Para tanto apresenta-se o projeto de um equipamento de medição e sua calibração, a instrumentação do processo e o sistema de aquisição de dados empregado.

A adequação social deste trabalho é no sentido de que se possa futuramente, otimizar os processos de usinagem da madeira existente, além de racionalizar o emprego da madeira como matéria prima para bens de consumo.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Aspécitos Gerais

Segundo os estudos que vem sendo desenvolvidos por pesquisadores desde 1950, pode-se constatar que o processo de usinagem da madeira apresenta as seguintes variáveis importantes para sua eficiência: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte ou espessura de corte, geometria da ferramenta, material da ferramenta, agudeza da cunha cortante da ferramenta, características anatômicas da madeira, densidade e teor de umidade da madeira, direcionamento das fibras da madeira em relação à direção de corte e de penetração da ferramenta, e propriedades de resistência mecânica da madeira.

A interação desses parâmetros é de extrema importância para se conferir um bom desempenho de corte, tal como o contrário sobre o desgaste das ferramentas de corte e sobre o acabamento superficial da peça de madeira.

\* Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Tecnologia - UNESP/BAURU

\*\* Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

0867107

Para que os diversos processos de usinagem da madeira possam ser otimizados, faz-se necessário conhecer a influência de cada parâmetro sobre a eficiência de corte, esta por sua vez pode ser representada pela potência de corte necessária à obtenção da maior taxa de remoção do cavaco, sem afetar o acabamento superficial desejado à peça e sem que seja acelerado o desgaste da ferramenta de corte.

A potência de corte necessária nos processos de usinagem, pode ser calculada através do valor da força principal de corte, para um dado valor da velocidade de corte. Além de que, através dos valores da força principal de corte, pode-se determinar a pressão específica de corte das espécies de madeira, para vários teores de umidade e direcionamento das fibras em relação a direção de corte.

Nesse sentido, uma elevada quantidade de ensaios de medição da força de corte devem ser promovidos. A cada ensaio em condições pré-fixadas, um grande número de valores devem ser anotados, visando uma análise estatística dos dados e maior confiabilidade aos resultados de ensaio.

## 2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem por objetivo geral, fornecer subsídios para que se possa explicar cientificamente as grandezas relacionadas com a usinagem da madeira.

Especificamente, objetiva-se desenvolver uma metodologia inovadora para medir os esforços de usinagem no corte ortogonal da madeira, para tanto, será necessário projetar, construir e calibrar um equipamento de ensaio específico para este fim. Para atender o referido objetivo, o método deverá ser preciso, com rapidez na aquisição de dados, além de anotar um número elevado de pontos por ensaio, registrando valores reais da força de corte média e da força de corte de maior incidência a cada ensaio.

## 3. MATERIAL

### 3.1. Projeto da Máquina de Ensaio

#### 3.1.1. Técnicas do Projeto

Em função da proposta de se estudar a interação dos parâmetros na usinagem da madeira e de fornecer subsídios para realizar os experimentos inerentes ao objetivo deste trabalho, tornou-se necessário projetar e confeccionar um banco de ensaio, apropriado a realizar medições dos esforços de usinagem, o qual possua uma boa flexibilidade para sofrer alterações dos parâmetros que interferem no processo de usinagem. Para tanto, optou-se em estudar uma técnica de projeto para construção de uma máquina de ensaio, onde desenvolveu-se os seguintes itens: Necessidade do Usuário; Análise de Alternativas (especificação preliminar) e Parâmetros de

especificação das partes que compõem a máquina de ensaio.

Após concluída a montagem da máquina, algumas modificações foram efetuadas para minimizar ou neutralizar totalmente os efeitos dinâmicos de vibrações localizadas, somente detectados durante alguns testes preliminares.

### 3.2. Projeto do Dinamômetro

#### 3.2.1. Dimensionamento

O dinamômetro projetado, confeccionado e calibrado para medir os esforços durante a usinagem da madeira (Figura 3.1), consta essencialmente de um suporte porta-ferramenta confeccionado em aço ABNT 4340. A montagem do dinamômetro na máquina de ensaio se dá através de um dispositivo de fixação.

O suporte apresenta um sistema de fixação da ferramenta de corte e uma haste com seção reduzida (célula de carga), a qual foi dimensionada para receber dois circuitos em ponte completa com o emprego de extensômetros elétricos.

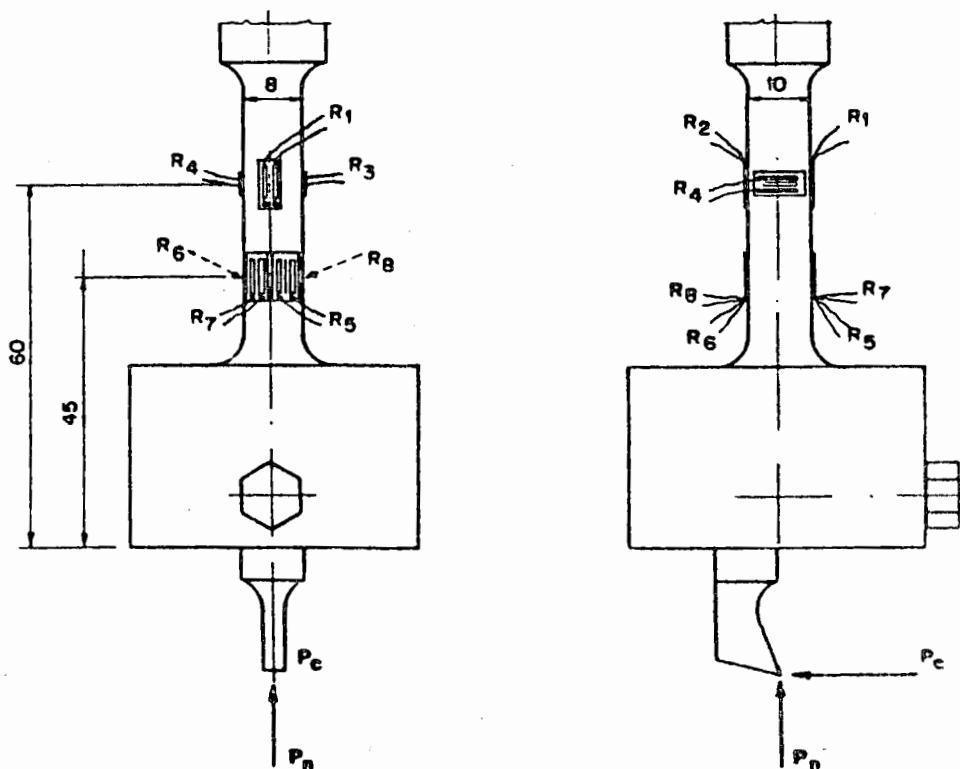


Figura 3.1 - Dinamômetro resistivo, dimensionado para medir esforços de corte na usinagem da madeira.

Após estudos preliminares, optou-se em projetar um dinamômetro

para as seguintes capacidades de carga:

- força principal de corte  $P_c = 80 \text{ daN}$ ;
- força normal à direção de corte  $P_n = 10 \text{ daN}$ .

Para o dimensionamento do dinamômetro, atentou-se para os seguintes requisitos:

- obter máxima sensibilidade em se mantendo uma elevada rigidez;
- tensões inferiores ao limite de proporcionalidade do material utilizado;
- deformações dos extensômetros inferiores às máximas permissíveis.

Do dimensionamento, obteve-se os seguintes resultados:

- sensibilidade do dinamômetro:
  - quanto a força principal de corte,  $S_c = 95,18 \text{ daN} \cdot \mu/\text{m}$ ;
  - quanto a força normal, .....  $S_n = 3,2 \text{ daN} \cdot \mu/$ .
- faixa de leitura confiável:  $0,011 \text{ daN} \leq P_c \leq 58,15 \text{ daN}$ ;  
 $0,313 \text{ daN} \leq P_n \leq 10,00 \text{ daN}$ .
- dimensões principais da célula de carga:  $B = 8\text{mm}$ ;  $H = 10\text{mm}$  e  $L = 65\text{mm}$ .

### 3.2.2. Calibração do Dinamômetro

Dadas as simplificações realizadas no projeto do dinamômetro bem como a adoção de valores tabelados de alguns parâmetros de dimensionamento, tornou-se evidente a necessidade de calibrações cuidadosas do instrumento para se conhecer o desempenho real e as características metrológicas do instrumento de medição dos esforços de usinagem, através desta determinação precisa é que se estabelecerá confiabilidade as medições.

Torna também evidente que se proceda as calibrações em situações próximas das reais, quando do emprego do dinamômetro nos ensaios. Para tanto, optou-se em realizar alguns experimentos de verificação do dimensionamento do dinamômetro - "Calibração Estática", para posteriormente efetuar a calibração dinâmica do instrumento, o qual foi posicionado na máquina de ensaio e solicitado a esforços dinâmicos.

#### a) Calibração Estática

Para se determinar as curvas de correspondência entre o carregamento e a diferença de potencial ou deformação, dois procedimentos foram adotados, são eles:

- carregar o dinamômetro com cargas aferidas, em esforços de flexão e de compressão, isoladamente, medindo-se as diferenças de potencial em ponte amplificadora;
- o mesmo carregamento, porém com os circuitos elétricos, ligados a um sistema de aquisição de dados para medir as diferenças de potencial e as deformações resultantes.

Os seguintes resultados foram obtidos nos ensaios de calibração estática, através do sistema de aquisição de dados:

- ensaios de flexão ( $P_c$ )

equação da reta:  $\sigma_r = 3,8944 + 28,883 \cdot P_n$   
coeficiente de correlação: 1,0000  
ensaio de compressão (Pn)  
equação da reta:  $\epsilon_c = -0,87744 + 1.4471 \cdot P_n$   
coeficiente de correlação: 0,9857

### b) Calibração Dinâmica

Para realizar a calibração dinâmica do dinamômetro, adotou-se o método de determinação da resposta em frequência para ensaio onde o dinamômetro sofreu um carregamento inicial através de um excitador. Adotou-se para o carregamento inicial, uma carga estática com valor conhecido do ensaio de calibração estática. A esta carga, relacionou-se a correspondência da tensão de entrada da ponte amplificadora e do osciloscópio, para uma amplitude fixa do gerador de sinais senoidal. O dinamômetro foi posicionado na máquina de ensaio, de forma a proceder a calibração em condições próximas as de uso do mesmo quando da realização de ensaios de usinagem.

Dada a elevada rigidez obtida na máquina de ensaio, pode-se considerar toda a estrutura da máquina como elementos de amortecimento, portanto, influindo no sistema de medição apenas de forma a limitar a amplitude de oscilação em estados de ressonância, os quais este sistema viesse a atingir. A Figura 3.2 apresenta o esquema de montagem da instrumentação utilizada na calibração dinâmica do dinamômetro.

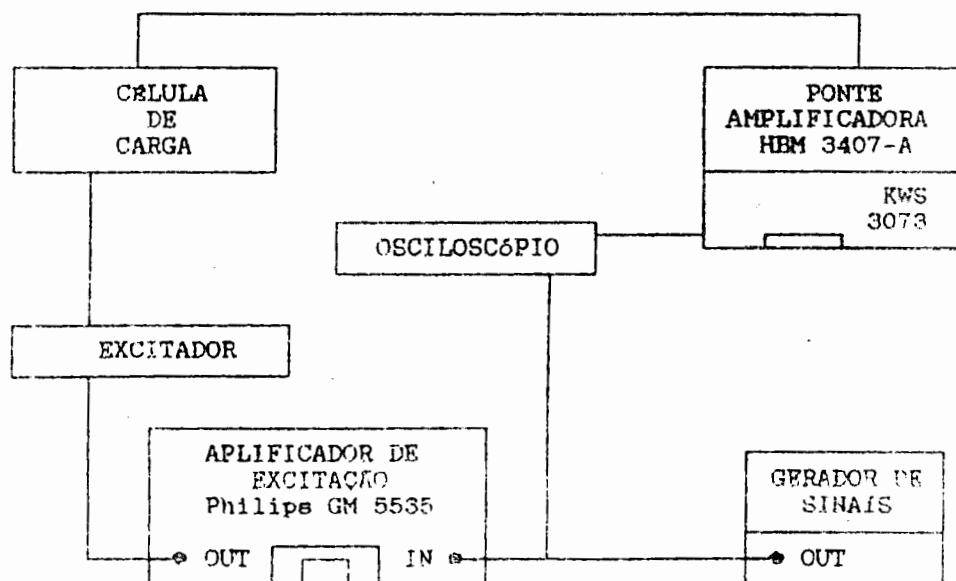


Figura 3.2 - Instrumentação empregada no ensaio de calibração dinâmica.

### 3.3.1. Dimensões e Características dos Corpos de Prova

- dimensões: comprimento 200 mm; largura 140 mm e espessura 37 mm.
- teor de umidade: seca ao ar (umidade de equilíbrio).
- peças retiradas da região de cerne e isenta de anomalias.
- 9 (nove) espécies.

São listadas a seguir as espécies de madeira escolhidas para este estudo, bem como a densidade aparente ( $\rho$ ) determinada em laboratório e o teor de umidade médio a base úmida ( $U_{\text{m}}$ ), medido anteriormente a cada ensaio, são elas:

Pinus - Nome Científico: *Pinus elliotti*

$$\rho = 0,32 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 13,0\%$$

Pinho - Nome Científico: *Araucaria angustifolia*

$$\rho = 0,60 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 11,9\%$$

Cedro - Nome Científico: *Cedrela fissilis*

$$\rho = 0,48 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 14,6\%$$

Castanheira - Nome Científico: *Bertholletia excelsa*

$$\rho = 0,77 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 11,1\%$$

Peroba Rosa - Nome Científico: *Aspidosperma polyneuron*

$$\rho = 0,98 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 18,2\%$$

Imbuia - Nome Científico: *Ocotea porosa*

$$\rho = 0,61 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 9,5\%$$

Ipê - Nome Científico: *Tabebuia serratifolia*

$$\rho = 1,19 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 10,8\%$$

Macaranduba - Nome Científico: *Manilkara elata*

$$\rho = 1,12 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 9,5\%$$

Angico Preto - Nome Científico: *Anadenanthera macrocarpa*

$$\rho = 1,15 \text{ g/cm}^3, U_{\text{m}} = 21,5\%$$

### 3.3.2. Direcionamento das Fibras da Madeira

Para este estudo, adotou-se as direções 90-0 e 0-90, ou seja, um corte paralelo às fibras e outro perpendicular às fibras. A escolha justifica-se pelo fato de que o corte perpendicular às fibras na direção 90-90, quase que inexiste nos procedimentos usuais de usinagem da madeira.

As combinações adotadas, foram:

Ensaio A - Corte ortogonal paralelo às fibras na direção axial e penetração da ferramenta na direção radial ou tangencial (direção 90-0, combinações  $Z \pm R \pm$  e  $Z \pm \theta$ ).

Ensaio B - Corte ortogonal perpendicular às fibras na direção tangencial com penetração radial ou na direção radial com penetração tangencial (direção 0-90, combinações  $\theta R \pm$  e  $R \pm \theta$ ).

### 3.4. Condições de Usinagem, Grandezas de Corte e Ferramenta de Corte

Como o objetivo deste trabalho, visa desenvolver somente a

tecnologia de instrumentação e de medição dos esforços de corte na usinagem da madeira, neste estudo, optou-se por fixar alguns parâmetros de corte, são eles:

- velocidade de corte = 6,6 m/min;
- profundidade de corte = 0,1 a 1,0 mm;
- largura de corte = 3,2 mm;
- material da ferramenta = aço rápido (18% W, 4% Cr, 1% V e 10% Co);
- ângulo de saída da ferramenta = 30°;
- ângulo de folga da ferramenta = 20°.

### 3.5. Sistemas de Controle

Dada a necessidade de se definir as condições de ensaio, tais como o teor de umidade das amostras, a espessura de corte e a densidade das espécies de madeira ensaiada, os seguintes equipamentos foram empregados: estufa de secagem, medidor de umidade, balança eletrônica digital, micrômetros e paquímetro eletrônico digital.

### 3.6. Instrumentação do Ensaio

Após efetuada as calibrações do dinamômetro, alguns ensaios preliminares de usinagem foram realizados, estes foram instrumentados com ponte amplificadora e osciloscópio de memória para identificação dos sinais característicos de comportamento da variação da força principal de corte e da força normal. Nesses ensaios constatou-se que a força normal, conforme se esperava, apresentou-se inexpressiva em relação à força principal de corte, além de variar de sinal, ora com valores positivos, ora negativos.

A partir das observações citadas, concordantes com os resultados obtidos por outros pesquisadores, optou-se em analisar no presente estudo, somente o comportamento da força principal de corte. A análise da força normal será de grande validade em estudos posteriores, onde se pretenda identificar sua influência em relação a outros parâmetros, tais como: desgaste da ferramenta de corte, acabamento superficial da peça usinada, etc.

Definido exatamente o tipo de ensaio a ser realizado, seguiram-se os trabalhos de instrumentação do ensaio.

a) Montagem da instrumentação com a seguinte configuração:

- ponte amplificadora;
- placa de inter-face para aquisição de dados;
- microcomputador AT-286 e
- impressora.

b) Calibração da placa de inter-face.

Para o cálculo da reta dos mínimos quadrados, através da equação:  $y = A_0 + A_1 \cdot x$ , forneceu-se os valores de  $y$  em Volts e de  $x$  em bits dos 56 pontos registrados, obtendo-se os seguintes valores para os parâmetros da equação e para a análise estatística da calibração:

- $A_0 = 0,000368$
- $A_1 = 0,000710$
- erro padrão de estimativa,  $S_{yx} = 0,000680$
- coeficiente de correlação,  $r = 1,00000$
- resolução =  $7,08 \cdot 10^{-6}$  mv
- erro de medição = 0,02 % (VFE)

A placa de inter-face foi projetada para adquirir aproximadamente 945.000 pontos durante os 35 segundos necessários a cada ensaio, além de filtrar os sinais de ruído.

#### 4. Métodos

##### 4.1. Aquisição dos Dados de Ensaio

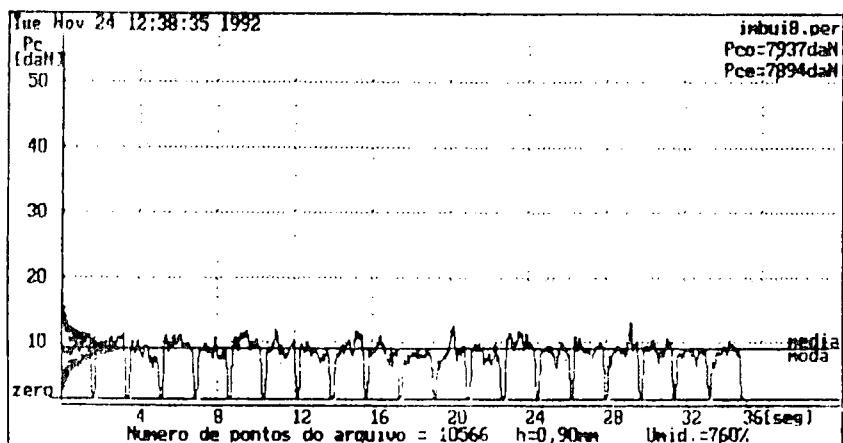
Utilizando a Linguagem C de programação, desenvolveu-se um software de aquisição e um software de análise de dados para o ensaio de usinagem da madeira. A seguinte equação foi considerada para o programa de análise dos dados:

$$P_c = 0,0139242 \cdot |B_{its} - B_{its_i}|$$

Onde:  $B_{its}$  = Leitura em bits do programa de aquisição, dos pontos em que a célula encontra-se deformada.

$B_{its_i}$  = Leitura em bits do programa da aquisição, do ponto em que a célula encontra-se indeformada.

Logo, a equação acima define a transformação dos resultados adquiridos em bits do programa de aquisição para os valores resgatados em unidade de força pelo programa de análise dos dados. A Figura 4.1 exemplifica o gráfico registrado em impressora através do programa de análise de dados.



O gráfico da Figura 4.1, apresenta:

- as curvas da variação da força principal de corte em função do tempo, para 20 amostras de madeira usinadas a cada ensaio;
- a curva registrada na ordenada do gráfico, através de pontos que indicam o valor da força principal de corte ( $P_c$ );
- as retas que indicam o valor da força principal de corte média " $P_{c\bar{o}}$ " e o valor da força principal de corte de maior incidência durante o ensaio " $P_{co}$ " (representada pela moda);
- na parte superior, os valores de  $P_{c\bar{o}}$ ,  $P_{co}$  e o nome do subprograma de registro do ensaio. Este último representa: a espécie da madeira ensaiada, o número do ensaio e a direção de fibras das amostras;
- na parte inferior, os valores previamente medidos da espessura de corte e do teor de umidade médio das amostras, além da notação do número de pontos registrados durante o ensaio.

#### 4.2. Procedimentos de Ensaio

Para testar a instrumentação e o sistema de medição proposto neste trabalho, quatro séries de ensaio foram desenvolvidas, são elas:

Série 1: Nove espécies de madeira foram ensaiadas no corte 90-0 para espessuras de corte de 0,3; 0,6 e 0,9 mm.

Série 2: Ensaio com espécies de imbuia e pinho na direção perpendicular às fibras 0-90 para as mesmas espessuras de corte adotadas na primeira série.

Série 3: Nesta série, estabeleceu-se a variação da velocidade de corte na direção 90-0 para o corte de imbuia. As velocidades empregadas foram 0,16; 0,24 e 0,31 m/s para espessuras de corte de 0,2; 0,4 e 0,6 mm a cada velocidade.

Série 4: Ensaioando-se imbuia na direção 90-0, variou-se a espessura de corte de 0,1 a 0,9 mm a cada 0,1mm, empregando a mesma velocidade adotada na série 1 e 2 . 0,11 m/s.

De acordo com cada série de ensaios, pode-se apresentar na forma de gráficos a variação da força principal de corte em relação aos parâmetros que se quer analisar.

#### 5. CONCLUSÕES

Conhecendo-se os processos de usinagem, bem como as características e propriedades da madeira, pode-se, através da análise dos resultados de ensaio, obtidos pelo equipamento e método de medição proposto, explicar cientificamente as grandezas relacionadas com a usinagem da madeira. Portanto, conclui-se que o equipamento e a metodologia empregada para medição dos esforços de corte, mostraram-se suficientemente adequados a este propósito.

Conforme objetivou-se de forma específica, foi proposto desenvolver uma metodologia inovadora para medir os esforços de usinagem no corte ortogonal da madeira. Pode-se concluir que este objetivo foi atingido com sucesso, visto que todas as

etapas necessárias à conclusão deste trabalho foram executadas de forma criteriosa e sequenciada, obedecendo à normas e procedimentos técnicos. Vale ressaltar que o método de aquisição proposto é inédito em todo o mundo, além de que apresentou-se preciso, rápido e eficiente, registrando uma quantidade de informações em função do tempo jamais obtida em experimentos de usinagem da madeira.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, um grande desenvolvimento tecnológico nesta área poderá ser promovido, favorecendo as indústrias de transformação da madeira bem como os fabricantes de máquinas e ferramentas para processar madeira, proporcionando a estes, parâmetros de otimização dos processos produtivos em madeira e critérios que venham a favorecer um emprego mais racional da madeira como matéria prima.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Para a elaboração deste trabalho, desenvolveu-se uma exaustiva pesquisa bibliográfica de publicações dos pesquisadores que contribuiram para o estudo das forças de corte e potência de corte na usinagem da madeira. Especificamente, 39 trabalhos publicados no período de 1952 a 1991, foram revisados para levantamento das técnicas e métodos de medição que até esta data haviam sido desenvolvidos. A relação destes trabalhos pode ser vista na bibliografia referenciada do exemplar completo deste trabalho, que aqui não foi citada devido ao número máximo de páginas estipulado pela comissão do evento.

Além das referências bibliográficas específicas sobre o estudo da força e potência de corte, as seguintes obras foram consultadas para elaboração deste trabalho:

- (01) CALIL JR., C. Análise experimental de materiais e de estruturas. São Carlos, LaMEM-EESC-USP, 1988. 116p.
- (02) CENTRO REGIONAL DE TECNOLOGIA EM INFORMATICA - Análise experimental de tensões. Santa Catarina, (Curso) CERTI, Junho de 1989. 106p.
- (03) FERRARESI, D. Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo. Edgard Blucher Ltda, 1977. 751p.
- (04) GONÇALVES, M.T.T. Contribuição para o estudo da usinagem de madeiras. São Carlos, 1990, 241p. Dissertação (Mestre -Engenharia Mecânica) Escola de Engenharia de São Carlos - USP.
- (05) KOCH, F. Wood machining process. New York, Ronald Press Company, 1964. 530p.
- (06) KOLMANN, F.F.P.; COTÉ, W.A.J. Principles of wood science and technology. New York, 1984. v. I, 592p.
- (07) MABIE, H.H.; OCVIRK, F.W. Dinâmica das máquinas. Livros Técnicos e Científicos. Editra S.A., Rio de Janeiro 1980. 579p.
- (08) NIEMANN, G. Elementos de máquinas. Edgard Blucher Ltda.

- (09) OLIVEIRA, J.F.G. de Comportamento estático e dinâmico de máquinas ferramentas. EESC-USP-LAMAFE, São Carlos, SP. Trabalho apresentado em Disciplina de Pós-Graduação, Janeiro de 1988. 43p.
- (10) RUFFINO, R.T. Fundamentos do projeto de máquinas ferramentas para usinagem dos metais. Curso de máquinas operatrizes de usinagem, Fascículos I, II e III. Texto de F. KOEGNISBERGER. Tradução R.T. Ruffino. São Carlos, SP., 1981, 44p.
- (11) SIQUEIRA, M.L. Contribuição para a instrumentação da máquina de medir tenacidade/impacto da madeira. São Carlos, 1990, 167p. Tese (Doutorado - Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos - USP.