

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA EMISSÃO ACÚSTICA NA USINAGEM DA MADEIRA



Eng° IVALDO DE DOMENICO VALARELLI

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Titular Rosalvo Tiago Ruffino

São Carlos - 1999



Class.	TESE-EESC
Curr.	6324i
Tombo	174 99

311 0000 5119

S/S 1053342

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

V137*i* Valarelli, Ivaldo De Domenico
Introdução ao estudo da emissão acústica na
usinagem da madeira / Ivaldo De Domenico Valarelli.
-- São Carlos, 1999.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Rosalvo Tiago Ruffino.

1. Usinagem da madeira. 2. Força de corte.
3. Emissão acústica. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **IVALDO DE DOMENICO VALARELLI**

Tese defendida e aprovada em 13.08.1999
pela Comissão Julgadora:



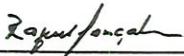
Prof. Titular **ROSALVO TIAGO RUFFINO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



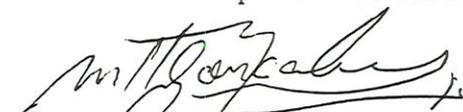
Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **CARLITO CALIL JUNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutora **RAQUEL GONÇALVES**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



Prof. Doutor **MARCOS TADEU TIBURCIO GONÇALVES**
(UNESP - Campus de Bauru)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



Prof. Associado **RENATO VAIRO BELHOT**
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação
em exercício

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
À minha esposa Eliane, que sempre se
fez presente em minha vida.
Aos meus filhos Tiago e Talissa.
Aos meus pais (in memorium)

AGRADECIMENTOS

Ao professor Rosalvo Tiago Ruffino, pela orientação, amizade, paciência e confiança no meu trabalho.

Aos professores Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, Luiz Eduardo de Angelo Sanchez e ao auxiliar acadêmico Ulisses Frazão de Oliveira Tiburcio pela atenção, dedicação e amizade acima de tudo.

Aos professores Rene Pegoraro e Humberto Ferasoli pelo desenvolvimento do programa e placa de interface de aquisição do sinal de emissão acústica.

Ao Sr. Milton Moggione, técnico de laboratório, pelo auxílio prestado durante a realização dos ensaios.

Ao Sr. José Ricardo C. Silva pelo auxílio na digitação desta tese.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica - FE - UNESP, que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse possível.

Aos professores e funcionários do LaMEM - EESC - USP, pelo apoio e colaboração.

A Sra. Elena Luzia Palloni Gonçalves, bibliotecária da Escola de Engenharia de São Carlos, pelo auxílio prestado.

Aos funcionários do Laboratório de Dinâmica - EESC - USP, pela presteza na construção e calibração da célula de carga.

A empresa SENSIS São Carlos Industria e Comércio de Equipamentos Eletrônicos pelo empréstimo do equipamento de emissão acústica.

A CAPES, pela concessão de bolsa de deslocamento.

MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

Dedicatória.....	i
Agradecimentos.....	ii
Sumário.....	iv
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas.....	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xii
Lista de Símbolos.....	xiii
Resumo.....	xiv
Abstract.....	xv
1 - Introdução.....	1
1.1 - Objetivo.....	1
1.2 - Justificativas.....	1
2 - Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 - Teoria da usinagem da madeira para o corte ortogonal.....	4
2.1.1 - Sistemas de corte e mecanismo de formação do cavaco.....	4
2.1.1.1 - Corte paralelo às fibras: direção 90-0.....	7
2.1.1.2 - Corte perpendicular às fibras: direção 0-90.....	17
2.1.1.3 - Corte perpendicular às fibras: direção 90-90.....	17
2.1.2 - Fatores que afetam a força de corte.....	21
2.1.2.1 - Fatores relativos à ferramenta de corte.....	25
2.1.2.2 - Fatores relativos às condições de usinagem.....	34
2.1.2.3 - Fatores relativos às características da madeira.....	39
2.2 - Trabalhos relativos a força de corte na usinagem da madeira.....	48

2.3	- Emissão acústica.....	56
2.3.1	- Conceituação.....	56
2.3.2	- Uso geral de emissão acústica.....	60
2.3.3	- Emissão acústica e desgaste da ferramenta de corte.....	61
2.3.4	- Emissão acústica no processo de usinagem.....	64
2.3.5	- Monitoramento de emissão acústica.....	72
2.4	- Aspectos conclusivos da revisão bibliográfica.....	79
3	- Material e Métodos.....	81
3.1	- Ferramenta monocortante para ensaio de corte.....	81
3.2	- Célula de carga.....	83
3.2.1	- Calibração estática do dinamômetro.....	85
3.3	- Equipamento de ensaio de usinagem.....	89
3.4	- Equipamento de medição da força de corte.....	90
3.5	- Equipamento de medição do sinal de emissão acústica.....	92
3.6	- Corpos de prova.....	95
3.6.1	- Seleção do material.....	95
3.6.2	- Dimensões das amostras.....	96
3.6.3	- Preparação das amostras.....	96
3.6.4	- Determinação do teor de umidade e da densidade...	98
4	- Apresentação e Discussão dos Resultados.....	102
4.1	- Análise da variação da força de corte.....	108
4.2	- Análise do tipo de cavaco.....	110
4.3	- Análise dos sinais de emissão acústica.....	111
5	- Conclusão.....	115
6	- Bibliografia.....	118
	- Anexos	

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** - Sistemas de corte na seção transversal da madeira.(Hoadley apud Neri, 1998).
- Figura 2.2** - Direções combinadas de corte e penetração nas seções de uma amostra de madeira. (Doi & Yokoyama, 1975).
- Figura 2.3** - Geometria da cunha de corte conforme Norma ABNT 6163 (1989).
- Figura 2.4** - Relações geométricas para o corte ortogonal (Ferraresi, 1970).
- Figura 2.5** - Formação do cavaco Tipo I. Madeira – Imbuia, com teor de umidade de 12%. Ferramenta de corte em aço rápido, com ângulo de saída de 12° e espessura do cavaco de 1,5 mm (Gonçalves, 1989).
- Figura 2.6** - Formação do cavaco Tipo I com extensão da fenda para o interior da peça (Franz apud Koch, 1964).
- Figura 2.7** - Formação do cavaco Tipo II usinando-se castanheira com 18% de umidade, ângulo de saída de 30° e espessura de corte de 1,5 mm (Gonçalves, 1989).
- Figura 2.8** - Acabamento superficial na formação dos cavacos: Tipo I mostrado na região superior e Tipo II mostrado na região inferior (Gonçalves, 1989).
- Figura 2.9** - Formação do cavaco Tipo III, usinando-se castanheira com teor de umidade de 18%. Ferramenta de corte em aço rápido, com ângulo de saída de 5° e espessura do cavaco de 1,5 mm (Gonçalves, 1989).
- Figura 2.10** - Acabamento superficial obtido na formação do cavaco Tipo III (Gonçalves, 1990).
- Figura 2.11** - Falha do cavaco Tipo I (a) (McKenzie apud Koch, 1964).

- Figura 2.12** - Falha do cavado Tipo I (b) (McKenzie apud Koch, 1964).
- Figura 2.13** - Falha do cavaco Tipo II (a) (McKenzie apud Koch, 1964).
- Figura 2.14** - Falha do cavaco Tipo II (b) (McKenzie apud Koch, 1964).
- Figura 2.15** - Modelo representativo das componentes de força de corte normal e paralela para cada um dos três tipos de formação de cavaco (Franz apud Koch, 1964).
- Figura 2.16** - Efeito do ângulo de saída sobre a força de corte paralela às fibras da madeira (Koch, 1964).
- Figura 2.17** - Efeito do ângulo de saída sobre a força de corte normal às fibras da madeira (adaptado de Koch, 1964).
- Figura 2.18** - Efeito do ângulo de folga sobre a força de corte paralela exercida na ferramenta (adaptado de Koch, 1964).
- Figura 2.19** - Efeito do ângulo de folga sobre a força de corte normal exercida na ferramenta (adaptado de Koch, 1964).
- Figura 2.20** - Efeitos do ângulo de inclinação na força de corte paralela (Kivimaa apud Gonçalves, 1990).
- Figura 2.21** - Seção transversal da aresta de corte, apresentando a progressão do desgaste da ferramenta (Gonçalves, 1990).
- Figura 2.22** - Geometria da ferramenta, deformação do cavaco e forças atuantes no corte ortogonal (Gonçalves, 1990).
- Figura 2.23** - Efeito da espessura do cavaco na força de corte paralela (Koch, apud Gonçalves, 1990).
- Figura 2.24** - Direções de corte em relação às fibras (Amemiya et al., 1981).
- Figura 2.25** - Relação de força de corte paralela com a densidade de 21 espécies de madeira (Kivimaa, 1952).
- Figura 2.26** - Forças de corte normal e paralela em função da densidade para as três direções de corte (Kivimaa, 1952).
- Figura 2.27** - Efeito do teor de umidade sobre a força de corte paralela para espécie "Yellow Birch" (Franz apud Koch, 1964).
- Figura 2.28** - Efeito do teor de umidade sobre a força de corte paralela para espécie "Sugar Pine" (Franz apud Koch, 1964).

- Figura 2.29** - Efeito da temperatura da madeira sobre a força de corte paralela (Kivimaa, 1952).
- Figura 2.30** - Comparação das faixas de frequência da emissão acústica e outros tipos de ondas (Blum e Dornfeld, 1990).
- Figura 2.31** - Identificação das zonas de geração de emissão acústica em processos de usinagem que utilizam ferramentas com aresta de corte com geometria definida (Dornfeld, 1988).
- Figura 2.32** - Fases da formação do cavaco na retificação (König, apud Vieira Jr., 1996).
- Figura 2.33** - Variação da voltagem RMS para quatro profundidades de corte (Dornfeld e Lemaster, 1982).
- Figura 2.34** - Variação da voltagem RMS para quatro velocidades de corte (Dornfeld e Lemaster, 1982).
- Figura 2.35** - Variação da voltagem RMS com a velocidade de avanço (Dornfeld e Lemaster, 1982).
- Figura 2.36** - Emissão acústica na indentação do vidro (Tanikella e Scatergood, 1995).
- Figura 2.37** - Energia específica de emissão acústica em função da taxa de remoção de material (Bifano e Yi, 1992).
- Figura 2.38** - Tamanho de cavaco em função da EArms (Hiroshi et al., 1989).
- Figura 2.39** - Sinais de emissão acústica no tempo durante a remoção por jato d'água abrasivo para concreto de grãos grossos e finos (Monber et al., 1995).
- Figura 2.40** - Sinal de emissão acústica em diferentes cargas de riscamento (a) e o correspondente espectro de frequência (b) (Marinescu e Zeng, 1996).
- Figura 3.1** – Desenho das ferramentas de corte, destacando os principais ângulos.
- Figura 3.2** – Dinamômetro para medição dos esforços na usinagem da madeira (Gonçalves, 1993).
- Figura 3.3** - Dispositivo de fixação do dinamômetro na máquina de ensaio.

- Figura 3.4** - Esquema dos circuitos elétricos - ponte completa de "Wheatstone" - adotados para medição de P_c .(Gonçalves, 1993).
- Figura 3.5** - Disposição dos extensômetros elétricos na célula de carga para medida da força principal de corte P_c .(Gonçalves, 1993).
- Figura 3.6** - Montagem do banco de ensaio para aferição estática do dinamômetro.
- Figura 3.7** - Detalhe da fixação da célula de carga e dispositivo metálico.
- Figura 3.8** - Curva de calibração estática do dinamômetro.
- Figura 3.9** - Vista geral do equipamento de ensaio de usinagem
- Figura 3.10** - Detalhe da placa de interface para medição da força de corte e tela de espera para início de ensaio.
- Figura 3.11** - Exemplo do gráfico da força principal de corte em função do tempo de usinagem (Gonçalves, 1993).
- Figura 3.12** - Posicionamento do sensor de emissão acústica na amostra
- Figura 3.13** - Representação esquemática do sistema de medição da emissão acústica.
- Figura 3.14** - Exemplo de curva de emissão acústica construída em programa EXCEL v97
- Figura 3.15** - Base de fixação das amostras de madeira.
- Figura 3.16** - Amostra de madeira com superfície sendo usinada em fresadora CNC
- Figura 3.17** - Equipamentos utilizados na determinação do teor de umidade das amostras de madeira.
- Figura 3.18** - Montagem do conjunto: amostra de madeira, base e sensor de emissão acústica.
- Figura 3.19** - Vista geral da máquina de ensaio, mostrando: ferramenta de corte, célula de carga, dispositivo de fixação e amostra de madeira.
- Figura 3.20** - Vista dos sistemas de aquisição de dados, compostos por monitor SENSIS BM-12 e microcomputadores PC.

- Figura 4.1** – Gráfico de "Pce" médio em função do ângulo de saída, para espessuras de 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 mm.
- Figura 4.2** – Gráfico de "Pce" médio em função da espessura de corte, para ângulos de saída de 10°, 17° e 24°.
- Figura 4.3** – Gráfico de valores médios de emissão acústica em função da espessura de corte para os ângulos de saída: 10°, 17° e 24°.
- Figura 4.4** – Gráfico de valores do desvio padrão médio em função da espessura de corte para os ângulos de saída: 10°, 17° e 24°.
- Figura 5.1** – Gráfico de valores da voltagem RMS em função da espessura de corte para os três ângulos de saída apresentando o tipo de cavaco gerado em cada situação.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1** - Combinações das direções de corte com as direções de penetração da ferramenta de corte (Doi e Yokoyama, 1975).
- Tabela 2.2** - Relação do coeficiente de atrito cavaco-ferramenta de corte para três espécies de madeira e teores de umidade (Koch, 1964).
- Tabela 2.3** - Espécies de madeiras utilizadas no ensaio (Gonçalves e Teixeira, 1995).
- Tabela 2.4** - Fatores que influenciam a amplitude do sinal de emissão acústica (Dunegan e Green, 1972).
- Tabela 3.1** - Dados do carregamento e descarregamento do dinamômetro, com respectivos valores de diferença de potencial da ponte de "Wheatstone".
- Tabela 4.1** – Resultados dos ensaios de medição da força de corte média "Pce", valores em daN.
- Tabela 4.2** – Resultados dos ensaios de emissão acústica "EA", valores médios em Vrms e desvio padrão (σ).
- Tabela 4.3** – Variação da força de corte média com a variação do ângulo de saída.
- Tabela 4.4** – Variação da força de corte média com a variação da espessura de corte.
- Tabela 4.5** – Resultado da análise dos tipos de cavacos gerado para cada condição de ensaio.
- Tabela 4.6** – Valores de variação do sinal acústico em Vrms e respectiva porcentagem com a variação do ângulo de saída.
- Tabela 4.7** – Variação dos valores médios de emissão acústica com a variação da espessura de corte.
- Tabela 4.8** – Variação do desvio padrão dos valores médios de emissão acústica com a variação da espessura de corte.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.

A/D	=	Analógico/Digital
ABNT	=	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	=	"American Society for Testing and Materials"
Co	=	Elemento químico Cobalto
EA	=	Emissão Acústica
EDEM	=	"Extended Distinct Element Method"
FFT	=	"Fast Fourier Transform" - transformada rápida de Fourier
HP	=	"horse power" - unidade de potência .
HSS	=	"High Speed Steel" - aço rápido
max.	=	Máximo
MDF	=	"Medium Density Fiberboard" - chapa de fibra de média densidade
RMS	=	"Root Square Means" - média quadrática dos valores obtidos
rpm	=	Rotações por minuto.
UBU	=	Teor de umidade na base úmida
Vrms	=	Voltagem RMS

LISTA DE SÍMBOLOS

η	=	Ângulo das fibras da madeira formado com a direção de corte
β_f	=	Ângulo de cunha da ferramenta de corte.
α_f	=	Ângulo de folga ou incidência da ferramenta de corte.
λ_s	=	Ângulo de inclinação da ferramenta
γ_f	=	Ângulo de saída ou de ataque da ferramenta de corte.
μ	=	Coefficiente de atrito
F	=	Componente da força de corte ao longo da face da ferramenta
N	=	Componente da força de corte perpendicular a face da ferramenta
A	=	Constante citada por Koch, 1964
B	=	Constante citada por Koch, 1964
K	=	Constante do material
M	=	Constante entre 0 e 1, citado por Koch, 1964
ρ	=	Densidade (g/cm^3)
h'	=	Espessura do cavaco
h	=	Espessura de corte calculada
P_p	=	Força de corte normal
P_c	=	Força de corte paralela
P_u	=	Força de corte resultante
b	=	Largura de corte
M_s	=	Massa da madeira seca
M_i	=	Massa inicial da madeira
P_s	=	Plano de corte da ferramenta
P_r	=	Plano de referência da ferramenta
A_α	=	Superfície principal de folga da ferramenta
A_γ	=	Superfície principal de saída da ferramenta
U	=	Teor da umidade da madeira
V_c	=	Velocidade de corte

RESUMO

O presente trabalho objetiva estudar o desempenho de corte da madeira, através do tipo de formação do cavaco e a respectiva força de corte medida durante a usinagem. Simultaneamente, adquirir os sinais de emissão acústica, relacionando-as as melhores situações de corte.

Para tanto, foram realizados estudos sobre a teoria da usinagem da madeira, medição da força de corte, aplicações e monitoramento por emissão acústica.

Na parte experimental, empregando-se uma plaina mecânica como máquina de ensaio e sistemas de aquisição de dados para registro da força de corte e de sinais de emissão acústica, usinou-se amostras de madeira da espécie *Araucária angustifolia* (Pinho do Paraná) com teor de umidade seca ao ar, fixando-se os ângulos de saída da ferramenta em 10°, 17° e 24° e espessuras de corte de 0,1 a 0,4 mm a cada 0,1 mm.

Da análise dos resultados obtidos pode-se identificar as situações de corte que promoveram o melhor desempenho do processo de usinagem, relacionando-o aos sinais de emissão acústica adquiridos.

ABSTRACT

The purpose of this work was to study the wood cutting performance, through the kink of chip formation and the respective cutting force measured. In the same time, to record the acoustic emission signal and obtaining the relation between the signal and the better cutting situations.

Were made theoretical studies about wood cutting, wood cutting force measurements and acoustic emission monitoring and applications.

Experimentally some samples of *Araucária Angustifolia* (Pinho do Paraná) wood specie were cutting using a shaping machine and a data acquisitive system for the cutting force and acoustic emission signal registration. The samples were air dried and the tool had rake angle fixed in 10°, 17° and 24° with cutting tickness ranging 0,1 to 0,4mm, each 0,1mm.

The results made possible identify the cutting situations that showed better cutting process performance with relation the acoustic emission data obtained.

1 – INTRODUÇÃO

1.1. – Objetivo

Estudar o desempenho de corte da madeira, através da análise do tipo de formação do cavaco no corte ortogonal a 90° e da respectiva força de corte medida durante a usinagem. Simultaneamente, adquirir os sinais de emissão acústica, relacionando-os as melhores situações de corte, de forma a estabelecer padrões relativos ao melhor desempenho de corte para monitoramento do processo de usinagem da madeira.

1.2. – Justificativas

A medição de corte é o método clássico mais difundido no monitoramento de processos de usinagem. No entanto, esse tipo de monitoramento apresenta sérias limitações relacionadas às dificuldades de instrumentação, custo, etc. Como alternativa têm-se buscado um sistema de monitoramento mais simples e econômicos, capaz de refletir o processo com precisão. Neste contexto a emissão acústica surge como uma nova opção de monitoramento dos processos de usinagem, devido as suas características de baixo custo e grande capacidade de evidenciar as modificações ocorridas na estrutura do material, tais como aquelas que acontecem durante o processo de usinagem.

Em relação a outros meios de monitoramento do processo, como a força de corte medida através de dinamômetros ou por parâmetros elétricos do

motor, o monitoramento por emissão acústica apresenta algumas características vantajosas, tais como, sensor simples, pequeno, fácil manuseio e colocação fora da área de trabalho.

As fontes geradoras dos sinais de emissão acústica estão diretamente relacionadas ao processo de remoção do material; sendo que esse sinal não sofre interferência de ruídos provenientes de fontes externas à máquina ou mesmo dela, uma vez que a frequência gerada pelo sinal (50kHz a 1MHz) é muito mais alta que estes ruídos (Lemaster, 1993).

Em um processo de usinagem que utiliza ferramenta de aresta de corte com geometria definida, tais como torneamento, fresamento etc., a formação do cavaco é uma das fontes emissoras de sinais acústicos. No processo de formação do cavaco ocorre o cisalhamento do material; o contato entre cavaco e ferramenta; e o contato entre a ferramenta e a peça. Essas três regiões são associadas à geração de sinais do tipo contínuo e a quebra do cavaco se associa à geração de sinais de pico.

O monitoramento por emissão acústica nos processos de usinagem, tem sido bastante estudado durante os últimos anos, mostrando bons resultados não somente em pesquisas, mas também na produção em meio industrial onde é importante reconhecer a influência dos parâmetros de usinagem sobre a peça e as condições do desgaste da ferramenta, entre outros, conforme Diniz et al (1995).

Esta grande utilização da emissão acústica no monitoramento dos processos convencionais de usinagem, pode ser creditado a alguns fatores como:

- a relação direta que as fontes de emissão acústica apresentam com o processo de separação do material durante a usinagem da peça;

- captação de sinais de alta frequência (50 kHz a 1 MHz), a emissão acústica não sofre influência indesejada de outras fontes sonoras do ambiente de trabalho. Além disso, com o auxílio de um filtro de frequências é possível eliminar contaminações que o sinal possa sofrer;
- possibilidade de colocação do sensor fora da região onde ocorre o corte de material, bastando apenas que haja contato físico entre a peça ou a ferramenta e o local de colocação do sensor para a propagação dos sinais;
- custo dos sensores de emissão acústica e do equipamento para tratamento do sinal é relativamente baixo, se comparado a outros sistemas e de simples operação.

No caso específico deste estudo, buscou-se empregar a emissão acústica no controle do processo de usinagem da madeira, relacionando-a com a força de corte através da análise da formação do cavaco.

A força exercida na ferramenta durante o corte da madeira é o resultado da influência composta de um grande número de fatores relativos à ferramenta de corte, às condições de usinagem e às características do próprio material. O efeito composto desses fatores pode indicar o tipo de cavaco que é formado durante o corte. Por isso o estudo do tipo de cavaco torna-se representativo para definir os esforços que identifiquem a melhor interação entre os fatores de influência.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Teoria da usinagem da madeira para o corte ortogonal

Apresenta-se neste item a parte da revisão bibliográfica que trata de conceitos sobre o fenômeno de corte da madeira, incluindo estudos específicos de pesquisadores conceituados, que analisaram a influência dos diversos parâmetros que interferem na força de corte da madeira.

2.1.1 - Sistemas de corte e mecanismo de formação do cavaco

Na necessidade de se explicar cientificamente a grandeza relacionada a usinagem da madeira, inicialmente deve-se considerar as ocorrências do processo de formação do cavaco. Para tanto se apresenta aqui um estudo dos tipos e formas de cavaco em função do direcionamento das fibras da madeira, ângulo de saída da ferramenta, espessura de corte e teor de umidade da madeira, quando submetida ao processo de corte ortogonal.

O corte ortogonal é a situação de usinagem da madeira, na qual a aresta de corte está perpendicular à direção do movimento relativo entre a ferramenta e a peça, e onde a superfície gerada é um plano paralelo à superfície original de trabalho. Tem-se como exemplo dessa situação o serramento contínuo de seccionamento ou recorte, serramento com movimento alternativo, torneamento, aplainamento linear, serramento com serra de corrente, etc.

McKenzie, em 1967 criou uma notação, útil para descrever uma situação de corte ortogonal. Ela identifica três sistemas de corte que relacionam as direções de corte e de penetração da aresta de corte da ferramenta em função do posicionamento das fibras na secção transversal da madeira. Esta notação é utilizada por outros pesquisadores até os dias de hoje.

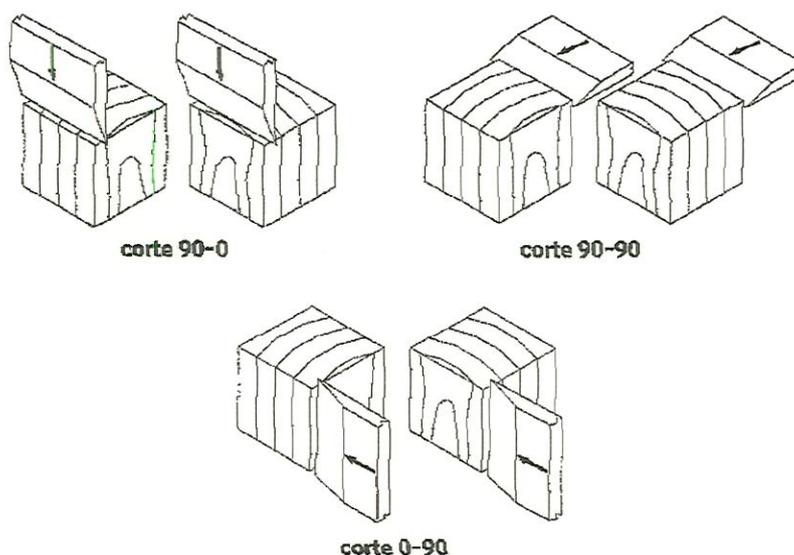


Figura 2.1 - Sistemas de corte na seção transversal da madeira (Hoadley apud Néri, 1998).

Os três sistemas de corte, descrito abaixo, são facilmente visualizados na Figura 2.1.

- Corte paralelo às fibras: direção 90 - 0;
- Corte perpendicular às fibras: direção 0 - 90;
- Corte perpendicular às fibras: direção 90 - 90.

Nestes sistemas, o primeiro número da notação refere-se ao ângulo entre a aresta de corte e a direção das fibras da madeira, e o segundo número refere-se ao ângulo entre o vetor movimento da ferramenta e a direção das fibras.

Em 1975, Doi & Yokoyama apresentaram outra forma de classificação, combinando a direção de corte com a direção de penetração da aresta de corte em função dos sentidos de crescimento da madeira, axial e radial. Dezesesseis combinações são consideradas, conforme mostrado na tabela 2.1. A ilustração dessas combinações de corte e direção de penetração numa amostra de madeira pode ser vista Figura 2.2. Essas direções são representadas pela relação entre três eixos geométricos (Radial R, Tangencial θ e Axial Z) de uma peça de madeira serrada. O sinal positivo (+) ou negativo (-) é empregado para distinguir o sentido de crescimento da madeira nas direções "R" e "Z".

Tabela 2.1 - Combinações das direções de corte com as direções de penetração da ferramenta de corte (Doi e Yokoyama, 1975).

Direção de Corte	Direção de Profundidade		
	Direção Radial $R \pm$	Direção Tangencial θ	Direção Axial $Z \pm$
Direção Radial $R \pm$	--	$R \pm, \theta$	$R \pm, Z \pm$
Direção Tangencial θ	$\theta, R \pm$	--	$\theta, Z \pm$
Direção Axial $Z \pm$	$Z \pm, R \pm$	$Z \pm, \theta$	--

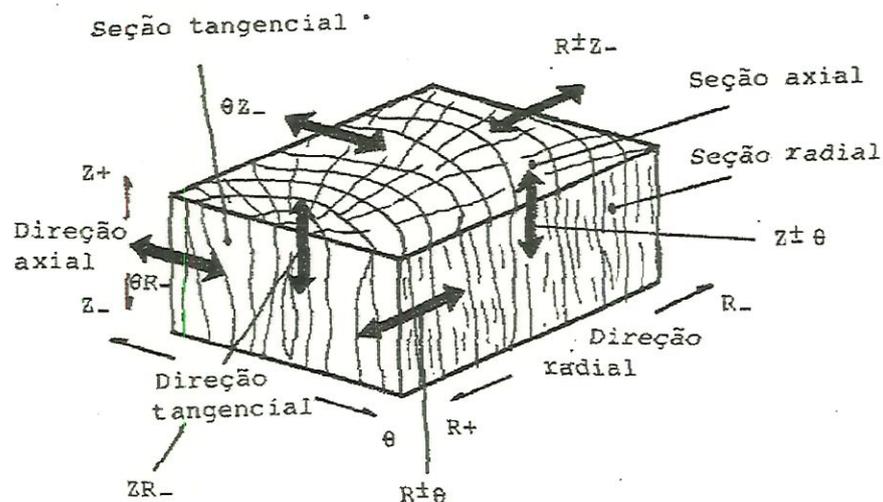


Figura 2.2 - Direções combinadas de corte e penetração nas seções de uma amostra de madeira (Doi e Yokoyama apud Gonçalves, 1990).

2.1.1.1 - Corte Paralelo às Fibras: Direção 90 - 0

Terminologia

A fim de padronizar a simbologia a respeito do corte ortogonal, apresenta-se a seguir a terminologia conforme Norma ABNT NBR 6163 (1989), a qual é utilizada para usinagem de materiais metálicos.

Ângulos da ferramenta, medidos no plano admitido de trabalho (P_f).

γ_o = ângulo de saída da ferramenta de corte - é o ângulo formado entre a superfície principal de saída da ferramenta (A_γ) e o plano de referência da ferramenta (P_r).

β_o = Ângulo de cunha da ferramenta de corte - é o ângulo formado entre as superfícies principais de saída (A_γ) e de folga (A_α) da ferramenta.

α_o = Ângulo de folga da ferramenta de corte - é o ângulo formado entre a superfície principal de folga (A_α) e o plano de corte da ferramenta (P_s).

Grandezas de usinagem

h = espessura de corte - é a espessura calculada da seção transversal do cavaco ou penetração da cunha de corte.

h' = Espessura do cavaco.

b = largura de corte - é a largura calculada da seção transversal do cavaco não deformado, corresponde ao comprimento da aresta.

As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam a geometria da cunha de corte e as relações geométricas para o corte ortogonal, respectivamente.

Tipo I - Formado quando as condições de corte são tais que a madeira sofre fendilhamento à frente da ferramenta por cisalhamento até que ocorra a quebra do cavaco por flexão, como em uma viga em balanço.

Tipo II - Resulta quando a quebra do cavaco em pedaços se faz ao longo da linha que se estende da aresta de corte para a superfície de trabalho.

Tipo III - Ocorre quando as forças proporcionadas pelo movimento da ferramenta causam quebras de cavaco por compressão e cisalhamento à frente da aresta de corte.

No corte ortogonal existe uma transição abrupta de um tipo de cavaco para o outro, com nenhuma fase sensível de transição. Nas situações divisórias o tipo de cavaco pode alternar para intervalos irregulares, dependendo da variação da peça-obra ou em alguns casos, variações nas forças de atrito na interface cavaco-ferramenta. Uma transição cíclica ou mais ou menos regular pode algumas vezes ocorrer, dependendo do mecanismo da situação de tensão instantânea.

O tipo de formação do cavaco determina não somente a forma do cavaco separado, bem como a qualidade da superfície gerada na peça-obra.

Formação do Cavaco Tipo I

Uma série cíclica de ocorrências forma o cavaco Tipo I. Quando a ferramenta atua sobre a peça-obra, a madeira não é comprimida uniformemente pela face da ferramenta (superfície de saída), em toda seção transversal do cavaco não deformado.

Conforme a ferramenta continua a se mover para frente, a madeira na área à frente da ferramenta é solicitada por compressão paralela às fibras e por cisalhamento na ponta da ferramenta.

O movimento adicional causa a quebra por cisalhamento com origem na aresta da ferramenta e prossegue na direção das fibras. Conforme a ferramenta movimenta-se para frente o cavaco se movimenta acima da face desta, dando prosseguimento à ação de cisalhamento até o ponto onde os esforços de flexão tornam-se um fator limitante e o cavaco quebra como uma viga em balanço.

Com a continuidade do movimento da ferramenta o cavaco quebrado move-se para cima, escorregando na superfície da ferramenta, até que a aresta cortante encontra novamente um pedaço de madeira não deformado e outro ciclo se inicia. A Figura 2.5 apresenta a formação deste tipo de cavaco.

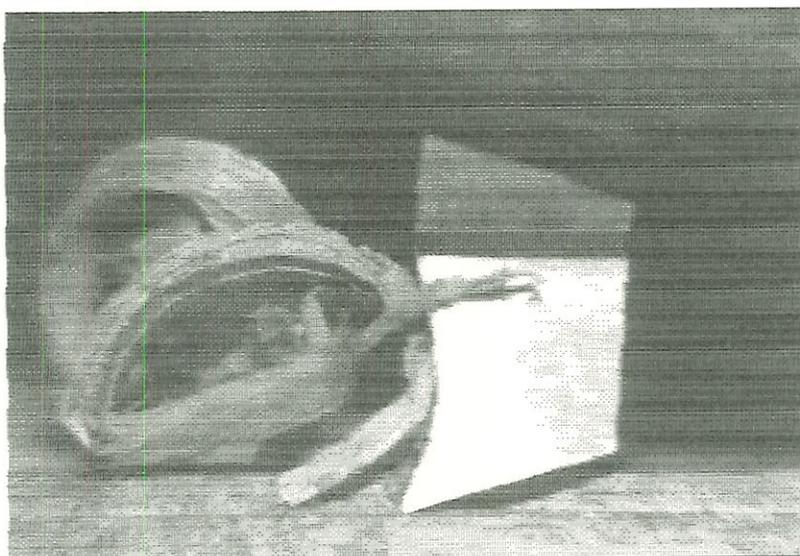


Figura 2.5 - Formação do cavaco Tipo I. Madeira – Imbuía, com teor de umidade de 12%. Ferramenta de corte em aço rápido, com ângulo de saída de 12° e espessura do cavaco de 1,5 mm. (Gonçalves, 1989).

A relação entre tensão de cisalhamento e rigidez do material e tensão devido à flexão afeta o comprimento do segmento de cavaco. No caso do cavaco não quebrar no flexionamento, este se movimenta acima da superfície da ferramenta de uma forma livre e contínua, enquanto ocorre a ruptura por cisalhamento; produzindo um cavaco contínuo sem segmentação. Este

fenômeno se deve ao teor de umidade da madeira se encontrar próximo ao estado de saturação ou acima deste.

A observação da formação do cavaco Tipo I indica que os seguintes fatores levam à sua ocorrência:

- Baixa resistência ao cisalhamento em combinação com alta rigidez e resistência à flexão;
- Cavaco com grande espessura;
- Ângulo de saída elevado;
- Baixo coeficiente de atrito entre o cavaco e a superfície da ferramenta;
- Teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras da madeira.

Se o percurso da ferramenta é precisamente paralelo às fibras da madeira, então a superfície resultante da formação do cavaco Tipo I é estabelecida pelo cisalhamento ou fendilhamento que precede a aresta de corte, e a qualidade da superfície é determinada pela susceptibilidade que a madeira tem de se avariar e quebrar. A angularidade das fibras relativamente ao percurso de corte afeta fortemente a qualidade da superfície resultante.

Quando se corta a madeira com as fibras direcionadas de forma oblíqua, relativamente à superfície de corte da peça e posicionadas na descendente, a quebra por cisalhamento do cavaco em formação se estende para o interior da peça-obra e abaixo do plano gerado pelo percurso da ferramenta. Na Figura 2.6 pode-se visualizar a formação de cavaco Tipo I com fenda progredindo para o interior da peça. Conseqüentemente a qualidade da superfície resultante é estabelecida pela natureza da falha do cavaco. Este modo de quebra produz um defeito de usinagem comumente chamado de "fibras lascadas" (chipped grain), mostrado na Figura 2.8.



Figura 2.6 - Formação do cavaco Tipo I com extensão da fenda para o interior da peça (Franz, N.C. apud Koch, 1964).

Formação do Cavaco Tipo II

Sob certas condições limitadas, pode-se criar um estado contínuo de destacamento da madeira partindo da aresta de corte até a superfície de trabalho adiante da ferramenta.

Conforme o cavaco Tipo II está se formando, a ferramenta se move e comprime a madeira à frente da face da ferramenta, em uma direção paralela às fibras e induz tensões cisalhantes na diagonal, que por sua vez se tornam críticas e resultam em quebra e deformação dos elementos da madeira.

O material deformado escapa para cima ao longo da face da ferramenta, permitindo que os esforços sejam transferidos para a madeira à frente da ferramenta de uma forma contínua.

A continuidade do processo de usinagem é refletida na geometria do cavaco que assume a forma de uma espiral suave. O raio da espiral aumenta conforme a espessura do cavaco aumenta.

A formação do cavaco Tipo II, conforme pode ser visto na Figura 2.7, produz uma superfície de excelente qualidade, porque a aresta cortante exerce controle que limita os danos e quebras da madeira.

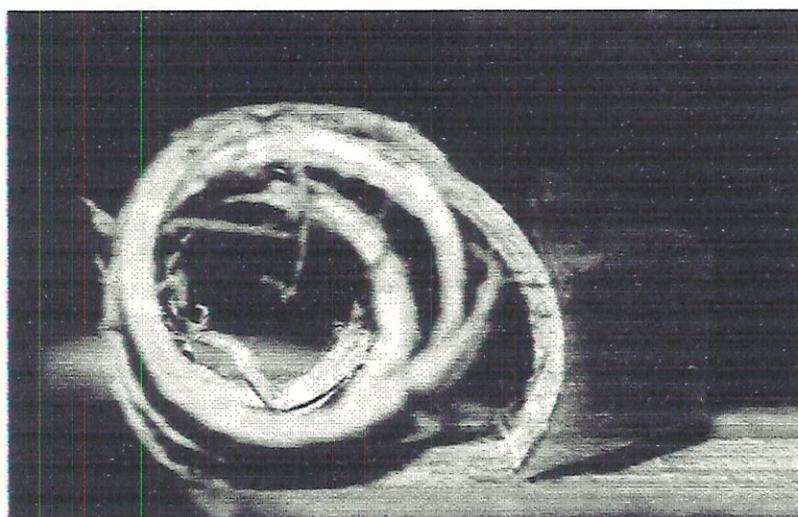


Figura 2.7 - Formação do cavaco Tipo II usinando-se castanheira com 18% de umidade, ângulo de saída de 30° e espessura de corte de 1,5 mm. (Gonçalves, 1989).

Do ponto de vista da qualidade superficial, a formação do cavaco Tipo II é tida como a ideal, visto que a superfície gerada fica relativamente livre de elementos danosos acima e abaixo do plano gerado pela aresta de corte, conforme mostrado na Figura 2.8, onde se compara o acabamento superficial obtido na formação dos cavacos Tipo I e Tipo II.



Figura 2.8 - Acabamento superficial na formação dos cavacos: Tipo I mostrado na região superior e Tipo II mostrado na região inferior (Gonçalves, 1989).

Alguns fatores parecem favorecer a formação do cavaco Tipo II, tais como:

- cavacos com pequenas espessuras;
- teores de umidade intermediários;
- ângulos de saída intermediários.

Formação do Cavaco Tipo III

A formação do cavaco Tipo III, visto na Figura 2.9, se dá devido à ocorrência de ruptura por cisalhamento e compressão à frente da superfície da ferramenta. Este tipo de cavaco tende a ser cíclico na sua formação.

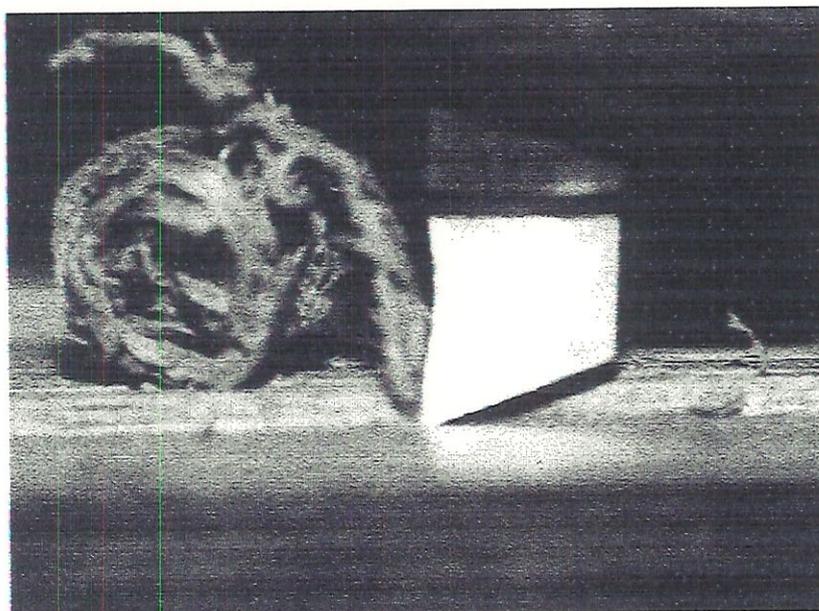


Figura 2.9 - Formação do cavaco Tipo III, se usinando castanheira com teor de umidade de 18%. Ferramenta de corte em aço rápido, com ângulo de saída de 5° e espessura do cavaco de 1,5 mm. (Gonçalves, 1989).

O ciclo de formação típico se inicia com a ferramenta entrando em contato com a peça e a madeira sendo comprimida paralelamente às fibras. O movimento adicional da ferramenta provoca esforços na madeira até que a ruptura ocorra por cisalhamento e compressão paralela às fibras, seguidas pela compactação dos elementos deformados contra a face da ferramenta.

Os esforços são transferidos para as áreas não deformadas que conseqüentemente se romperão. Neste tipo de formação, o cavaco não escapa livremente da face da ferramenta, permanecendo interposto entre a face e a região onde a madeira cisalha e se rompe.

Conforme a ferramenta continua o avanço, a massa aderida na face da ferramenta aumenta de tal forma que age como uma falsa cunha de corte com ângulo de saída aumentado. Quando o volume da massa se torna crítico ou quando o ângulo desenvolvido é tal que um cavaco secundário do Tipo I é induzido, ocorre uma instabilidade que provoca a saída daquela massa para cima da face da ferramenta e um novo ciclo se inicia.

As falhas da madeira formadas à frente da ferramenta estabelecem a superfície gerada na formação do cavaco Tipo III. Estas falhas freqüentemente se estendem abaixo do plano gerado pelo movimento da aresta de corte da ferramenta. Devido à natureza dessas falhas, elas resultam em elementos da madeira não completamente desligados denominados de "ferpas". As ferpas parcialmente usinadas permanecem em alto relevo na superfície usinada. O defeito de usinagem dado pela formação do cavaco Tipo III é freqüentemente chamado de "fibras felpudas" (fuzzy grain), conforme mostrado na Figura 2.10.

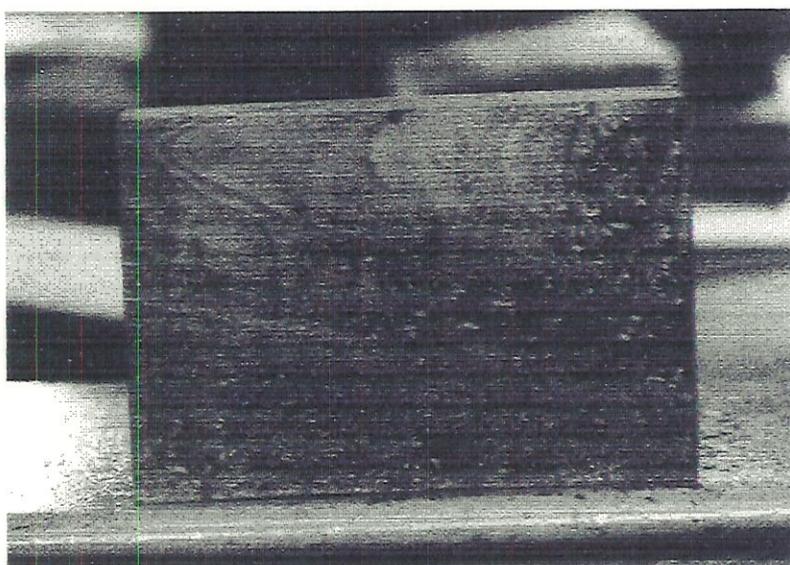


Figura 2.10 - Acabamento superficial obtido na formação do cavaco Tipo III (Gonçalves, 1990).

Fatores que favorecem a formação do cavaco Tipo III incluem:

- ângulos de saída relativamente pequenos ou negativos;
- aresta cortante sem fio de corte;
- teor de umidade da madeira muito alto ou muito baixo;
- alto coeficiente de atrito entre a superfície da ferramenta e o cavaco.

2.1.1.2 - Corte perpendicular às fibras: direção 0 - 90

A Figura 2.1 ilustra as possíveis orientações das fibras quando a aresta de corte é paralela a estas. Na formação do cavaco, se o ângulo de saída da ferramenta é pequeno e conseqüentemente a deformação no cavaco é alta, os cavacos obtidos são em forma de lascas. Se o ângulo de saída for aumentado, o cavaco começa a se juntar e enrolar durante a sua formação. Com grandes ângulos de saída (como no folheamento ou laminação), o cavaco é contínuo, suavemente curvado e moderadamente danificado. Ocorre que a usinagem por estes tipos de processos são realizadas com a madeira umedecida e amolecida (preparada termicamente) para melhoria do desempenho de corte.

2.1.1.3 - Corte perpendicular às fibras: direção 90 - 90

A direção das fibras e a direção de corte estão ilustradas na Figura 2.1.

McKenzie (1960 e 1962) relatou a formação do cavaco e os tipos de falhas em sua pesquisa sobre o corte ortogonal, perpendicular às fibras. Usando técnicas que envolvem baixas velocidades de corte e colocação de um dinamômetro diretamente na ferramenta, simultaneamente o pesquisador empregou microscópico para examinar a formação do cavaco.

Com ângulos de saída menores que 20° e cavacos com espessuras inferiores a 0,254 mm, a madeira falha de uma forma tão irregular que dificulta a classificação quanto à formação do cavaco. Nestas circunstâncias as fibras não são cortadas na maioria das vezes, mas curvadas pela cunha de corte da ferramenta e removidas por atrito e fragmentação. Para ângulos de saída maiores que 20° e cavacos mais espessos que 0,254 mm, McKenzie reconheceu tipos de quebra e falhas regulares. Nestas circunstâncias existe uma tendência da falha ocorrer no plano de corte e

abaixo deste. McKenzie identifica em seu trabalho quatro tipos de falhas que foram classificadas em dois grupos principais, conforme detalhado a seguir.

Falha Tipo I (repetitiva)

Neste tipo de falha, abaixo do plano de corte, podem ocorrer duas formas de fendilhamento no sentido paralelo às fibras, descritas como Tipo I (a) e Tipo I (b). Nos dois casos, após o corte, o espaçamento e a extensão da fenda são aproximadamente iguais.

No Tipo I (a), as fendas podem ser pequenas e regulares, conforme apresentado na Figura 2.11. Elas estão associadas a uma pequena extensão de ondas e flutuações da força de corte, a qualidade superficial não é muito afetada por este tipo de falha.

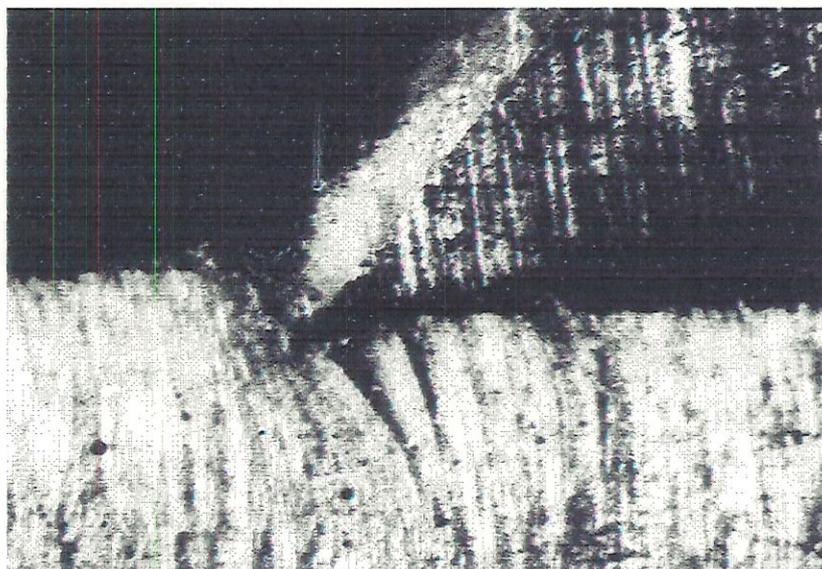


Figura 2.11 - Falha do cavaco Tipo I (a) (McKenzie apud Koch, 1964).

No Tipo I (b), pequeno fendilhamento pode ocorrer entre as fendas mais longas e regularmente espaçadas, como apresentado na Figura 2.12. As fendas mais longas deste tipo de falha prejudicam a qualidade da superfície.

Cada sub-cavaco acima do plano de corte é formado pelo cisalhamento das fibras no mesmo tempo em que abaixo da superfície de corte forma-se a fenda. Essas falhas podem ocorrer à frente da aresta de corte, porém como a madeira estão solicitadas à compressão, as fendas podem não ser visíveis.

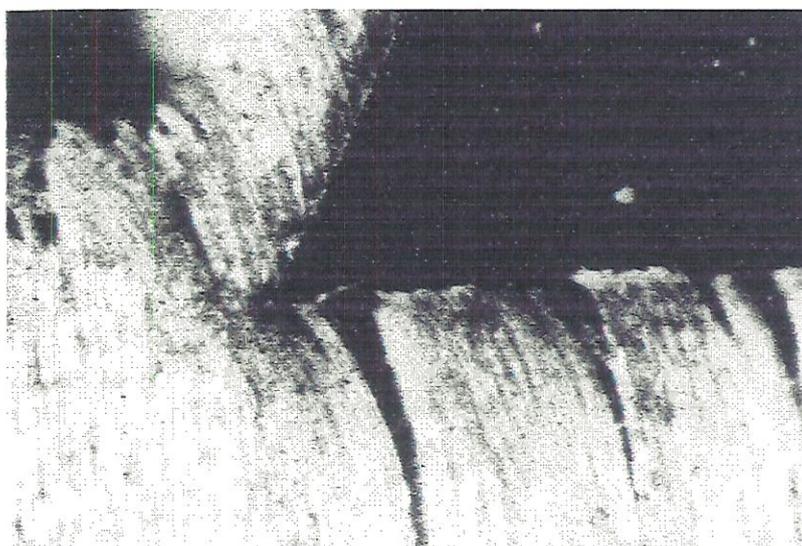


Figura 2.12 - Falha do Tipo I (b) (McKenzie apud Koch, 1964).

Na falha do Tipo I (a), após o corte, os sub-cavacos se mantêm ligados de maneira pouco compacta, ao passo que na falha do Tipo I (b) os sub-cavacos estão em grupos que correspondem ao espaçamento da maior fenda.

Falha Tipo II (cíclica)

A variação cíclica das forças de corte, medidas em sucessivos cortes, caracteriza este tipo de falha. Elas ocorrem em um plano perpendicular às fibras e paralelo ao plano de corte a uma distância variável deste. Essas falhas podem ser intermitentes, denominadas de Tipo II (a), apresentada na Figura 2.13, ou contínuas, denominadas de Tipo II (b), apresentada na Figura 2.14.

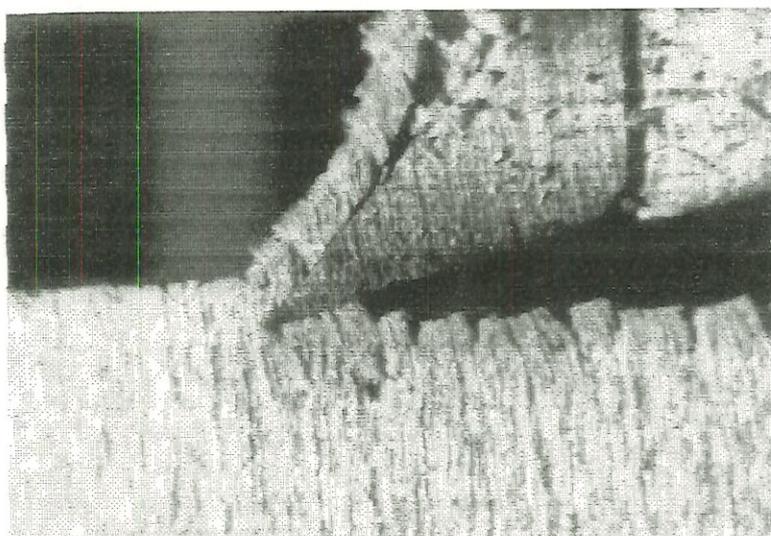


Figura 2.13 - Falha do Tipo II (a) (McKenzie apud Koch, 1964).

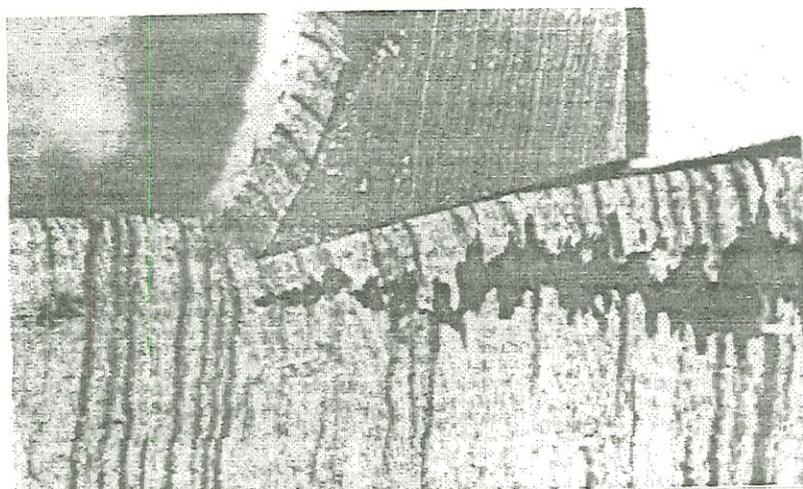


Figura 2.14 - Falha do Tipo II (b) (McKenzie apud Koch, 1964).

No Tipo II (a), a falha se dá pela separação das fibras por cisalhamento acima do plano de corte formando sub-cavacos, de modo que as pontas quebradas abaixo do plano de corte permanecem nesta região.

No Tipo II (b), conforme ocorre o destacamento contínuo no plano de corte, o cavaco acima deste plano pode ser cortado por cisalhamento em sub-cavacos, ou permanecer contínuo, de maneira que dois cavacos praticamente contínuos são formados, um acima e um abaixo do plano de corte.

Para as falhas do Tipo II, ocorrem variações cíclicas na força de corte média para cortes sucessivos. Essas variações dependem da continuidade e distância abaixo do plano de corte da menor falha, resultando em superfícies de má qualidade e com baixa eficiência de corte.

Durante a usinagem, transições entre falhas do Tipo I e Tipo II podem ocorrer na mesma superfície da madeira, devido a variações nas propriedades desta de um ponto a outro.

2.1.2 - Fatores que afetam a Força de Corte

Vários pesquisadores estudaram a influência dos parâmetros variáveis da madeira, relacionando-os aos esforços inerentes ao processo de usinagem. Kivimaa (1950) e Franz (1959), pesquisaram essas influências para o corte ortogonal paralelo às fibras. McKenzie (1960), desenvolveu pesquisa dentro do mesmo processo, porém com direcionamento perpendicular às fibras. Koch (1964) publicou vários experimentos realizados para o corte ortogonal e utilizando alguns resultados de análise, direcionou seus experimentos para o fresamento periférico paralelo às fibras da madeira.

Análise de casos específicos foi realizada por vários outros pesquisadores,

os quais são descritos no item 2.1.3.

A força exercida na ferramenta no corte ortogonal 90-0 é o resultado da influência composta de um grande número de fatores, listados a seguir.

Fatores relativos à ferramenta de corte:

- Ângulo de saída (γ_o);
- Ângulo de folga (α_o);
- Ângulo de inclinação (ângulo entre a aresta e a direção de avanço) (λ_s);
- Estado de afiação da aresta de corte;
- Atrito entre o cavaco e a face da ferramenta;
- Vibração lateral induzida.

Fatores relativos às condições de usinagem:

- Largura de corte (b);
- Espessura de corte (h');
- Velocidade de corte (V_c);
- Direção das fibras relativa ao corte.

Fatores relativos às características da madeira:

- Espécies e Densidade (ρ);
- Teor de umidade (U);
- Temperatura.

O efeito composto de todos esses fatores pode indicar o tipo de cavaco que é formado no corte 90-0. Por isso o estudo do tipo de cavaco torna-se representativo para definir padrões de força que caracterize cada formação. A Figura 2.15 ilustra os diagramas das componentes de força normal e paralela, como observado por Franz, em 1958, para cada um dos três tipos de cavaco.

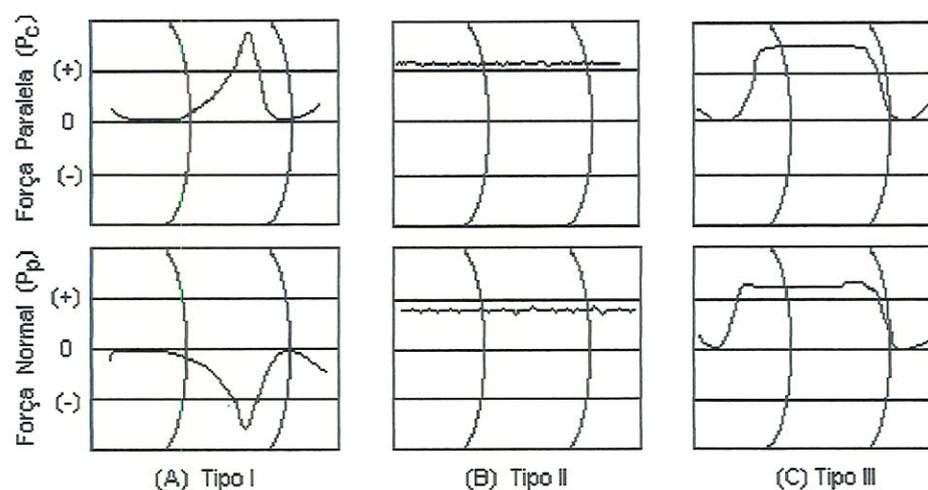


Figura 2.15 - Modelo representativo das componentes de força de corte normal e paralela para cada um dos três tipos de formação de cavacos (Franz apud Koch, 1964).

A formação do cavaco do Tipo I é acompanhada por um modelo da força exemplificado na Figura 2.15 (A). A geração de picos de força com amplitude e freqüência uniformes, indica a natureza cíclica do processo. No início do ciclo de formação do cavaco, há um acréscimo de magnitude da força com o início do contato e a posterior compressão da madeira pela face da ferramenta.

Com a continuidade do avanço da ferramenta, a força paralela cresce rapidamente e a força normal simultaneamente assume valores pequenos ou negativo. Ambas as forças atingem o valor máximo quando da ocorrência do fendilhamento da madeira. Ambas rapidamente caem para níveis mais baixos quando o cavaco é defletido até o colapso como uma viga em balanço. As forças então são desprezíveis até que outro ciclo se inicie.

Apesar do fato de que as forças instantâneas podem ser altas durante a formação do cavaco do Tipo I, a área abaixo da curva é relativamente pequena em comparação aos outros dois tipos, e, portanto, o trabalho executado é relativamente pequeno. A eficiência da remoção da madeira é por isso alta em relação aos outros dois tipos de cavaco. Nota-se que em contraste com os diagramas dos cavacos do Tipo II e do Tipo III, o caminho da força normal é negativo.

A Figura 2.15 (B) ilustra o padrão típico da força desenvolvida durante a formação do cavaco Tipo II. Como era esperado, pela continuidade do processo, as forças normal e paralela exibem uma condição de estabilidade e equilíbrio. Ambas as componentes são positivas, sendo que a força normal F_p é próxima de zero.

Para remoção de madeira em grandes proporções, observa-se que o cavaco Tipo II consome mais energia que o cavaco Tipo I, em virtude de serem mantidos os elevados esforços de corte.

O modelo representativo da força para o cavaco do Tipo III é mostrado na Figura 2.15 (C). A curva de força reflete a natureza cíclica da formação do cavaco. Quando o ciclo se inicia, o esforço se desenvolve vagarosamente até que a face da ferramenta esteja integralmente em contato, nesse instante a força aumenta rapidamente. Quando ocorre a compactação da madeira à frente da face da ferramenta, as tensões são transferidas para a área indeformada do cavaco, um nível alto e contínuo de força persiste até que a instabilidade da massa compactada cause o escape, e conseqüentemente a queda rápida a valores desprezíveis das forças envolvidas, neste ponto o ciclo se inicia novamente. Como no caso de formação do cavaco do Tipo II, o cavaco do Tipo III, indica também elevadas componentes da força de atrito ao longo da interface ferramenta-cavaco. Devido ao formato das curvas de esforços, é visível que o trabalho envolvido no corte do cavaco do Tipo III é relativamente grande.

2.1.2.1 - Fatores relativos à ferramenta de corte:

a - Ângulo de saída

A Figura 2.16 ilustra o efeito do ângulo de saída sobre a força de corte paralela (P_c). Nesta Figura pode-se observar que ângulos de saída pequenos ou negativos induzem o aparecimento de grandes esforços paralelos às fibras e ângulos maiores minimizam estes esforços.

A Figura 2.17 ilustra o efeito do ângulo de saída na força normal (P_p), onde se pode visualizar que pequenos ângulos de saída causam grandes forças normais positivas e grandes ângulos causam forças normais negativas. Dependendo da espécie, para ângulos de saída entre 20° e 30° , a força normal da ferramenta apresenta-se na maioria das vezes nula, geralmente encontradas nos trabalhos práticos de usinagem da madeira.

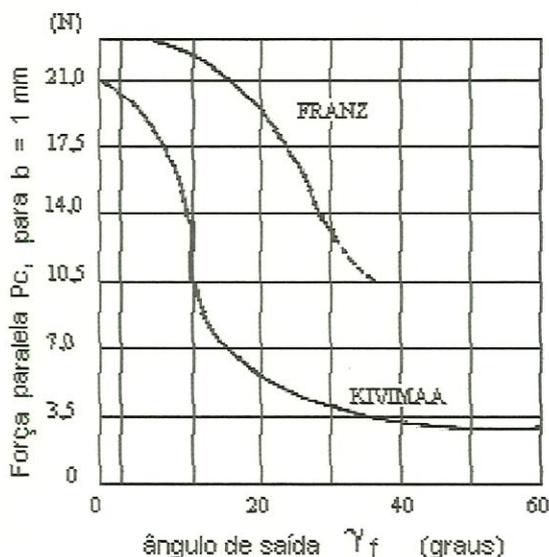


Figura 2.16 - Efeito do ângulo de saída sobre a força de corte paralela às fibras da madeira (adaptado de Koch, 1964).

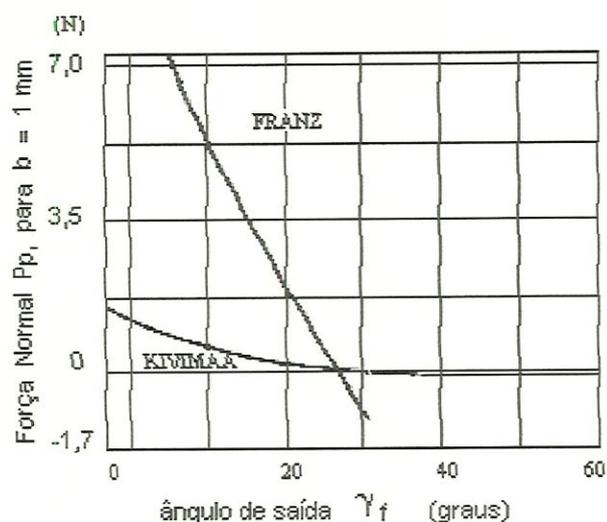


Figura 2.17 - Efeito do ângulo de saída sobre a força de corte normal às fibras da madeira (adaptado de Koch, 1964).

Doi e Yokoyama realizaram um trabalho em 1975 onde relacionaram forças de corte com ângulo de saída da ferramenta. Os autores verificaram que com o aumento do ângulo de saída, a força paralela diminuiu, tanto na direção perpendicular às fibras ($R + \theta$) como na direção paralela às fibras ($Z + \theta$), mais acentuadamente para o segundo caso.

Gonçalves, Rodrigues e Takahashi (1997), estudaram a influência do ângulo de saída sobre a força de corte paralela, usando 10 espécies de madeiras nativas e de reflorestamento.

Os autores concluíram, assim como em trabalhos anteriores, que quanto maior o ângulo de saída, menor a força de corte para as mesmas condições de corte. Esta confirmação pode ser verificada neste trabalho. Esse fato fica mais evidente quanto maior a espessura de corte e a velocidade de corte, porém para as espécies ensaiadas que apresentavam fibras desalinhas em relação à direção de corte, em amostras com elevados teores de umidade, a relação entre ângulo de saída e força de corte paralela não se confirmou, muito provavelmente devido à dificuldade do cavaco se romper completamente.

b - Ângulo de folga

Observações quantitativas realizadas por Kivimaa, em trabalho realizado no ano de 1952, com respeito ao efeito do ângulo de folga sobre as componentes normal e paralela da força de corte, é apresentado nas Figuras 2.18 e 2.19.

A força de corte paralela às fibras decresce quando o ângulo de folga aumenta de 0° para 15° . Isto se deve à diminuição da interferência entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Devido ao baixo módulo de elasticidade da madeira na direção perpendicular às fibras e à associação de grandes deformações elásticas ou não elásticas da madeira durante a ação de corte, existe um atrito considerável da face de folga da ferramenta quando se empregam baixos ângulos de folga. Se o ângulo de folga é aumentado para valores maiores que 15° , a força de corte paralela aumenta suavemente, por razões relacionadas com a integridade da aresta de corte.

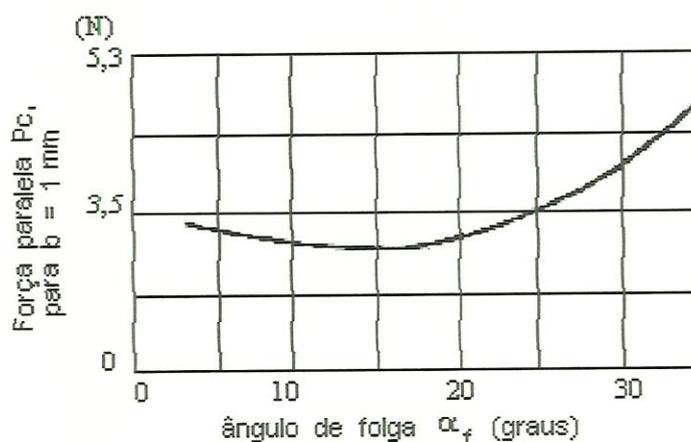


Figura 2.18 - Efeito do ângulo de folga sobre a força de corte paralela exercida na ferramenta (adaptado de Koch, 1964).

Na Figura 2.19 pode-se visualizar que a força de corte normal às fibras decresce quando o ângulo de folga aumenta de 0° para 10° . Com o ângulo de folga sendo aumentado para valores superiores a 10° , a força de corte

normal aumenta suavemente até atingir o valor zero quando o ângulo de folga está próximo de 30° .

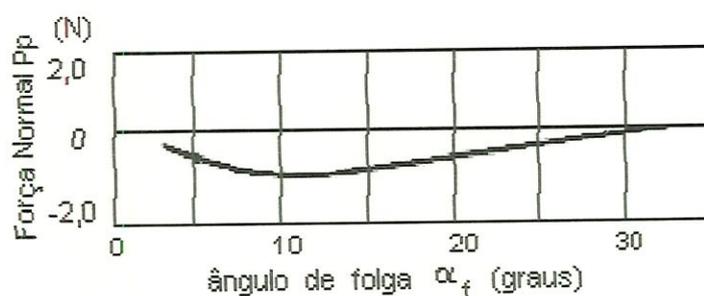


Figura 2.19 - Efeito do ângulo de folga sobre a força de corte normal, exercida na ferramenta (adaptado de Koch, 1964).

c - Ângulo de inclinação

O ângulo de inclinação (λ_s) é definido como sendo o ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta (P_r), medida no plano de corte da ferramenta (P_s). Em outras palavras, pode-se posicionar a aresta de corte obliquamente à direção do movimento, originando-se assim o ângulo de inclinação da ferramenta.

Kivimaa em 1950 trabalhou com "Finnish birch" de densidade $0,64 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade de 11%, onde removeu cavacos com espessura de $0,1 \text{ mm}$ usando uma faca com ângulo de folga de 10° . Estes experimentos indicaram que a força de corte é consideravelmente afetada pelo ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s) quando a direção de corte é paralela às fibras. Com o aumento do ângulo de inclinação (Figura 2.20), os resultados mostraram que a força de corte paralela para a direção perpendicular às fibras permanece constante ou aumenta, enquanto que para a direção paralela às fibras a força paralela diminui acentuadamente.

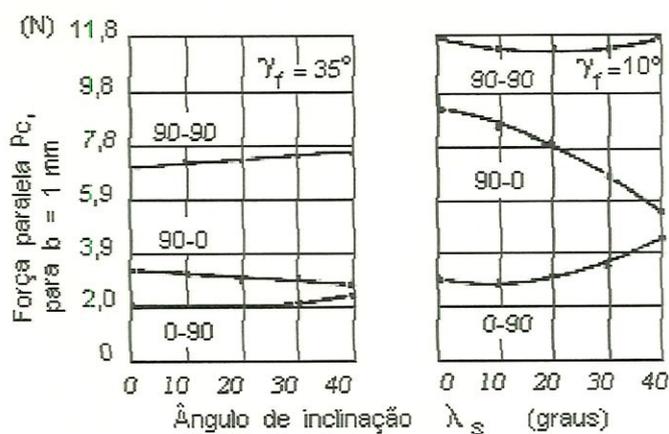


Figura 2.20 - Efeitos do ângulo de inclinação na força de corte paralela (Kivimaa apud Gonçalves, 1990).

Ozaki e Fukui em 1982 realizaram um estudo detalhado relacionando o ângulo de inclinação da ferramenta com as componentes de força paralela e normal nas direções 0-90 e 90-0. Os autores verificaram também a influência dos ângulos de saída e de folga sobre o ângulo de inclinação, tanto no plano dado pela direção do movimento como no plano dado pelo vetor velocidade de escoamento do cavaco, visto que a superfície de saída se posiciona de forma oblíqua.

Neste trabalho, observa-se que quanto mais se aumenta o ângulo de saída, menos acentuado é o decréscimo da força de corte paralela com o aumento do ângulo de inclinação, coincidindo, portanto com os resultados obtidos por Kivimaa. Observaram também que a força de corte normal se mantém praticamente constante para as duas espécies de madeira ensaiadas ("Buna" e "Port-Orford-cedar"), apresentando uma pequena variação para ângulos de inclinação superiores a 30°.

McKenzie e Franz em 1964, também analisaram a relação das componentes da força de usinagem com o ângulo de inclinação, e seus resultados apresentaram semelhantes aos reportados por Ozaki e Fukui.

d - Estado de afiação da aresta de corte

A ferramenta de corte, na maioria dos casos, é exigida mecanicamente como se fosse uma viga em balanço e dependendo da elasticidade do material da ferramenta a aresta cortante deve curvar-se, fletir-se ou vibrar de maneira semelhante, como quando uma carga é colocada sobre a mesma. A deflexão resultante da aresta de corte afeta de alguma forma as forças de usinagem, aumentando estas em alguns casos e diminuindo em outros. Para que ocorra um bom desempenho de corte na usinagem é sempre desejado a obtenção de uma aresta de corte ideal, ou seja, aresta de elevada agudez e de rigidez infinita.

No corte ortogonal não há razão para se aumentar o ângulo de folga além do necessário para minimizar os efeitos das deformações que ocorrem sob a aresta de corte, ou seja, um aumento além do valor mínimo necessário não resultaria em diminuição dos esforços que agem na ferramenta. Na prática, o efeito de uma aresta de corte ideal, conforme descrito acima é impossível de ser conseguida.

Kivimaa em seu trabalho publicado em 1952 utilizou uma ferramenta acentuadamente aguda e recém afiada para usinagem de madeiras e identificou micro fraturas na aresta de corte, quando do início da usinagem. Estas fraturas continuam a ocorrer até que a aresta se torne mais rígida, devido ao processo de arredondamento da ponta.

Após a ferramenta usinar um certo volume de madeira, a deterioração da aresta de corte torna-se mais lenta e o desgaste se processa a uma taxa menos acentuada. Em função de critérios adotados para o desgaste da aresta de corte, pode-se estabelecer a agudez crítica da cunha cortante. Com o aumento do desgaste, aumenta-se proporcionalmente a potência de corte requerida para a remoção do cavaco (Gonçalves, 1989).

A Figura 2.21 ilustra a maneira na qual o desgaste se processa. Na área localizada onde a ação de corte realmente ocorre, nota-se que o ângulo de saída é diminuído conforme o desgaste se processa, podendo causar a alteração do tipo de formação do cavaco. Em adição, o ângulo de folga efetivo é reduzido e realmente se torna negativo, conforme se processa o desgaste, aumentando desta forma as forças de usinagem e conseqüentemente afetam a qualidade da superfície usinada.

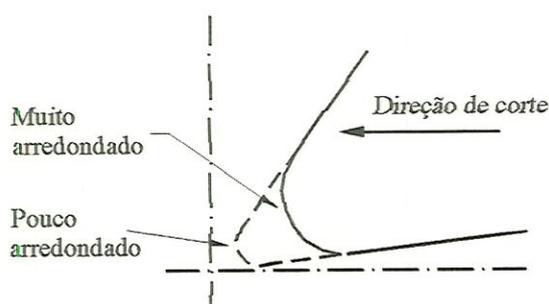


Figura 2.21 - Seção transversal da aresta de corte, apresentando a progressão do desgaste da ferramenta (Gonçalves, 1990).

e - Atrito entre a face da ferramenta e o cavaco

Dado a ocorrência de atrito na interface cavaco-ferramenta de corte, tanto a distribuição de forças como a formação do cavaco são afetados. A força de atrito é função da espécie de madeira e teor de umidade desta, mas é relativamente pouco afetada pela rugosidade na face da ferramenta quando marcas de afiação são paralelas ao fluxo de cavaco, sendo relativamente independente do ângulo de corte e espessura do cavaco (Gonçalves, 1990).

Conforme mostrado na Figura 2.22, as componentes da força resultante de usinagem P_u podem ser representadas pela força F atuando ao longo da face da ferramenta e a força N atuando perpendicularmente a face da ferramenta.

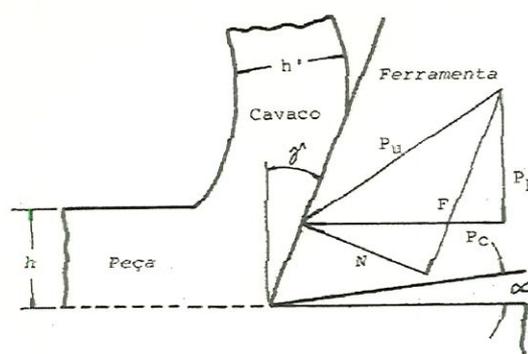


Figura 2.22 - Geometria da ferramenta, deformação do cavaco e forças atuantes no corte ortogonal (Gonçalves, 1990)

A tabela 2.2 apresenta a magnitude do coeficiente de atrito para três espécies de madeira com três teores de umidade.

Tabela 2.2 - Relação do coeficiente de atrito cavaco-ferramenta de corte para três espécies de madeira e teores de umidade (Koch, 1964).

Teor de Umidade %	Espécies de madeira		
	<i>Sugar pine</i>	<i>Yellow birch</i>	<i>White ash</i>
1,5	0,35	0,45	0,51
8,0	0,35	0,41	0,49
Saturado	0,69	0,48	0,42

A tabela acima mostra que, para diferentes espécies pode-se esperar diferentes valores para os coeficientes de atrito. Nota-se também que enquanto o valor para "White ash" decresce com o aumento do teor de umidade, o coeficiente de atrito para o "sugar pine" aumenta com o aumento no teor de umidade.

É provável, mas ainda não demonstrado quantitativamente, que se a face da ferramenta apresentar marcas grosseiras de afiação perpendicularmente ao fluxo de cavaco, o coeficiente de atrito para a interface apresentaria valores superiores aos mostrados na tabela 2.2 e desta forma teria efeito nas componentes da força de usinagem e conseqüentemente na formação do cavaco.

Um baixo coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta promove a formação do cavaco do Tipo I. Por outro lado, um alto coeficiente de atrito promove a formação do cavaco do Tipo III.

f - Vibração lateral induzida

Se para aresta de corte da ferramenta, associa-se um vetor velocidade na direção paralela e outro na direção perpendicular à aresta de corte, tem-se então a ação de corte.

McKenzie (1967) realizou estudos para verificar a influência da vibração lateral sobre a força de corte. Dois experimentos foram realizados empregando um dinamômetro na ferramenta. No primeiro deles, usando "White pine" (madeira mole) na direção 90-0, com teor de umidade de 5%, ângulo de saída da ferramenta de 5°, duas espessuras de cavacos, de 0,76 mm e 1,27 mm e velocidade de corte de 76,2 mm/min. Quando foi introduzida uma vibração lateral de 120 ciclos/segundo na aresta de corte, o autor obteve os seguintes resultados:

Com espessura de cavaco de 0,76 mm, a força paralela (F_c) máxima foi reduzida de 294 N para 236 N, a força normal (F_p) de 44 N para 23 N e o coeficiente de atrito aparente (μ) de 0,24 para 0,19.

Com espessura de cavaco de 1,27 mm, a força paralela (F_c) máxima foi reduzida de 445 N para 303 N, a força normal (F_p) de 44 N para 28 N e o coeficiente de atrito aparente (μ) de 0,19 para 0,18.

A menos da vibração lateral, a superfície de corte associava-se normalmente ao cavaco comprimido do Tipo III e conseqüentemente apareciam na superfície defeitos denominados de fibras flocosas (fuzzy grain). Quando se aplicavam às vibrações laterais na cunha de corte da ferramenta, a superfície de corte ficava relativamente isenta das fibras flocosas como

também de fibras em relevo, embora o tipo de cavaco formado era similar ao Tipo III.

No segundo experimento, registraram-se dados de "Yellow birch" (madeira dura) na direção 90-0, com teor de umidade de 5%, ângulo de saída da ferramenta de 15°, duas espessuras de cavacos, de 0,25 mm e 0,38 mm. Quando foi introduzida uma vibração lateral de 120 ciclos/segundo na aresta de corte, o autor obteve os seguintes resultados:

Com espessura de cavaco de 0,25 mm, a força paralela (F_c) máxima foi reduzida de 190 N para 20 N, a força normal (F_p) de 29 N para aproximadamente -2 N e o coeficiente de atrito aparente (μ) de 0,44 para 0,26.

Com espessura de cavaco de 0,38 mm, a força paralela (F_c) máxima foi reduzida de 276 N para 22 N, a força normal (F_p) de 82 N para aproximadamente -4 N e o coeficiente de atrito aparente (μ) de 0,62 para 0,08. O tipo de cavaco formado variou do Tipo II para o Tipo I.

2.1.2.2 - Fatores relativos às condições de usinagem:

a - Largura de corte (b)

No corte ortogonal, se não considerarmos a influência da resistência da madeira sobre as arestas laterais de corte da ferramenta, a força de corte paralela aumenta na mesma proporção do aumento da largura de corte, ou seja, se a ferramenta é da largura da aresta da ferramenta, então as forças de corte são diretamente proporcionais a largura de corte. (Gonçalves, 1990).

b - Espessura de corte (h)

No corte ortogonal a espessura de corte corresponde à espessura do cavaco

indeformado. Lubkin (apud Koch, 1964), além de outros pesquisadores, tem observado que em dada situação de corte, mudando-se a espessura do cavaco, dois tipos de curvas de força paralela, podem ser desenvolvidas. Para cavacos de pequenas espessuras, a força paralela varia de acordo com a curva:

$$P_c = K \times h^m \times b$$

Onde: P_c = força de corte paralela

K = constante, (madeira, ferramenta, ...)

h = espessura do cavaco indeformado

m = constante entre 1 e 0 (variação observada entre 0,25 e 0,67)

b = largura de corte

Para espessuras maiores, a curva pode ser aproximada a uma função linear de "h", expressada por:

$$P_c = (A + B \times h) \times b$$

As constantes "A" e "B" não são identificadas com facilidade, dado a complexidade do fenômeno.

Em algumas situações a força paralela P_c determinada experimentalmente para cada valor de "h" é definida pela primeira equação. Em outras situações, entretanto, a curva se lineariza após uma certa espessura e continua linear, segundo a segunda equação.

Para ilustrar a aplicação das duas equações, apresentam-se na Figura 2.23 os pontos experimentais tomados por Franz (1958).

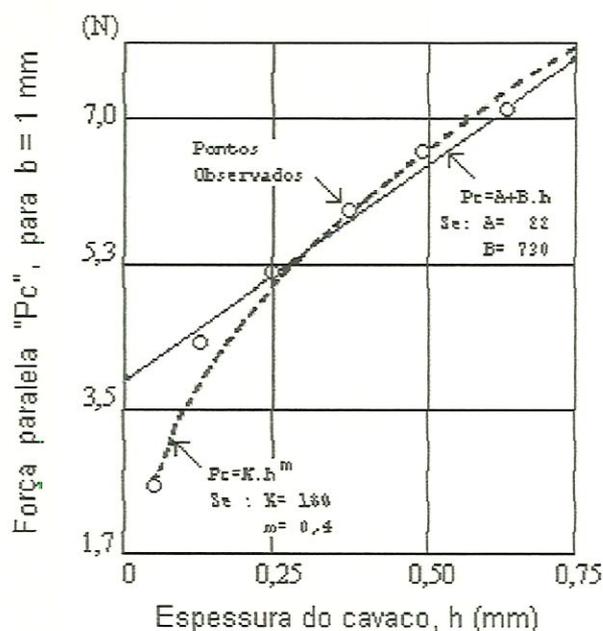


Figura 2.23 - Efeito da espessura do cavaco na força de corte paralela (Koch, apud Gonçalves, 1990).

Nota-se na Figura 2.23 que um aumento na espessura do cavaco não resulta em um aumento nas mesmas proporções da força de corte paralela. Se na situação ilustrada na Figura citada, dobrando-se a espessura do cavaco de 0,25 mm para 0,50 mm, a força paralela sofreu um aumento de apenas 25,7%. Esta relação é refletida nas equações citadas anteriormente.

As forças de corte paralela e normal são interdependentes de outros fatores além da espessura de corte, assim sendo, uma relação geral é difícil de ser estabelecida.

Os dados experimentais obtidos por Franz no corte 90-0 relacionando as forças de corte paralela (P_c) e normal (P_p) com a espessura do cavaco (h), usando três espécies de madeira e três teores de umidade, revelam a dificuldade envolvida em generalizar o efeito da espessura de cavaco como um fator isolado que afeta as forças de corte.

Doi e Yokoyama (1975) também estudaram a influência da espessura do cavaco com as forças de corte, utilizando a espécie de madeira "White fir", teor de umidade de 8,7%, ferramenta de corte com ângulo de folga de 10° e ângulos de saída de 5° , 25° , 45° e 60° e velocidade de corte de 0,2 m/min. Os autores verificaram que o aumento das componentes de força paralela e normal em relação ao aumento da espessura do cavaco foi mais acentuado para as combinações de corte $(Z + R -)$ e $(Z + \theta)$, direção paralela às fibras, do que para $(R + \theta)$ e $(\theta R -)$, direção perpendicular às fibras.

c - Velocidade de corte (V_c)

A relativa importância da velocidade de corte como um fator isolado afetando as forças de corte não é firmemente estabelecida. Com pequenas espessuras de cavaco e baixas densidades, o efeito pode ser da ordem de 5% no aumento da força exercida na ferramenta numa variação da velocidade de corte da ordem de 9,15 m/min. Com elevadas espessuras e altas densidades, um aumento acima de 20% nas forças da ferramenta pode ser encontrado com velocidades de corte variando de bem lentas até 9,15 m/min ou acima.

Os fatores que parecem alterar a resistência de corte da madeira quando a velocidade de corte é aumentada, podem ser descritos como:

- Forças de aceleração no cavaco;
- Mudança na resistência mecânica da madeira, conforme a tensão nesta é alterada;
- Mudança na resistência mecânica da madeira com alterações localizadas de temperatura na peça;
- Alteração no coeficiente de atrito na interface ferramenta-cavaco.

Koch (1964), relata as seguintes constatações de outros pesquisadores:

- Quando a madeira é solicitada em temperaturas em torno de 67 °C, ela perde de 10% a 50% de sua resistência;
- A influência do coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta é afetada quando elevadas velocidades de corte são empregadas no processo de corte;
- Elevadas velocidades de corte minimizam ou anulam a ocorrência de fibras flocosas (fuzzy grain) da superfície da peça usinada.

d - Direção das fibras relativas ao corte

A maioria dos pesquisadores envolvidos com forças de usinagem no corte ortogonal paralelo às fibras tem preferido usar a direção de corte 90-0 e combinação ($Z \pm \theta$), porque essa direção minimiza o efeito confuso dos anéis de crescimento e variações na densidade. Quando ainda não havia informações disponíveis sobre o corte ortogonal puro, Kivimaa (1952) usando um cabeçote de ferramenta rotativa e um dinamômetro numa peça avançada radialmente registrou uma simples experiência sobre esse fator utilizando "Finnish birch" com teor de umidade de 12% e densidade de 0,64 g/cm³. A ferramenta usada tinha ângulo de saída de 35° e ângulo de folga de 10°. Kivimaa registrou que para remover 0,1 mm de espessura de cavaco com a orientação $Z \pm R \pm$ (direção de corte axial e direção de penetração radial), precisava de 8,6% a mais de força paralela quando comparado com a orientação $Z \pm \theta$ (direção de corte axial e direção de penetração tangencial).

Amemiya; Aoyama e Tochigi publicaram em 1981 uma pesquisa sobre força de corte em um único dente de serra, com a aresta da ferramenta

perpendicular ao movimento de corte, onde investigaram os efeitos do ângulo das fibras sobre a força de corte.

Como resultado eles obtiveram que as componentes de força paralela e normal, neste trabalho denominado de F_p e F_n , respectivamente, variam com o ângulo da fibra (η) relativo a direção de corte. A força de corte paralela aumenta com o ângulo das fibras quando este aumenta de 0° a 90° e de 180° a 270° e decresce quando o ângulo das fibras aumenta de 90° a 180° e de 270° a 360° . O valor absoluto da força normal foi máximo para valores de ângulo de 45° , 135° , 225° e 315° e mínimo para 90° e 180° .

A Figura 2.24 apresenta esquematicamente algumas das direções de corte.

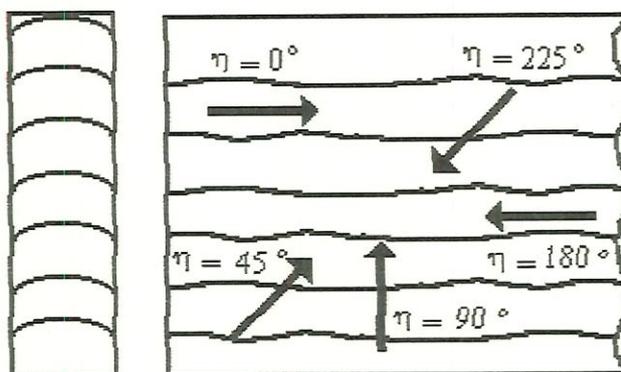


Figura 2.24 - Direções de corte em relação às fibras (Amemiya et al, 1981)

2.1.2.3 - Fatores relativos às características da madeira:

a - Espécies e Densidade

A densidade parece ser a característica mais significativo para ordenar as espécies do ponto de vista das forças de corte. Na ausência de qualquer informação empírica concernente às forças envolvidas, em uma dada condição de usinagem para uma determinada espécie, pode-se fazer uma aproximação comparando-se às informações sobre duas outras espécies de

densidade conhecida através de uma proporcionalidade linear de forças e densidade. Entretanto este procedimento seria uma aproximação grosseira, visto que as interações entre as espécies, teor de umidade, espessura de cavaco e ângulo de saída da ferramenta são fatores complexos demais para serem tão simplesmente representados.

Em vista das grandes variações nas propriedades físicas entre as espécies, não é surpresa que algumas espécies não sigam a relação simples baseada na densidade. Entre os fatores que causam essas diferenças estão a presença de sílica ou outros depósitos de minerais nas células, teor de resina, estrutura microscópica e extensão das fibras.

Em testes envolvendo vinte e uma espécies diferentes de madeira, Kivimaa (1952) registrou uma relação linear entre força de corte paralela e densidade, embora um exame das curvas (Figura 2.25) demonstra que, para o corte 90-0 algumas espécies de madeira requerem mais força de corte paralela que o indicado por outras espécies de densidade superior.

A influência da densidade como fator que altera as forças de corte é ainda algo obscuro. Kivimaa (1952), demonstrou que na usinagem da madeira "Finnish birch" de sete densidade diferentes, variando de $0,55 \text{ g/cm}^3$ a $0,75 \text{ g/cm}^3$, para uma mesma espessura de cavaco, ocorreu uma linearidade entre forças de corte normal e paralela para com a densidade. Estes dados foram observados para todas as direções das fibras e para todos os tipos de aresta cortante das facas, conforme mostra a Figura 2.26.

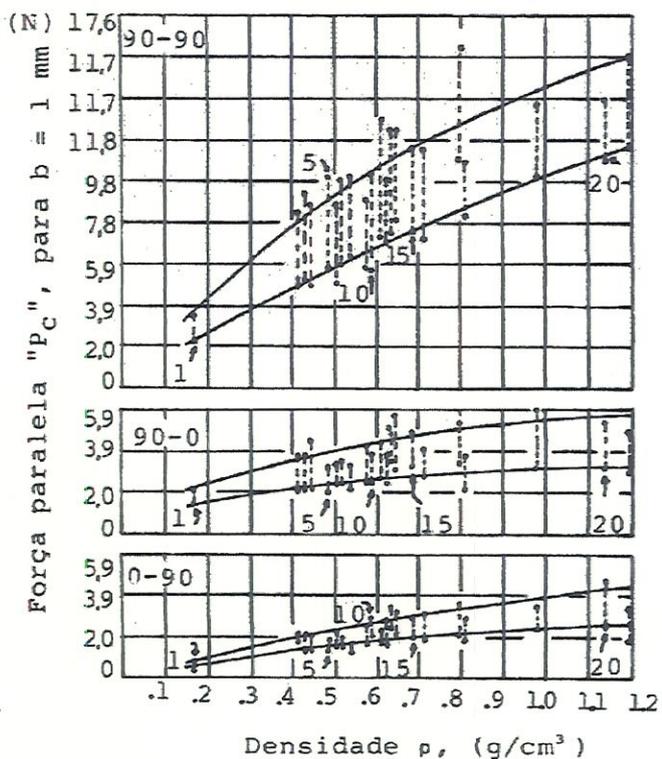


Figura 2.25 - Relação de força de corte paralela com a densidade de 21 espécies de madeira (Kivimaa, 1952)

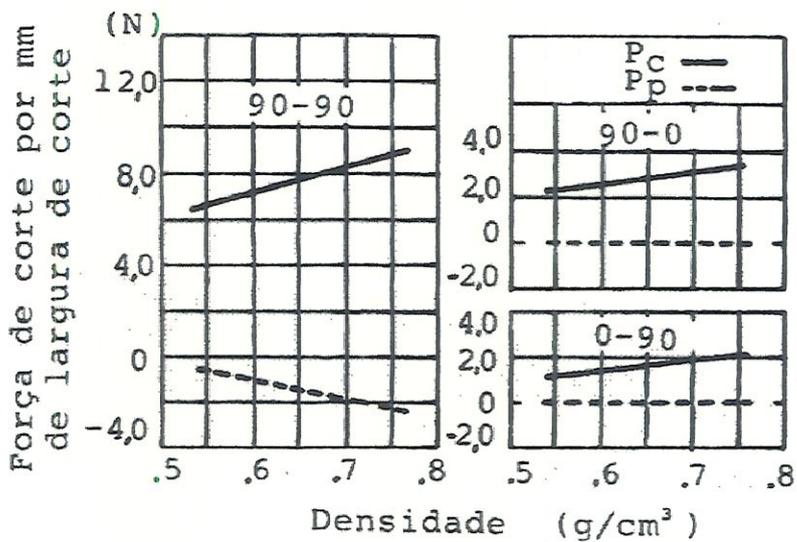


Figura 2.26 - Forças de corte normal e paralela em função da densidade para as três direções de corte (Kivimaa, 1952).

Experimentos realizados por outros pesquisadores não mostraram uma perfeita linearidade, tal como Kivimaa, talvez por adotarem velocidade de corte baixa. As forças de inércia, bem como as propriedades mecânicas da madeira estão envolvidas quando consideramos os efeitos da densidade, de maneira que os pesquisadores usando velocidade de corte baixa não observaram as mesmas reações daquelas quando se usou velocidade de corte alta.

Gonçalves, Rodrigues e Takahashi (1997), estudaram a influência da densidade sobre a força de corte paralela, usinando 10 espécies de madeiras nativas e de reflorestamento. Concluíram que:

- A espécie de "Imbuia" ($\rho=0,60 \text{ g/cm}^3$) apresentou valores de força de corte paralela bem inferiores aos do "Pinho" ($\rho=0,55 \text{ g/cm}^3$) para ângulos de saída de 17° e 24° para todas as velocidades (V_c) e espessuras de corte (h). Em todas condições de ensaio os valores registrados para "Imbuia" foram ligeiramente superiores aos da espécie "Pinus" ($\rho=0,32 \text{ g/cm}^3$);
- A espécie "Castanheira" ($\rho=0,77 \text{ g/cm}^3$), para as três velocidades de corte, apresentou menor força de corte paralela que a registrada para o "Pinho" quando empregados ângulos de saída (γ) de 17° e 24° ;
- Para $\gamma=24^\circ$, a espécie "Angico Preto" ($\rho=1,15 \text{ g/cm}^3$) apresentou valores de força de corte paralela superior a todas espécies quando usinadas com espessura de corte (h) superior a 0,3 mm;
- No corte de "Ipê" ($\rho=1,19 \text{ g/cm}^3$) registrou-se menores esforços que para as espécies "Angico Preto" e "Peroba Rosa" ($\rho=0,97 \text{ g/cm}^3$), para qualquer γ , V_c e h ensaiado;
- Usinando-se "Peroba Rosa", registrou-se elevados valores de força de corte paralela em todas situações de corte, próximos aos obtidos no corte

de "Angico Preto";

- Para espécies "Maçaranduba" ($\rho=1,13 \text{ g/cm}^3$), quanto maior o ângulo de saída, menor a progressão do valor de força de corte paralela em função da espessura de corte (h) quando comparada às espécies de "Angico Preto" e "Peroba Rosa";
- Para a condição de umidade da madeira saturada podemos observar que os valores de força de corte paralela para espécies "Pinho" diminuíram bastante, quando comparados às outras cinco espécies ensaiadas nesta condição, principalmente para ângulos da saída $\gamma=24^\circ$, onde força de corte paralela somente superou os valores registrados para espécie de "Pinus".

Nos ensaios com madeira na condição de umidade seca em estufa, para seis espécies de menor densidade, pode-se concluir:

- Os valores da força de corte paralela para as espécies de "Pinho" e "Eucalipto" elevaram-se substancialmente quando comparados às outras espécies, principalmente para ângulos de saída de 10° e 17° ;
- Para o "Cedro" e "Imbuia" ocorreu um decréscimo de força de corte comparado às outras espécies, principalmente para ângulos de 17° e 24° ;
- A espécie de madeira "Pinus", apesar de menor densidade, apresentou valores de força de corte paralela próximos da média entre as espécies, para todas condições ensaiadas.

b - Teor de umidade

Koch (1964) comenta que, de modo geral as forças de corte para o corte ortogonal na direção 90-0, permanece aproximadamente constante na madeira seca até cerca de 8% de umidade, e então cai para

aproximadamente $1/4$ ou $1/2$ desse valor quando a madeira se aproxima do ponto de saturação.

Franz apud Koch (1964) relaciona alguns resultados da influência do teor de umidade, como descritas a seguir:

- considerando os ângulos de saída de 5° e 30° e as espessuras de cavaco entre 0,051 mm e 0,762 mm, ao se usinar "Yellow birch" a força de corte paralela caiu aproximadamente 12%, enquanto o teor de umidade era aumentado de 1,5% para 8%;
- com os mesmos ângulos de saída e espessuras de corte, ao se usinar "White ash" a força de corte paralela caiu aproximadamente 9% para a mesma variação do teor de umidade;
- para as mesmas condições, ao se usinar "Sugar pine" a força de corte paralela cresceu aproximadamente 2,5% para a mesma variação do teor de umidade. Entretanto se o ângulo de saída de 15° para $h = 3,81$ mm fosse ignorado nos registros, P_c cairia de aproximadamente 5% para o aumento de umidade de 1,5% para 8%.

A Figura 2.27 ilustra o decréscimo de P_c de aproximadamente $2/3$ em seu valor quando comparada a umidade de 1,5% com a umidade de saturação. Esta situação se mantém para ambas espessuras e para todos os ângulos de saída ensaiados por Franz em 1958.

Por outro lado à Figura 2.28 mostra uma situação bastante diferente para o "Sugar pine", quando usinado ortogonalmente com $\gamma \geq 25^\circ$ e $h \geq 0,62$ mm. A madeira saturada de "Sugar pine" exigiu maior força paralela do que a mesma madeira com teor de umidade de 1,5%. Igualmente, para $h \approx 0,13$ mm e $\gamma = 30^\circ$, P_c exigida foi à mesma tanto para teor de umidade de 1,5% como para completamente saturada.

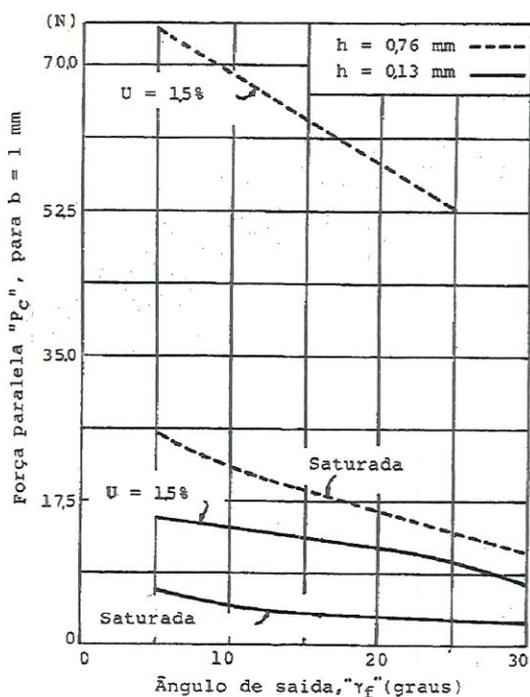


Figura 2.27 - Efeito do teor de umidade sobre a força de corte paralela para espécie "Yellow Birch" (Franz apud Koch, 1964).

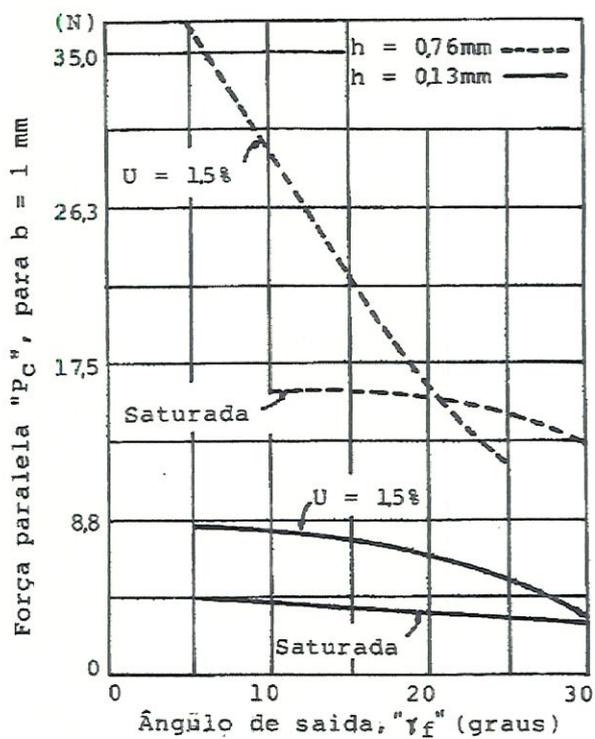


Figura 2.28 - Efeito do teor de umidade sobre a força de corte paralela para espécie "Sugar Pine" (Franz apud Koch, 1964).

As forças de inércia, as propriedades mecânicas e as características de atrito estão envolvidas quando se consideram os efeitos do teor de umidade, de modo que, pesquisadores usando baixas velocidades de corte não observaram as mesmas reações do que usando-se altas velocidades.

O efeito da umidade nas características mecânicas da madeira pode ser genericamente expresso dizendo que a madeira seca é mais resistente do que a madeira úmida. Uma vez que se exceda o ponto de saturação das fibras, nenhuma mudança apreciável nas propriedades mecânicas da madeira a temperaturas normais pode ser observada.

Gonçalves, Rodrigues e Takahashi (1997), estudaram a influência da umidade sobre a força de corte paralela, usando 10 espécies de madeiras nativas e de reflorestamento. Concluíram que:

Conforme verificado a força de corte paralela diminui com o aumento do teor de umidade da madeira. De modo geral, o mesmo ocorreu no presente trabalho, porém algumas exceções registradas são listadas abaixo:

- para a espécie "Cedro" - seca em estufa, os valores de força de corte paralela foram menores que nas condições de umidade seca ao ar e saturada, principalmente para maiores ângulos de saída;
- força de corte paralela para o "Pinho" - seca em estufa, foi menor que na condição seca ao ar para ângulo de saída de 24°;
- as espécies "Imbuia" e "Eucalipto" registraram valores de força de corte paralela aleatórios para ambas as condições, seca ao ar e seca em estufa;
- na condição saturada, "Imbuia" e "Castanheira", apresentaram elevados valores de força de corte paralela para ângulo de saída de 24°, principalmente para elevadas espessuras de corte;

c - Temperatura

Existe limitada informação experimental a respeito da influência da temperatura. Koch (1964) relata que é provável que existam fortes interações entre temperatura da peça, teor de umidade, ângulo de saída e espessura de cavaco, o que limita a verificação experimental isolada deste fator.

A Figura 2.29 mostra o resultado de Kivimaa (1952) em experiência com "Finnish birch" com teor de umidade de 80%. A descontinuidade das curvas a 0 °C é explicada como a diferença na força exigida para cortar madeira congelada a 0 °C comparada à madeira descongelada a 0 °C.

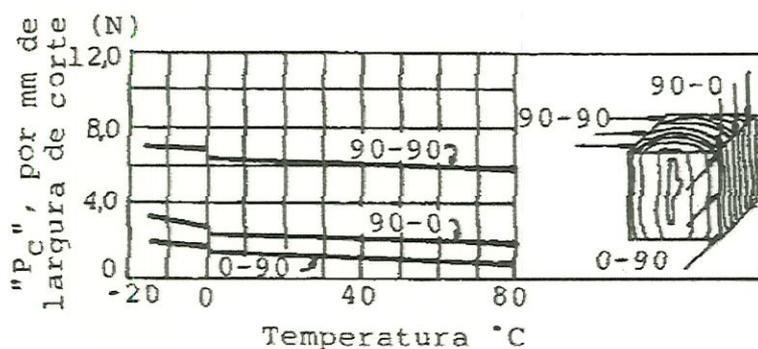


Figura 2.29 - Efeito da temperatura da madeira sobre a força de corte paralela (Kivimaa, 1952).

Nota-se que sob essas condições a força de corte paralela às fibras (90-0) caem cerca de 40% quando a temperatura sobe de -15 °C até 80 °C.

Percentualmente o decréscimo da força de corte paralela é maior na direção 0-90, o que indica que a energia necessária para cortes em laminadores de madeira pode ser reduzida se usarmos toras aquecidas. Em resumo, as propriedades mecânicas da madeira são reduzidas pelo aquecimento. Este efeito é enfatizado mais em madeira úmida que na madeira seca. Quando as temperaturas estiverem abaixo do ponto de congelamento a tendência persiste, a peça de madeira mais fria é mais resistente que uma peça de madeira a uma temperatura mais elevada.

2.2 - Trabalhos relativos a força de corte na usinagem da madeira

Gronlund (1988) realizou um trabalho de modelamento teórico e medição experimental da força de corte, visando conhecer quais parâmetros da ferramenta e da madeira deve ser considerado para se descrever este modelo.

O autor utilizou em seus experimentos um dispositivo composto de um braço giratório onde a amostra é fixada, com esta descrevendo um círculo de 1 m de diâmetro. A ferramenta de corte é montada sobre lâminas por meio de 3 medidores piezoelétricos de força, medindo nas três direções.

Na experimentação, os seguintes parâmetros foram fixados: amostras de madeira com densidade variando de 400 a 600 kg/m³, teor de umidade de 9%, velocidade de corte de 40 m/s, três espessuras de corte (0,05; 0,15 e 0,5 mm), três ângulos de saída da ferramenta de corte (10°, 20° e 30°) para um único ângulo de saída de 10°.

Stewart (1988) aplicou técnicas de regressão linear e não linear em dados de força de corte e desgaste da ferramenta de corte para determinar a geometria ideal (ângulo de saída) para MDF. O ângulo de saída variou de 10° a 40° em incrementos de 5°. Os dados de força de corte e desgastes da ferramenta foram coletados de ensaios de torneamento para três avanços transversais (0,076 - 0,127 e 0,254 mm/rot). Resultados tanto da força de corte como de desgaste apresentaram curvas similares . As forças de corte foram relacionadas linearmente com o desgaste da ferramenta. Os resultados indicaram os ângulos de saída com melhor desempenho de corte entre 10° e 30°.

McKenzie (1991) apresenta um estudo relacionado com duas aplicações práticas no serramento de "Incense cedar" de ripas para fabricação de lápis:

O trabalho teve por objetivos: otimizar as condições de usinagem e comparar propriedades de serramento de outras espécies candidatas a produção de lápis, com as propriedades da espécie de “Incense cedar”.

O autor apresenta um estudo detalhado, envolvendo todas as variáveis que afetam as forças no serramento do “Incense cedar” e comparam com as espécies red fir e white fir, tais como:

Variáveis da madeira - cerne ou albarno, freqüência dos anéis de crescimento, densidade, usinagem no plano radial ou tangencial.

Variáveis de operação - cegamento da ferramenta, taxa de avanço e posição ao longo do arco de corte, ângulo das fibras.

Gonçalves e Teixeira (1995) desenvolveram um trabalho com o objetivo de identificar a influência de alguns parâmetros em relação ao desempenho de corte na usinagem da madeira. Este desempenho é função direta da força de corte medida durante a experimentação. Os parâmetros aqui analisados foram: espécies, espessura de corte e direcionamento das fibras da madeira em relação à direção de corte. Nove diferentes espécies de madeira foram selecionadas numa faixa de variação de densidade entre 0,32 a 1,19 g/cm³. As amostras ensaiadas foram preparadas para uma umidade de equilíbrio (secas ao ar). A direção de corte adotada foi paralela e perpendicular às fibras e as profundidades de corte variaram de 0,1 a 0,9 mm, a cada 0,1 mm.

Quatro séries de ensaio foram realizadas. A primeira série, nove espécies de madeira foram ensaiadas no corte 90-0, para espessuras de corte de 0,3; 0,6 e 0,9 mm. Na segunda série, ensaiou-se as espécies de Imbuia e Pinho na direção perpendicular às fibras (0-90) para as mesmas espessuras de corte adotadas na primeira série. Na terceira série de ensaios, usando-se Imbuia, estabeleceu-se à variação da velocidade de corte como parâmetro de relação para com a força principal de corte na direção 90-0, as velocidades de corte ensaiadas foram de 0,16; 0,23 e 0,31 m/s para

espessuras de corte de 0,2; 0,4 e 0,6 mm. Na quarta série, ensaiou-se amostras de Imbuia na direção 90-0, variando-se a espessura de corte de 0,1 a 0,9 mm a cada 0,1 mm.

As espécies de madeira utilizada no experimento são apresentadas na tabela 2.3, assim como suas densidades aparentes e o teor de umidade na base úmida (UBU).

Tabela 2.3 - Espécies de madeiras utilizadas no ensaio (Gonçalves e Teixeira, 1995).

Espécies	ρ (g/cm ³)	Umidade (%)
Pinus - <i>Pinus</i> spp.	0,32	13,0
Pinho - <i>Araucária angustifolia</i>	0,60	11,9
Cedro - <i>Cedrus angustifolia</i>	0,48	14,6
Castanheira - <i>Bertholletia excelsa</i>	0,77	11,1
Peroba Rosa - <i>Aspidosperma polyneuron</i>	0,98	18,2
Imbuia - <i>Ocotea porosa</i>	0,61	9,5
Ipê - <i>Tabebuia serratifolia</i>	1,19	10,8
Maçaranduba - <i>Manilkara elata</i>	1,12	9,5
Angico Preto - <i>Anadenanthera macrocarpa</i>	1,15	21,5

Da primeira série de ensaios, pode-se constatar as seguintes ocorrências:

- A força de corte média aumentou de forma aproximadamente linear em relação ao aumento da espessura de corte, exceto para as espécies de angico preto e maçaranduba, as quais para uma espessura de 0,9 mm apresentaram um valor elevado de força de corte média em relação às outras espécies.
- De forma aproximada, para a totalidade das espécies de madeira ensaiadas, pode-se constatar uma duplicação do valor da força principal de corte média quando da triplicação de sua espessura de corte de 0,3 mm para 0,9 mm.

Da segunda série de ensaios, apesar de terem sido ensaiadas apenas duas espécies de madeira, os resultados comprovaram a teoria de que os

esforços de corte na direção perpendicular as fibras são maiores que aqueles registrados para a direção paralela, nas mesmas condições de ensaio. Alguns aspectos são comentados a seguir:

- Na usinagem de imbuia, os valores de força de corte média do corte 0-90, para espessuras de corte acima de 0,7 mm, apresentam-se inferiores àqueles obtidos para o corte 90-0 da mesma espécie, nas mesmas condições de ensaio. Este fator se deu muito provavelmente em função do baixo teor de umidade das amostras ensaiadas (9,5 %), em adição às características de posicionamento das fibras desta espécie.
- Na usinagem das amostras de Pinho, pode-se contatar um aumento médio de aproximadamente 34 % da força de corte média para o corte perpendicular 0-90 em relação ao corte paralelo às fibras 90-0.

Na terceira série de ensaios, onde se relacionou força de corte média e espessura para três valores de velocidade de corte na usinagem de mostras de "Imbuia", pode-se constatar que a força de corte principal média decresceu com o aumento da velocidade de corte. Para um aumento de aproximadamente 94 % na velocidade de corte, a força de corte média decresceu em média 28,5 % para a faixa de espessura de corte ensaiada (0,2 a 0,6 mm).

Para a última série de ensaios, relação de força de corte média com espessura de corte na usinagem de "Imbuia" na direção 90-0, pode-se contatar:

- Para um aumento da espessura de corte de 0,1 a 0,4 mm, força de corte média aumentou 94 %;
- Na faixa de espessura intermediária (0,4 a 0,7 mm), o aumento de força de corte média variou em apenas 18,7 %;

- Para espessuras a partir de 0,7 mm, o valor de força de corte média elevou-se de forma brusca, aumentando em 46 % quando se aumentou h de 0,7 a 0,9 mm.

Sawada e Otha (1997) utilizaram o EDEM (Extended Distinct Element Method) para simular a formação do cavaco no corte ortogonal da madeira.

Em trabalho anterior, os autores utilizaram este método no processo de corte longitudinal da madeira, mostrando que o fendilhamento à frente da ferramenta poderia ser realizado por simulação. No entanto, a análise foi limitada para as condições elásticas, então a grande deformação do cavaco não poderia ser realizada.

Aqui, os autores introduziram uma rotina de deformação plástica no programa EDEM e examinaram a possibilidade de simular a formação do cavaco no corte ortogonal paralelo ou perpendicular às fibras. A forma do cavaco, as forças de corte e a distribuição de tensões foram bem reproduzidas por este método. Os autores realizaram experiências práticas e compararam com as simuladas pelo EDEM, que demonstrou resultados satisfatórios.

Como conclusão, os autores mostram que este método é uma ferramenta útil para simular o processo de formação do cavaco na usinagem da madeira e assim estudar todo o processo utilizando ferramentas computacionais, através de modelamento matemático.

Gonçalves, Takahashi e Rodrigues (1997) realizaram um estudo, objetivando-se determinar os valores da pressão de corte " K_s ", pressão específica de corte para área da secção transversal de cavaco de 1 mm^2 " K_{s1} " ambas constantes, características do material e o coeficiente adimensional " $1-z$ " que representa os parâmetros que afetam o desempenho de corte para a direção paralela às fibras (90-0). Dez espécies de madeiras nativas e de reflorestamento de diferentes densidades foram testadas. Os

seguintes parâmetros de corte foram estudados: espessura do cavaco (h), ângulos de saída da ferramenta (γ) e velocidade de corte (V_c), na situação de corte ortogonal para e três teores de umidade (seca ao ar, saturada em água e seca em estufa).

Gonçalves, Hernández e Néri (1998) realizaram um trabalho onde apresentam resultados de forças de corte obtidas para três espécies de “eucalipto”, com densidades diferentes.

As espécies de madeira estudadas foram: *Eucalyptus citriodora* ($\rho = 0,905 \text{ g/cm}^3$), *Eucalyptus saligna* ($\rho = 0,559 \text{ g/cm}^3$) e *Eucalyptus grandis* ($\rho = 0,422 \text{ g/cm}^3$). Na medição da força de corte, foi utilizado um dinamômetro de anéis ortogonais, montado em uma fresadora provida de mesa com movimento vertical e horizontal. As amostras de madeira foram ensaiadas em duas direções em relação às fibras, corte 90-0 e 90-90. Para os ensaios de corte, utilizou-se quatro espessuras de corte, 0,36 mm, 0,76 mm, 1,14 mm e 1,53 mm e três ângulos de saída, 10°, 20° e 30° (corte 90-0) e 20°, 30° e 40° (corte 90-90). A velocidade de corte foi constante e igual a 30mm/min. Para o corte ortogonal 90-0, os autores concluíram que:

Corte ortogonal 90-0

- os três tipos de cavacos podem ser reconhecidos através dos resultados obtidos neste trabalho. As correlações encontradas nas regressões que estimam as forças em função da espessura de corte e da densidade da madeira foram menores para o corte 90-0 que para o 90-90. Isto demonstra que, para este tipo de corte, o tipo de cavaco formado é de grande importância nas forças geradas;
- melhor qualidade de superfície geralmente coincide com o cavaco tipo II;
- há uma relação positiva entre a força paralela média e a espessura de corte, de maneira que as forças crescem com o aumento da espessura de corte. Este efeito é ampliado com a diminuição do ângulo de saída;

- há uma relação positiva entre a força paralela média e a densidade da madeira, de maneira que as forças crescem à medida que as densidades crescem. Este efeito foi variável para os três ângulos estudados;
- há uma relação positiva entre a força normal média e a espessura de corte, demonstrando que as forças aumentam com o acréscimo da espessura;
- para os corpos de prova radiais de *Eucalyptus grandis*, as forças normais médias foram negativas para todos os ângulos de saída e todas as espessuras de corte. Uma força normal negativa indica que o instrumento de corte tende a empurrar a peça de madeira;
- para o *Eucalyptus saligna*, a força normal média passou de negativa para positiva entre ângulos de 20° e 30° para corpos de prova tangenciais e radiais.

Para o *Eucalyptus citriodora*, as forças normais médias passaram de negativa (ferramenta de corte comprimindo a madeira) para positivo quando os ângulos passaram entre 10° e 20°, tanto para os corpos de provas radiais quanto para os tangenciais.

Rodrigues, Gonçalves e Mussi (1998) estudaram a usinabilidade das espécies pinus, pinho e eucalipto, através da medição da força paralela de corte nas direções paralela e perpendicular às fibras, nas condições de umidade seca ao ar e seca em estufa. Os parâmetros fixados neste experimento foram: ângulos de saída de 10°, 17° e 24°, velocidades de corte de 0,12 m/s, 0,17 m/s e 0,24 m/s e espessuras de corte variando de 0,1 mm a 0,7 mm, a cada 0,1 mm.

Os autores concluíram que:

- em todas as situações de corte ensaiadas, a espécie "Pinus" apresentou os menores valores da força paralela de corte requerida, porém com menor diferença para as outras espécies na condição de umidade seca em estufa;
- na condição seca ao ar, o comportamento registrado para as espécies "Pinho" e "Eucalipto" indicam que para ângulos de saída elevados os valores da força de corte se aproximam e, conforme se diminuiu o valor desse ângulo, a espécie "Eucalipto" necessitou maiores esforços que o Pinho, aumentando esta diferença significativamente para o ângulo de 10°

Takahashi, Gonçalves e Souza (1998) realizaram experimentos de corte das espécies de madeira "Grubixá" (*Micropholis sp*) e "Imbuia" (*Ocotea porosa*), nas condições de umidade seca ao ar e seca em estufa, com a finalidade de verificar comparativamente o desempenho de corte nos processos de usinagem em direções de corte paralela e perpendicular às fibras da madeira.

Dos ensaios, os autores concluíram que para a mesma área de corte, na condição da madeira seca ao ar, os esforços de corte foram bem superiores (próximos a 100%) para a espécie "Imbuia" ($\rho = 0,61 \text{ g/cm}^3$), em relação ao "Grubixá" ($\rho = 0,70 \text{ g/cm}^3$), para todos os ângulos de saída ensaiados. Já na condição seca em estufa, a situação se inverteu, registrando-se esforços bem superiores para o corte de grubixá, para todos os ângulos ensaiados.

Pode-se observar nos ensaios, que na condição da madeira seca em estufa, os esforços foram aproximadamente duas vezes maiores que os esforços na condição da madeira seca ao ar, com exceção do corte de imbuia com ferramenta com ângulo de 24°.

A partir da análise das curvas de pressão específica de corte versus espessura de corte, os autores citam que para o corte paralelo às fibras, o melhor desempenho se deu para a espécie de madeira “Grubixá”, na condição de madeira seca ao ar, em todas as situações de corte ensaiadas. Na condição de umidade seca em estufa, o melhor desempenho se deu para a espécie de madeira “Imbuia”, na totalidade dos ensaios.

O parâmetro velocidade de corte apresentou pouca ou quase nenhuma influência sobre os valores da força paralela de corte, podendo ser desprezado para pequenas variações quando relacionado à pressão específica de corte.

2.3 - Emissão acústica

2.3.1 - Conceituação

A emissão acústica pode ser entendida como sendo ondas de tensão geradas por atuações dinâmicas sobre os materiais (Liptai et al, 1972, Apud Vieira Jr., 1996). Conforme o material é submetido a um estímulo externo qualquer, como a formação do cavaco, o atrito entre ferramenta e peça ou mesmo o simples contato, ocorre a deformação e o novo arranjo da sua estrutura cristalina (Blum e Dornfeld, 1990). Isso é capaz de liberar uma quantidade de energia suficiente para produzir ondas de tensão que provocam mais deslocamentos sobre a superfície do material. Apesar da afirmação feita por Gillis (1972), de que tais deslocamentos são geralmente assumidos como "sem importância", eles são as principais fontes de geração da emissão acústica.

Lemaster e Dornfeld (1993) já utilizam a definição de emissão acústica como sendo a energia elástica que é espontaneamente liberada pelos materiais quando eles sofrem deformação. Com baixa intensidade e alta frequência

(100kHz – 1MHz) as ondas elásticas propagam-se em todas as direções, sendo então capturadas por um detector na superfície da peça-obra ou no suporte da ferramenta na operação de usinagem. O detector de emissão acústica normalmente usa um transdutor piezoelétrico para converter as velocidades das ondas ou deslocamentos em sinais elétricos, os quais são então amplificados e processados.

Esses autores confirmam que a emissão acústica gerada durante o processo de usinagem contém informações suficientes para comprovar a eficiência do processo de usinagem e condições de seus componentes. A emissão acústica tem sido sensível para uma variedade de condições de processos de fabricação, incluindo a formação de cavaco no torneamento, fresamento e furação; monitoramento das condições da ferramenta, como desgaste e detecção de quebra, além do atrito e fenômenos de contato das superfícies (Kannatey-Asibu Jr e Dornfeld, 1982; Jiaa e Dornfeld, 1990).

Dunegan e Green, (1972), identificaram alguns fatores que podem influenciar a amplitude do sinal de emissão acústica. Alguns desses fatores, relacionados diretamente com o material estudado são apresentados na Tabela 2.4. A proposta apresentada pela pesquisa de Dunegan e Green não foi discutir a ação de cada um dos fatores apresentados, mas apenas a sua identificação e um alerta indicativo de sua influência sobre o sinal de emissão acústica.

A emissão acústica diferencia-se de sinais comuns de vibração pelo fato de que a frequência dessas ondas atinge valores superiores a 15 kHz, e que os deslocamentos não provocam necessariamente uma movimentação física do material, apenas deslocamentos na estrutura cristalina. Além disso, a sua faixa de frequência ocorre onde vibrações mecânicas estruturais não podem ser captadas. A Figura 2.30 apresenta uma comparação entre as frequências dos sinais de emissão acústica e vários tipos de ondas, como as de radio e as luminosas.

Tabela 2.4 - Fatores que influenciam a amplitude do sinal de emissão acústica (Dunegan e Green, 1972).

Fatores que influenciam a amplitude da emissão acústica	Fatores que reduzem a amplitude da emissão acústica
Anisotropia	Isotropia
Não homogeneidade do material	Homogeneidade do material
Formação de fase martensítica	Difusão controlada de fase
Propagação de trinca	Deformação plástica
Tamanho de grão grande na estrutura	Tamanho de grão pequeno na estrutura
Tensão residual alta	Tensão residual baixa

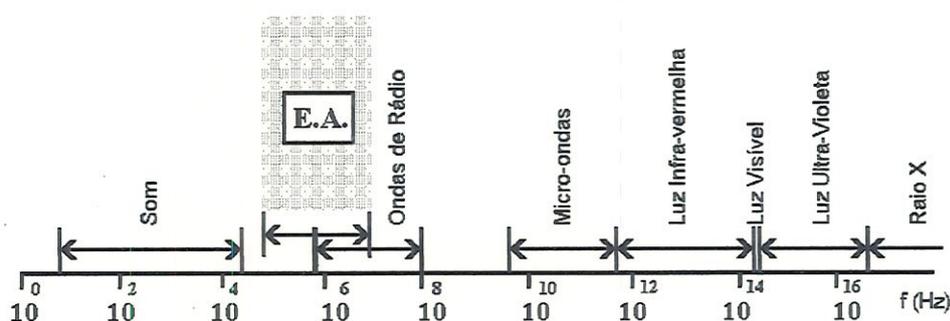


Figura 2.30 - Comparação das faixas de frequência da emissão acústica e outros tipos de onda (Blum e Dornfeld, 1990).

Outra diferenciação feita por Diniz (apud Vieira Jr., 1996), é com relação aos sinais de ultra-som, com os quais a emissão acústica poderia ser confundida. Enquanto o ultra-som pode ser gerado por uma fonte externa ao material e transmitida para o seu interior, inclusive com o seu sinal podendo ser controlado em termos de amplitude e frequência, a emissão acústica é indiferente à excitação externa que o material sofre, permitindo que a sua frequência e intensidade sejam controladas apenas pela excitação (ex: fricção entre dois materiais ou ainda um choque mecânico).

A Figura 2.30 apresenta uma sobreposição das frequências dos sinais de emissão acústica e das ondas de rádio, o que à primeira vista pode parecer ser uma fonte de interferência. Esta interferência não ocorre porque os dois tipos de ondas são diferentes, pois enquanto as ondas de emissão acústica são ondas mecânicas, as ondas são ondas eletromagnéticas.

Uma vantagem que Blum e Dornfeld (1990) apresentam é com relação ao posicionamento do sensor de emissão acústica durante o monitoramento do processo. Por tratar-se de um sinal que se propaga tanto longitudinalmente como transversalmente na estrutura do material, a emissão acústica permite que o transdutor seja colocado em qualquer posição, desde que em contato com o material e em uma localização onde não ocorram muitas interfaces mecânicas. Essas interfaces tendem a distorcer e enfraquecer o sinal, dificultando a sua avaliação. Moriwaki (apud Vieira Jr., 1996) afirma que os sinais de emissão acústica podem ser associados à deformação plástica dos materiais (sinal tipo contínuo) ou ao crescimento de trincas nos materiais (sinais de pico). A formação do cavaco está associada a sinais contínuos, enquanto que o rompimento do cavaco e a quebra ou lascamento da ferramenta se associa aos sinais de pico.

Em um processo de usinagem que utiliza ferramenta com aresta de corte de geometria definida, tais como torneamento, fresamento, etc., a formação do cavaco é uma das fontes geradoras de sinais de emissão acústica, conforme mostrado na Figura 2.31. Segundo Dornfeld (1988), na zona primária de deformação se dá a formação do cavaco propriamente dita, com cisalhamento do material; na zona secundária ocorre o contato entre cavaco e ferramenta; e na zona terciária, ocorre o contato entre a ferramenta e a peça. As três regiões de deformação são associadas à geração de sinais do tipo contínuo e a quebra do cavaco se associa à geração de sinais de pico.

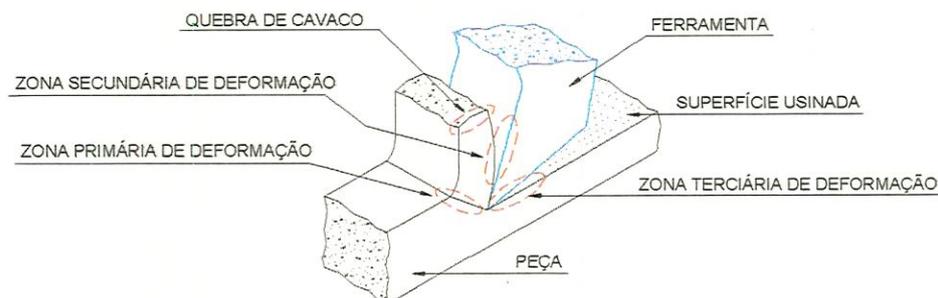


Figura 2.31 - Identificação das zonas de geração de emissão acústica em processos de usinagem que utilizam ferramentas com aresta de corte com geometria definida (Dornfeld, 1988).

2.3.2 - Uso geral de emissão acústica

As técnicas de emissão acústica foram muito utilizadas nas décadas de 1960 e 1970 como fonte potencial de informação sobre integridade estrutural de materiais (Blum e Dornfeld, 1990). Por tratar-se de um método não destrutivo de avaliação que, até então, já havia passado por mais de duas décadas de desenvolvimento (Hartbower et al, 1972), ensaios com o uso de emissão acústica passaram a ser largamente utilizados nos estudos de fadiga e fratura de materiais sólidos e no monitoramento da propagação de trincas.

No início da década de 1970, a "American Society for Testing and Materials" (ASTM) realizou um simpósio sobre emissão acústica, onde foram apresentadas aplicações das técnicas acústicas em monitoramento do crescimento de micro-trincas (Tetelman e Chow, 1972), em análise da mecânica de deslocamento das rochas (Hardy, 1972), na análise da formação da martensita em aços-liga (Speich e Fisher, 1972), e na inspeção de peças soldadas (Hartbower et al, 1972), entre outras também citadas por



Hutton, em trabalho publicado em 1972 (testes hidrostáticos, verificação da integridade de peças feitas em cerâmicas e madeiras, monitoramento de vazamentos em vasos de pressão, etc.).

Hutton (1972) afirmou ainda que, para um sistema de monitoramento via emissão acústica ser aplicável, este deveria ter, entre outras, as seguintes características:

- detectar e localizar a origem do sinal acústico nos materiais analisados;
- distinguir ruídos causados por fontes elétricas e mecânicas de interferência;
- captar sinais bem definidos em estruturas com formas complexas como vasos de pressão com estrangulamentos, paredes com espessura elevada, locais de difícil acesso etc.

2.3.3 - Emissão acústica e desgaste da ferramenta de corte

Um dos grandes problemas identificados nos processos de usinagem como o torneamento e o fresamento é o desgaste da ferramenta. Segundo Liang e Dornfeld (1987) o desgaste da ferramenta promove a queda da qualidade da superfície usinada e provoca alterações indesejáveis e não preditíveis na geometria da peça. Assim, as atenções se voltaram para a solução desse problema usando as mais variadas metodologias, mas neste trabalho, apenas as que se utilizaram de técnicas de monitoramento via emissão acústica são abordadas.

Lemaster et al. (1985) realizaram um estudo para determinar o grau de mudança na emissão acústica durante o corte, quando a ferramenta está desgastada. Uma ferramenta foi gasta no torneamento de toras de "green white fir", num torno com avanço automático. Verificou-se que a relação entre o sinal de emissão acústica e a quantidade de madeira cortada foi

aproximadamente linear para os estágios iniciais de desgaste da ferramenta, correspondendo a um desgaste de flanco de 0,41 mm. Quando a ferramenta tornou-se severamente gasta, o nível de emissão acústica caiu drasticamente e uma relação assintótica entre os parâmetros da emissão acústica e o comprimento cortado torna-se evidente. Isto é um contraste com as forças de corte, as quais tornam-se mais variáveis quando a ferramenta torna-se severamente desgastada.

Liang e Dornfeld (1987) verificaram que o sinal de emissão acústica no processo de torneamento vai sofrendo alterações conforme o desgaste de flanco da ferramenta de corte vai crescendo; o monitoramento do sinal permite identificar diferentes níveis de desgaste. A calibração dos parâmetros de controle poderia ser feita através de uma determinada condição de operação, não sendo necessária uma calibração específica para cada conjunto de parâmetros de corte utilizados. Isso permitiria que, com uma pequena margem de erro e pouca necessidade de parâmetros padronizados, o desgaste de flanco fosse controlado, evitando-se os resultados indesejados.

O desgaste de ferramenta também tem sido objeto de estudo de Lan e Naerheim (1985) que procuraram identificar outras influências sobre o sinal de emissão acústica no processo de torneamento. Como a emissão acústica apresenta-se sensível às deformações plásticas ocorridas no material durante a usinagem, os pesquisadores identificaram que alterações no ângulo de saída da ferramenta poderiam ser controladas com auxílio desse sinal, uma vez que com o desgaste da ferramenta, o referido ângulo torna-se menos agudo e provoca maior deformação no material em detrimento da remoção. Lan e Naerheim ainda identificaram que o sinal de emissão acústica apresenta grande sensibilidade às alterações na velocidade de corte, mas não indicaram concretamente nenhum comportamento.

Blum e Inasaki (1990) monitoraram a influência dos parâmetros de corte sobre o sinal de emissão acústica. Neste trabalho os autores observaram que a emissão acústica sofre um aumento quando a velocidade de corte aumenta, uma redução do sinal quando o avanço aumenta e uma indiferença do sinal quanto às variações na profundidade de corte. O aumento do sinal de emissão acústica com o aumento da velocidade de corte explica-se pelo fato de que a energia consumida durante o corte sofre um acréscimo e que o surgimento do sinal de emissão acústica é decorrente da liberação de energia provocada por deformações do material durante o processo de corte. Parte da energia mecânica do corte transforma-se em energia acústica, fazendo com que o sinal aumente sua intensidade. Já o aumento do avanço faz com que a ocorrência de deformações no material diminua, fazendo a emissão acústica cair da mesma forma.

Dornfeld (1992), reporta que nos processos convencionais de usinagem que utilizam ferramentas com aresta de corte de geometria definida, a emissão acústica possibilita a detecção do desgaste e fratura da ferramenta, falhas na lubrificação do processo, formação do cavaco e vibrações. A ocorrência desses fenômenos está relacionada aos seguintes defeitos que podem ser encontrados nas peças: aresta postiça de corte, o acabamento superficial deficiente e variações dimensionais. Assim, utilizando-se à emissão acústica no monitoramento dos processos de usinagem, os fenômenos citados acima poderiam ser evitados e, conseqüentemente, os defeitos também.

No fresamento ocorre ainda a influência dos sinais periódicos típicos do processo, como por exemplo, a entrada e a saída da ferramenta, conforme Diniz (apud Vieira Jr., 1996). Para evitar que esses sinais interfiram no monitoramento do processo alguns pesquisadores utilizaram técnicas matemáticas para a filtragem do sinal. Diei e Dornfeld (apud Vieira Jr., 1996) usaram a “média no domínio do tempo” (“time domain averaging”) para eliminar as perturbações causadas no sinal de emissão acústica pelos ruídos do processo. Já Altintas (apud Vieira Jr., 1996) utilizou-se de séries temporais.

Dornfeld e Lemaster (1982) realizaram um trabalho onde verificaram a sensibilidade do monitoramento por emissão acústica na identificação do desgaste da ferramenta de corte e força de corte. Para todas as condições de corte, a força horizontal aumentou enquanto a "AE count rate" e a voltagem RMS diminuiu com um aumento do desgaste da ferramenta. Verificou-se também um aumento na variação do sinal de emissão acústica para um aumento no tempo de corte. Os ensaios contínuos de desgaste, os quais geram ferramentas severamente desgastadas, têm a intenção de produzir uma mudança maior na energia da emissão acústica. O decréscimo do sinal de emissão acústica para um aumento no desgaste da ferramenta de corte, reflete a mudança no processo de formação do cavaco com a ferramenta desgastada. O cavaco produzido muda de um cavaco curto e descontínuo quando a aresta está afiada para um cavaco longo e contínuo quando a aresta está desgastada.

2.3.4 - Emissão acústica no processo de usinagem

Como já visto, a técnica de monitoramento por emissão acústica vem sendo largamente utilizada nos processos de usinagem, em particular na retificação, onde vem sendo empregada para monitorar diversos fatores que afetam o resultado do processo, como desgaste e empastamento do rebolo (Inasaki, 1985; Dornfeld e Cai, 1984; Mendizabal, 1991), dressagem (Oliveira et al, 1994a; König e Meyen, 1990; König e Klumpen, 1993; Brinksmeier, 1993), acabamento (Chang e Dornfeld, 1993), detecção de contato entre rebolo e peça e controle de avanço em retificação por mergulho (Blum e Dornfeld, 1990). Além disso, Oliveira et al. (1994b), afirma que também é possível aplicar as técnicas de emissão acústica para a detecção do contato entre dressador e rebolo, para o controle do desgaste e perda de seu perfil e também para correção de deformações térmicas ocorridas nas retificadoras durante o processo (deriva térmica).

A disseminação do uso de técnicas de emissão acústica no monitoramento dos processos convencionais de usinagem, em especial o processo de retificação, pode ser creditado a alguns fatores citados por Liang e Dornfeld (1987) como:

- a relação direta que as fontes de emissão acústica apresentam com o processo de separação do material durante a usinagem da peça;
- captação de sinais de alta frequência (entre 50 kHz a 1 MHz), ou seja, a emissão acústica não sofre influência indesejada de outras fontes sonoras do ambiente de trabalho. Além disso, com o auxílio de um filtro de frequências é possível eliminar contaminações que o sinal possa sofrer;
- utilização de um método não intrusivo para o monitoramento de processos, uma vez que o sensor pode ser colocado fora da região onde ocorre o corte de material, bastando apenas que haja contato físico entre a peça ou a ferramenta e o local de colocação do sensor para a propagação do sinal;
- baixo custo e fácil manuseio dos sensores de emissão acústica e da aparelhagem para o tratamento do sinal.

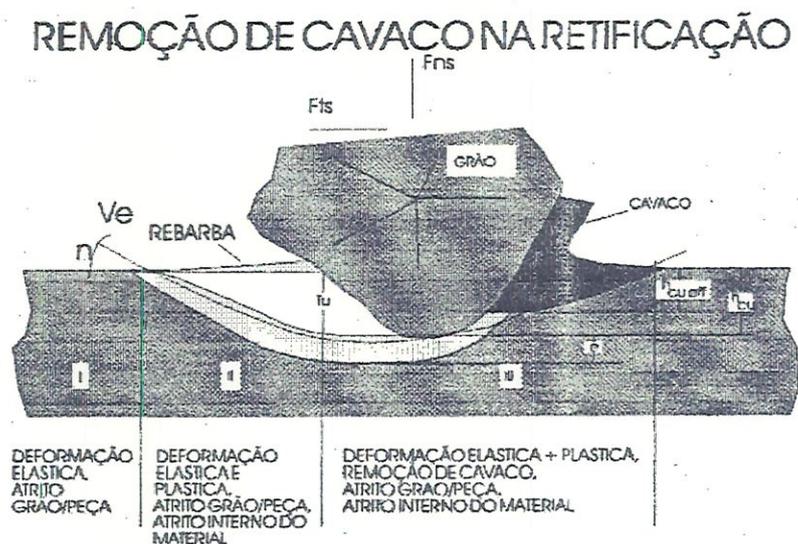


Figura 2.32- Fases da formação do cavaco na retificação (König apud Vieira Jr., 1996).

No processo de retificação as principais fontes de geração de emissão acústica podem ser divididas nas três fases de formação do cavaco descritas por König (apud Vieira Jr., 1996). A Figura 2.32 mostra essas três fases: na primeira fase, ocorrem deformações elásticas, atrito grão/peça; na segunda fase ocorrem deformações elásticas e plásticas, atrito grão/peça e atrito interno do material; na terceira fase na separação do cavaco, ocorrem deformações elásticas e plásticas, atrito grão/peça e atrito interno do material.

Nas operações de retificação a emissão acústica vem sendo utilizada como uma importante fonte de informação para o monitoramento e o controle do processo, principalmente com a grande difusão que as máquinas retificadoras a comando numérico computadorizado (CNC) tiveram no meio industrial (Oliveira et al, 1995).

Nas operações de torneamento, também o monitoramento por emissão acústica está bastante difundido. Yee et al. (1986) relatam um trabalho realizado em torno com o objetivo de identificar formas de cavaco em três tipos de metais (alumínio 6061-T6, aço carbono 1018 e aço liga 4340). Em continuidade a este, Yee (1997) dando seqüência a este trabalho, monitorou a dependência do sinal de emissão acústica no processo de torneamento utilizando outros três tipos de materiais (aço inox 303 e 304 e liga de cobre). Os autores concluíram que o equipamento desenvolvido e utilizado nestes ensaios pode detectar diferenças na forma do cavaco. O resultado foi melhor quando o material de ensaio foi um metal de boa usabilidade (alumínio e aço carbono), pois o cavaco é mais difícil de romper.

Dornfeld & Lemaster (1982) realizaram uma pesquisa em emissão acústica com o intuito de desenvolver um procedimento para seu uso em uma operação de usinagem como um método para monitorar continuamente o desgaste da ferramenta. A pesquisa foi desenvolvida em três fases. A primeira fase consistiu em identificar as principais fontes de emissão acústica na operação de usinagem da madeira (Lemaster et al, 1982). A

segunda fase identificou o resultado das condições de corte na geração da emissão acústica. Devido à natureza do projeto experimental usado para conduzir os testes, o efeito geral do desgaste da ferramenta sobre a emissão acústica também foi observado. As observações feitas foram de tendências gerais ou ordenação sendo que nenhum desgaste foi medido na ferramenta. A coleção de dados de desgastes da ferramenta realizada através de uma série extensiva de ensaios é a terceira fase do estudo de emissão acústica.

Nesta segunda fase determinou-se o efeito dos parâmetros de corte (velocidade corte, velocidade avanço e profundidade de corte) na geração da emissão acústica. O estudo consistiu do torneamento com ferramenta de gume único de HSS com ângulos de saída e folga de 5 graus e da aresta lateral de 3 graus, de uma tora de madeira, "white fir" saturada, com diâmetro, de aproximadamente 15,2 cm e 121,9 cm de comprimento, usando um torno mecânico equipado com avanço automático. A ferramenta de corte foi presa em um suporte instrumentado com "strain gauges" para permitir a medição das forças de usinagem em duas direções, vertical e horizontal. Um transdutor de emissão acústica com frequência de ressonância de 175 kHz foi fixado no suporte da ferramenta. Foram medidas, tanto a "AE count rate" como a voltagem RMS. As forças de corte e os sinais de emissão acústica foram digitalizados e amostrados para uma taxa de 5 Hz.

Um percurso de corte de 762 mm foi usinado para cada condição de corte. Isto foi equivalente a aproximadamente 2865 metros lineares de comprimento da hélice. Variou-se um dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço ou profundidade) enquanto os dois outros permaneceram constante. Cada condição de corte foi repetida quatro vezes, usando uma ferramenta nova para cada corte.

Os resultados foram separados em quatro grupos, sendo que os três primeiros grupos incluem os efeitos da variação dos parâmetros de corte (profundidade de corte, velocidade e avanço) no sinal de saída da emissão

acústica e o quarto grupo mostra o efeito do desgaste da ferramenta no sinal de saída da emissão acústica.

Variação da Profundidade de corte - Para o 1º grupo de resultados a prof corte foi variada usando o seguinte conjunto: 1,25 mm; 1,50 mm; 1,75 mm; 2,00 mm. A velocidade de corte foi mantida constante para 3 m/s e a velocidade de avanço foi mantida constante para 0,127 mm/volta. Estatisticamente a mudança na profundidade de corte teve um insignificante efeito na força de corte horizontal, mas um efeito significativo no sinal de emissão acústica, tanto na "AE count rate" como na voltagem RMS. A emissão acústica mostrou-se sensível para a profundidade de corte, porém sendo difícil determinar uma relação clara entre a profundidade de corte e os sinais de emissão acústica característicos. A Figura 2.33 apresenta a voltagem RMS para quatro diferentes profundidades de corte.

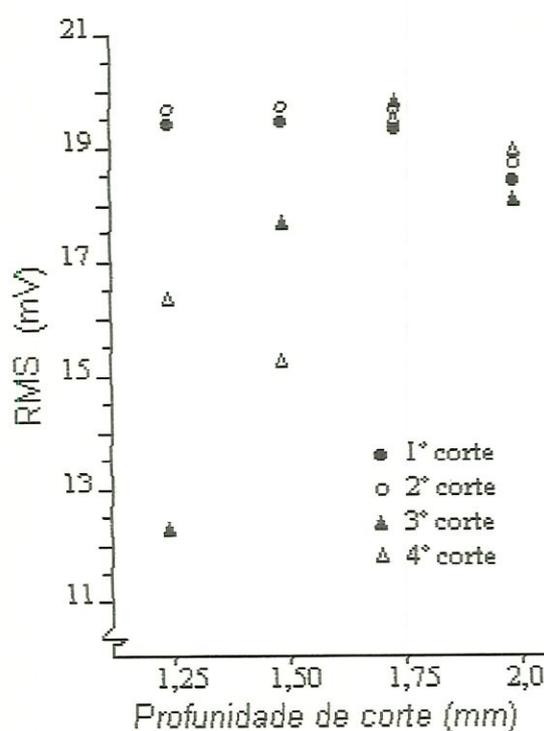


Figura 2.33 - Variação da voltagem RMS para quatro profundidades de corte (Dornfeld e Lemaster, 1982).

Varição da Velocidade de Corte - Para a mudança na velocidade corte a "AE count rate" e voltagem RMS, mostraram mudanças significativas, ao passo que a força horizontal mostrou pequena mudança. A Figura 2.34 apresenta a voltagem RMS para quatro diferentes velocidades de corte, variando de 2 a 4 m/s, velocidade de avanço constante de 0,127 mm/volta e profundidade de corte de 1,5 mm. A tendência geral foi um aumento na voltagem RMS para um aumento na velocidade corte. Uma tendência similar foi observada para "AE count rate" e a velocidade corte.

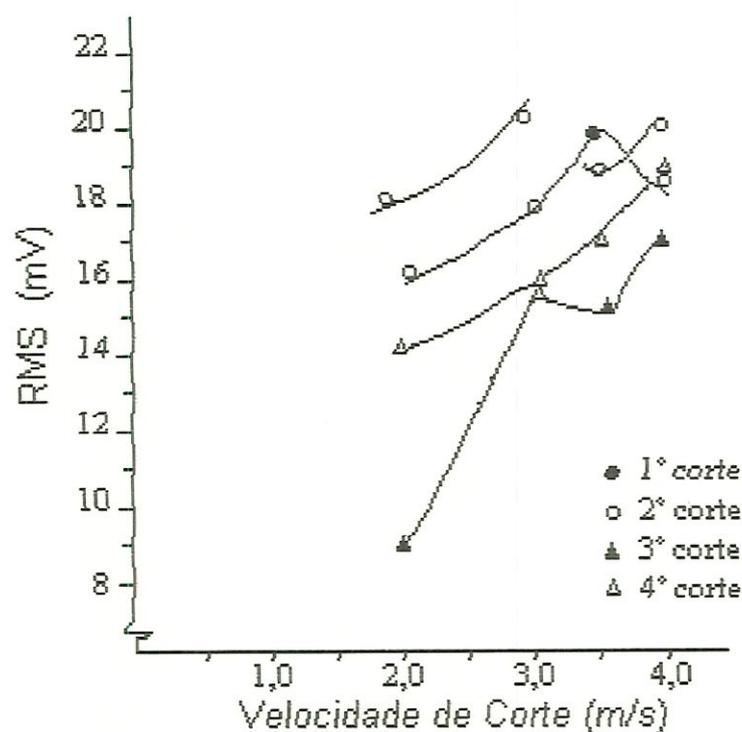


Figura 2.34 - Variação da voltagem RMS para quatro velocidades de corte (Dornfeld e Lemaster, 1982).

Varição da Velocidade de Avanço - Quando a velocidade de avanço foi aumentada, tanto a força horizontal como a "AE count rate" e a voltagem RMS mostraram um aumento significativo. O gráfico da Figura 2.35 mostra um aumento definido na energia de emissão acústica (voltagem RMS) com um aumento na velocidade de avanço, para uma velocidade de corte constante de 3 m/s e uma profundidade de corte de 1,5 mm. Estas

mudanças na velocidade afetam a formação do cavaco durante o corte, como resultado é gerado uma atividade de emissão acústica mais alta.

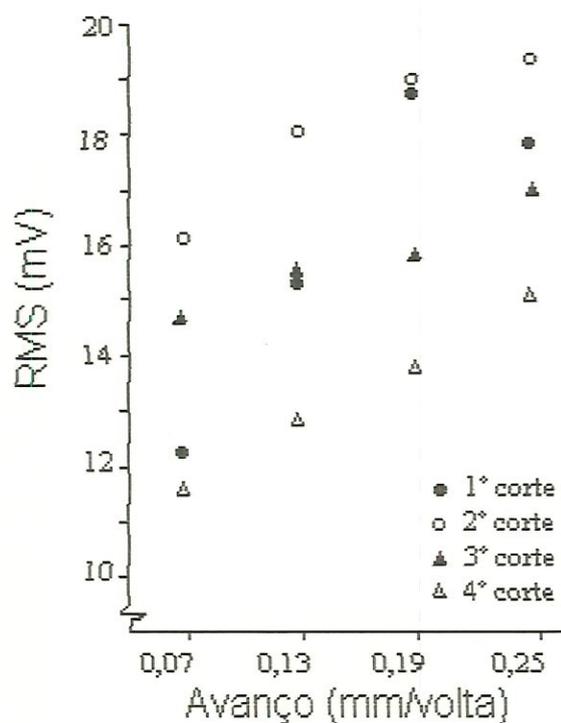


Figura 2.35 - Variação da tensão RMS com a velocidade de avanço (Dornfeld e Lemaster, 1982).

Lemaster et al (1982), mostraram que a emissão acústica é sensível à mudanças na geometria da ferramenta de corte, ou seja, o ângulo de saída e o de folga. O autor concluiu que para usinagem com ferramenta afiada, a zona de deformação plástica para o gume da ferramenta foi a principal fonte de emissão acústica, quando comparadas com outras fontes potenciais, tais como atrito na superfície da peça, atrito do cavaco na ferramenta e ruptura do cavaco. Foi verificado também que a emissão acústica mostra-se sensível às mudanças nas condições de corte e desgaste da ferramenta. Além disso constatou-se que a ruptura do cavaco afeta de modo significativo a energia do sinal.

Kato e Lemaster (1991) também trabalharam na relação entre os níveis de sinais de emissão acústica e o processo de formação do cavaco. Para tanto foram usinadas dez espécies de madeira, tanto com ferramentas gastas como com ferramentas afiadas, nas direções de corte 0-90 (corte perpendicular) e 90-0 (corte paralelo).

Nesse trabalho os autores utilizaram um transdutor de emissão acústica com frequência de ressonância de 175 kHz montada na superfície superior da ferramenta. Tanto a "emissão acústica count rate", a voltagem RMS do sinal de emissão acústica como as forças de corte foram digitalizadas e gravadas simultaneamente em um computador. O desenvolvimento do corte foi gravado usando-se uma câmera de vídeo acoplada a um microscópio.

Na formação do cavaco tipo I, comparando-se à curva da força paralela com a curva da voltagem RMS, pode-se observar que a voltagem RMS foi pequena enquanto a força foi aumentando. Quando a voltagem RMS começou a aumentar, a força paralela estava em torno do seu valor máximo. Existiu um pequeno atraso entre o aparecimento do pico da força paralela até o aparecimento do pico da voltagem RMS. Durante a usinagem, quando a madeira é comprimida, a voltagem RMS apresentou-se inferior que aquela ocorrida para a fase de propagação da trinca. Os autores definem um parâmetro característico denominado **b/a**, com base sobre os picos e os vales do sinal de força paralela, correspondendo à ocorrência do fendilhamento para a formação do cavaco tipo I. O parâmetro **b/a** foi definido como:

$$\mathbf{b/a = (valor\ do\ pico - valor\ do\ vale) / valor\ do\ pico}$$

onde **b** é a diferença em kgf do pico até o vale no gráfico força de corte x comprimento de corte, e **a** é o valor do pico no mesmo gráfico.

Os autores acreditam que o nível do sinal de emissão acústica é alto quando o valor **b/a** for grande, já que a ruptura da fenda relaciona-se com este valor **b/a**.

Cyra e Tanaka (1997) trabalharam com monitoramento por emissão acústica no fresamento frontal, analisando a sensibilidade quando da mudança na orientação das fibras da madeira. Para tanto um conjunto de ensaios foi realizado, variando-se os ângulos de inclinação das fibras no plano horizontal e no plano vertical e o ângulo dos anéis de crescimento. Toda a usinagem foi gravada em câmeras de vídeo de alta velocidade, para análise posterior e relacionamento entre os sinais de emissão acústica com o processo de corte. Neste estudo, além dos parâmetros acima, os autores realizaram análise da força de corte e acabamento superficial da peça. Pela análise dos dados, o estudo mostrou que a emissão acústica foi sensível para as variações de orientação das fibras. Além disso, existiu correlação entre os sinais gerados, as forças de corte e a rugosidade da superfície usinada. Com relação ao ângulo de inclinação das fibras no plano horizontal, uma superfície de boa qualidade foi produzida em regiões de corte onde a emissão acústica teve um nível de geração mais baixo, contrastando com regiões de acabamento superficial ruins onde os níveis de geração de emissão acústica foram maiores. Ao passo que variando o ângulo de inclinação das fibras no plano vertical, verificou-se que para maiores níveis da taxa de contagem de emissão acústica e maiores esforços de corte, a superfície resultou num bom acabamento. Quanto ao ângulo dos anéis de crescimento, níveis mais altos de geração de emissões acústicas foram relacionados com uma maior rugosidade superficial, contrastando com a força de corte, pois nas regiões de corte de maior intensidade de força, menores foram os valores de rugosidade superficial (R_z).

2.3.5 - Monitoramento de emissão acústica

A complexidade dos mecanismos de remoção e a diversidade das propriedades mecânicas entre os materiais metálicos frágeis, relatadas, tornam difícil a seleção adequada das condições de usinagem e ferramentas de modo que se obtenha peças dentro das especificações requeridas. Dentro deste quadro de incertezas a tentativa do monitoramento do

processo ganha carácter imprescindível. Entretanto, o sistema de monitoramento deve ter capacidade suficiente para detectar o modo de remoção, o qual está relacionado, em última análise, à formação de trincas em materiais de difícil usinagem.

A retificação é tradicionalmente monitorada por meio da medição das forças envolvidas na interação entre o rebolo e o material da peça, porém nota-se algumas limitações no seu uso em materiais cerâmicos, principalmente pela incapacidade de detecção de trincas e formação de cavaco frágil.

Por outro lado, a utilização de sinais de emissão acústica revela-se sensível a ponto de ser recentemente empregada, por alguns pesquisadores, na detecção de trincas e mudanças microestruturais durante o tratamento térmico de materiais metálicos, assim como na alteração da estrutura dos materiais (deslocamentos, perda da coesão entre grãos e inclusões etc) em testes de tração.

Na indentação do vidro Tanikella e Scatergood (1995) identificam pontos de iniciação de trincas do tipo média/radial e lateral durante o ciclo de carregamento e descarregamento monitorado por sinais de emissão acústica. Na fase inicial do carregamento, quando a zona plástica é formada, verifica-se que o sinal de emissão acústica varia pouco. À medida que a penetração do indentador aumenta são notados pulsos de emissão acústica coincidentes com a formação de trincas médias. No descarregamento também são constatados pulsos de emissão acústica com a correspondente formação de trincas laterais. A Figura 2.36 ilustra as observações feitas por Tanikella & Scatergood.

As fontes de emissão acústica, oriundas das mudanças estruturais dos materiais incluem os deslocamentos, transformação de fase, deformações plásticas e trincas. As ondas de tensão elásticas são capazes de provocar deslocamentos muito pequenos na superfície do material podendo ser

captados por um sensor piezoelétrico, que transforma estes deslocamentos em sinal elétrico (Asibu & Dornfeld, 1981).

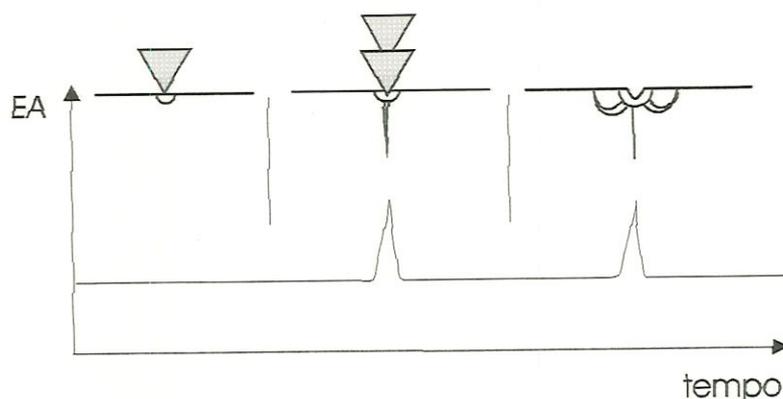


Figura 2.36 - Emissão acústica na indentação do vidro (Tanikella & Scatergood, 1995).

Muitos dos fenômenos que ocorrem na interação entre a ferramenta e a peça, tanto numa retificação quanto num torneamento, são captadas pela emissão acústica e participam instantaneamente ou antecipam a efetiva remoção dos materiais frágeis. Dentre estes fenômenos estão a formação de trincas e o destacamento de material fraturado.

Na retificação, o sensor piezoelétrico deve ser colocado o mais próximo possível da região de corte e seu sinal, analógico de baixa voltagem, amplificado. Para que este sinal possa ser armazenado em um computador que realiza as análises, o sinal analógico precisa ser convertido em digital por meio de uma placa analógica/digital (placa A/D). No entanto, placas para trabalhar com frequências altas como as desses sinais (50kHz a 1Mhz) são de alto custo. Comumente usa-se tratar o sinal obtendo-se o sinal RMS da entrada. O sinal de emissão acústica (EARms), agora com frequência mais baixa, pode passar pela placa A/D e ser armazenado no computador, que realiza as análises necessárias para o monitoramento em questão (Diniz et al., 1995).

O sinal RMS da emissão acústica é, segundo diversos autores, entre eles Teti & Dornfeld (1989) e Monber et al.(1995), o método mais interessante e

utilizado na análise do sinal de emissão acústica uma vez que ele traz a energia contida no sinal.

A potencialidade do emprego da emissão acústica nos processos de remoção de materiais frágeis vem desde o trabalho de monitoramento da dressagem em rebolos convencionais, que são compostos de grãos cerâmicos, feito por Inasaki (1985). Neste trabalho é verificado que a profundidade de dressagem é proporcional ao sinal de emissão acústica permitindo, entre outras coisas, uma relação com a topografia do rebolo e a detecção do contato entre rebolo e peça. Em recente trabalho, Oliveira et al. (1994), relata que a sensibilidade da emissão acústica é comprovada pela capacidade de identificação de três estágios na aproximação e contato do dressador em direção ao rebolo: turbulência, antes do contato físico; contato elástico, sem remoção; e contato frágil, onde efetivamente ocorre a remoção do rebolo.

As primeiras pesquisas que relacionam remoção de materiais frágeis e emissão acústica refere-se à retificação, ao contrário do que se observa no estudo dos mecanismos de remoção por fratura que partem de modelos mais simples como a indentação e o riscamento.

Em um dos trabalhos mais difundidos, Bifano & Yi (1992) retifica corpos de vidro e germânio com rebolo de grãos bastante finos (4 a 8 μm) em ligante metálico (bronze) sob taxas de mergulho de 2 a 150 mm/volta do rebolo, para tanto se construiu uma máquina projetada especialmente para este fim. Os ensaios realizados mostram, para as mesmas condições de usinagem, a diminuição da energia específica de emissão acústica com o aumento da taxa de remoção de material, que proporciona um aumento da retificação em modo frágil.

A energia específica de emissão acústica é definida como a razão entre a energia de emissão acústica e a correspondente taxa de remoção de material. A energia de emissão acústica, por sua vez, é o valor da área

abaixo da curva de densidade espectral de potência do volume de remoção considerado. A Figura 2.37 mostra a energia específica de emissão acústica em função da taxa de remoção para o vidro e o germânio.

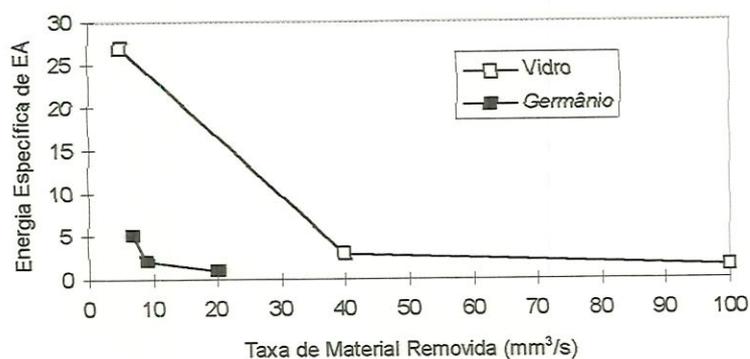


Figura 2.37 - Energia específica de emissão acústica em função da taxa de remoção de material (Bifano & Yi, 1992).

Apesar de indicar o comportamento da remoção, esta técnica não permite visualizar a intensidade com que ocorrem os mecanismos de remoção, além de ser necessário à medição da taxa de remoção de material a cada aquisição de dados, nem sempre constante como no método de retificação por mergulho adotado no ensaio.

Na tentativa de se estabelecer uma relação entre a emissão acústica e o regime de retificação, independente da taxa de remoção de material, Bifano & Yi (1992) analisa o espectro de frequência na retificação do vidro e quartzo. Porém, o regime predominantemente dúctil do quartzo mostra um espectro mais amplo e de maior intensidade do que em regime frágil, comportamento diverso daquele apresentado pelo vidro. A partir da inconsistência destes resultados preliminares os próprios autores recomendam investigações adicionais.

Em trabalho anterior, Hiroshi et al (1989) sugerem que o tamanho de cavaco removido na retificação cresce juntamente com o sinal da emissão acústica

(dado em $EArms^2$), ou seja, a formação do cavaco frágil de maiores proporções que o dúctil corresponde à maior energia acústica dissipada. A Figura 2.38 apresenta o resultado obtido para o carboneto de silício (SiC) indicando que o aumento destacado da emissão acústica, para cavacos com tamanho por volta de 200 μm , é provocado por fratura.

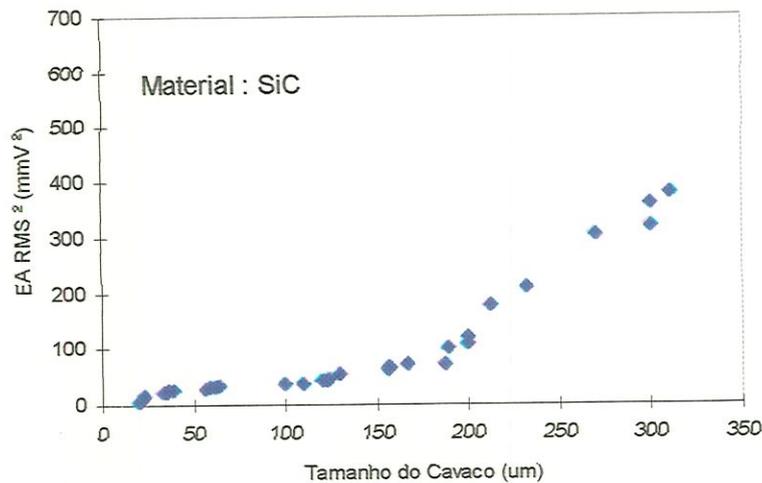
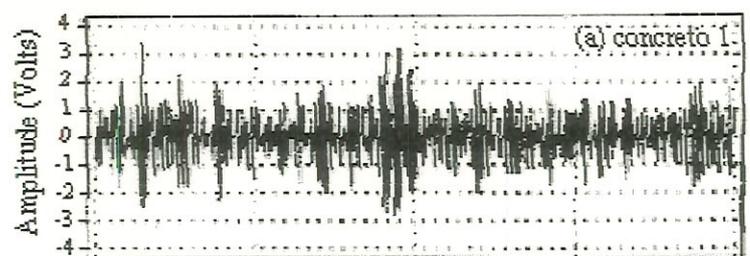


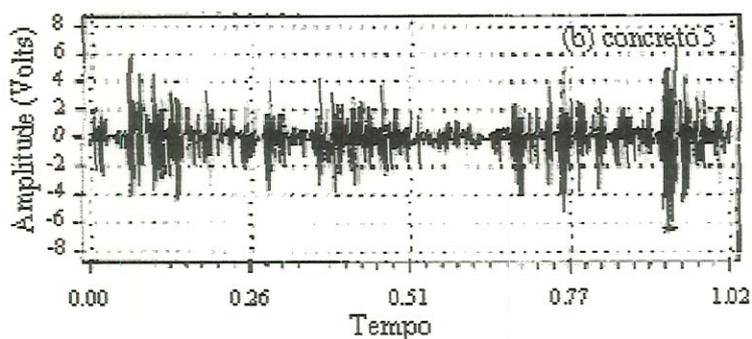
Figura 2.38 - Tamanho de cavaco em função da EArms (Hiroshi et al., 1989).

Apesar de qualitativamente útil, este tipo de trabalho não apresenta perspectivas de emprego na medição em processo.

Em trabalho utilizando jato d'água abrasivo Monber et al. (1995) investigam o comportamento da emissão acústica na remoção de concreto. Para tanto, são utilizados concretos de estrutura granular fina e grossa, análogos as cerâmicas policristalinas. Como resultado observa-se que a emissão acústica para o concreto grosso, dominado por fraturas entre grãos, apresenta sinais de emissão acústica regulares e de baixas amplitudes (Figura 2.39a) em relação ao concreto fino, dominado por extensas fraturas e lascamentos (Figura 2.39b).



(a) Concreto de grãos grossos



(b) Concreto de grãos finos

Figura 2.39 - Sinais de emissão acústica no tempo durante a remoção por jato d'água abrasivo para concreto de grãos grossos e finos (Monber et al., 1995).

Recentemente, na tentativa de identificar os mecanismos de remoção dos processos abrasivos através da emissão acústica, trabalhos de maior consistência têm retomado o riscamento como base de investigação. Em um destes trabalhos Marinescu & Zeng (1996), submetem cerâmicas a riscos de carregamentos crescentes encontrando picos de sinal de emissão acústica, cuja quantidade e intensidade cresce progressivamente com o aumento da carga (Figura 2.40a). Estes picos de emissão acústica são considerados o resultado da liberação abrupta de energia gerada na propagação de trincas como o mecanismo responsável pelo lascamento e fragmentação do material. Dessa forma, os picos pronunciados de emissão acústica representam a geração de trincas cuja propagação leva a formação de cavacos frágeis.

A Figura 2.40b mostra o correspondente espectro de freqüência, obtido a partir de uma rotina de FFT ("Fast Fourier Transform"), para os sinais de

emissão acústica surgidos no riscamento. Pode-se observar pelo gráfico que o espectro se amplia, principalmente nas baixas frequências, com o aumento da carga de riscamento, caracterizando de alguma forma o aumento da atividade de fratura. Porém, segundo os próprios autores, não há relação suficientemente clara que permita tirar conclusões em torno destes resultados, necessitando-se de estudos adicionais.

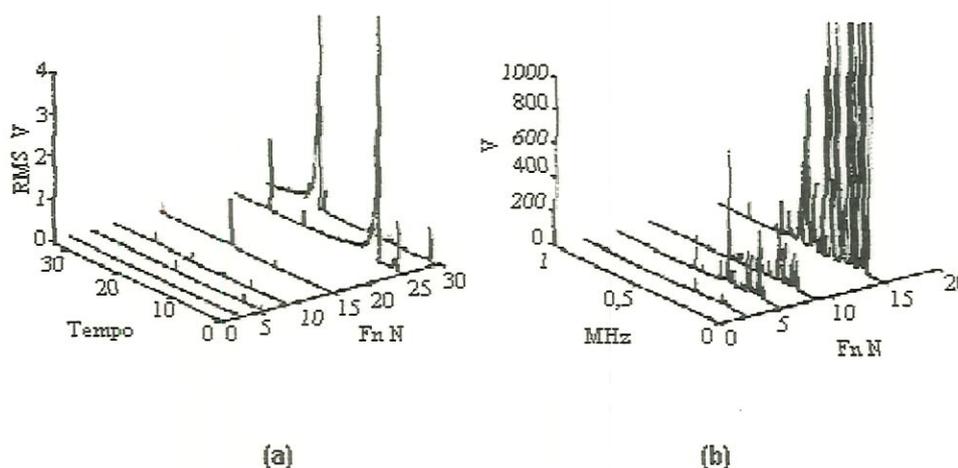


Figura 2.40 - Sinal de emissão acústica em diferentes cargas de riscamento (a) e o correspondente espectro de frequência (b) (Marinescu & Zeng, 1996).

2.4 – Aspectos conclusivos da revisão bibliográfica

A presente revisão bibliográfica foi de grande importância, pois os estudos específicos aqui apresentados auxiliaram delinear o desenvolvimento do trabalho prático, proporcionando definir a metodologia adequada de experimentação para medição da força principal de corte e captação de sinais acústicos emitidos durante a usinagem das amostras.

Os resultados obtidos por pesquisadores apontam ser viável aplicar o monitoramento do processo de usinagem através de sensores de captação acústica, apontando várias vantagens para controle de processo em relação a aplicação de outros métodos.

Conforme objetivo do presente trabalho, em promover a análise do tipo de cavaco, para a partir deste, verificar a correlação existente entre a força de corte medida e o respectivo sinal acústico captado, conclui-se que foi de grande validade desenvolver esta revisão, estudando os conceitos da teoria da usinagem da madeira e de emissão acústica, tais como: sistemas de corte; relação entre tipos de cavaco e acabamento superficial; fatores que afetam a força de corte e aplicações e monitoramento em emissão acústica.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se os equipamentos e materiais necessários para a realização da parte experimental do trabalho, bem como a metodologia de ensaio.

3.1 - Ferramenta monocortante para ensaio de corte

As ferramentas de corte, em número de três, preparadas para os ensaios foram construídas de barras de secção transversal quadrada de 9,53 mm (3/8"). Estas ferramentas, de aço rápido com adição de 10% de Cobalto (Co), foram construídas de forma a simular um dente de serra de espessura 3,0 mm. A geometria da cunha cortante é descrita a seguir e mostrada na Figura 3.1.

# Ferramenta nº 1	⇒ ângulo de saída	⇒ $\gamma_o = 10^\circ$
	⇒ ângulo de cunha	⇒ $\beta_o = 70^\circ$
	⇒ ângulo de folga	⇒ $\alpha_o = 10^\circ$
# Ferramenta nº 2	⇒ ângulo de saída	⇒ $\gamma_o = 17^\circ$
	⇒ ângulo de cunha	⇒ $\beta_o = 63^\circ$
	⇒ ângulo de folga	⇒ $\alpha_o = 10^\circ$
# Ferramenta nº 3	⇒ ângulo de saída	⇒ $\gamma_o = 24^\circ$
	⇒ ângulo de cunha	⇒ $\beta_o = 56^\circ$
	⇒ ângulo de folga	⇒ $\alpha_o = 10^\circ$

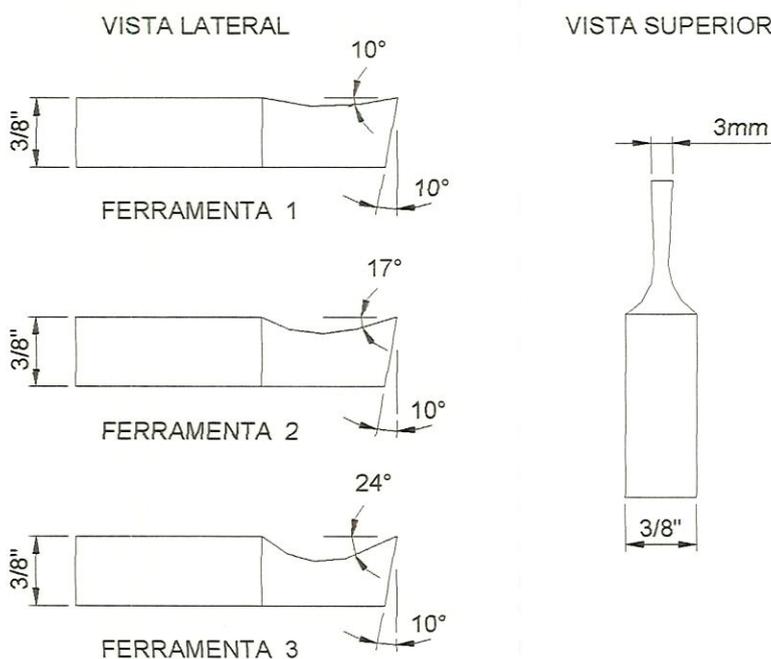


Figura 3.1 - Desenho das ferramentas de corte, destacando os principais ângulos.

Os valores dos ângulos de saída das ferramentas de corte foram adotados após uma pesquisa em catálogos de fabricantes de ferramentas para madeira, onde verificou-se que o intervalo comercialmente mais utilizado se posicionava entre 5° e 30° . Excluindo-se os extremos, adotou-se então como menor ângulo de saída $\gamma_o = 10^\circ$, o valor do maior ângulo de saída $\gamma_o = 24^\circ$ e um ângulo intermediário de $\gamma_o = 17^\circ$.

As ferramentas foram afiadas em uma afiadora universal de ferramentas provida de rebolo de óxido de alumínio do Laboratório de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia – UNESP. O controle desses ângulos foi realizado em um projetor de perfis marca NIKON, modelo 6 C, com mesa de medição equipada com 2 micrômetros de resolução 0,001 mm, posicionados perpendicularmente entre si. Para uma boa visualização do perfil da ferramenta, utilizou-se uma lente para ampliação de 50 vezes.

3.2 - Célula de carga

A célula de carga consta de um dinamômetro resistivo e foi construída conforme projeto descrito por Gonçalves (1993). Esse dinamômetro foi projetado para medir esforços de corte na usinagem da madeira e consta de um suporte porta-ferramentas confeccionado em aço ABNT 4340, conforme mostra a Figura 3.2. A montagem do dinamômetro na máquina de ensaio se deu através de um dispositivo de fixação, conforme mostrado na Figura 3.3.

Os detalhes construtivos são apresentados na Figura 3.3, onde pode-se verificar as dimensões da célula de carga e o posicionamento da ferramenta de corte em relação ao corpo da célula. O esquema elétrico da ligação em ponte completa de "Wheatstone" é mostrado na Figura 3.4 e a disposição dos extensômetros elétricos na célula de carga na Figura 3.5.

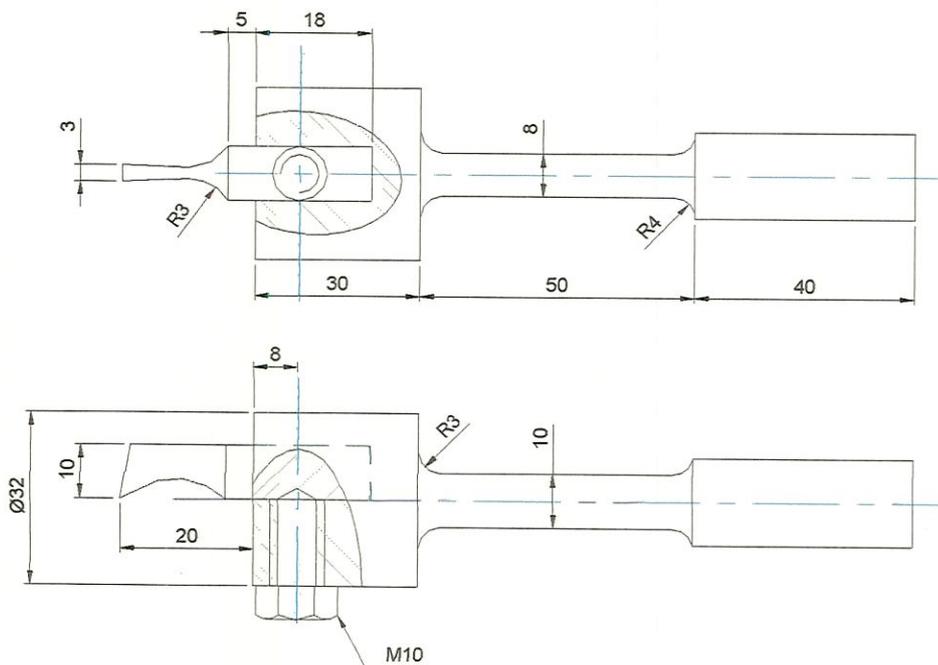


Figura 3.2 - Dinamômetro para medição dos esforços na usinagem da madeira (Gonçalves, 1993).

O dinamômetro com secção transversal de 8 x 10 mm, recebeu quatro extensômetros elétricos ligados em circuito de ponte completa de "Wheatstone", solicitados a esforços de flexão para medida da força

principal de corte " P_c ". Os extensômetros utilizados são de fabricação da Micro Measurements, tipo EA-06-120LZ-120. A construção e calibração do dinamômetro empregado na experimentação foi realizada conforme roteiro descrito na Tese de Doutorado "Proposta de Metodologia para Medição dos Esforços de Corte da Madeira" (Gonçalves, 1993), para força máxima admitida $P_{c_{max}} = 58,15 \text{ daN}$ e força mínima $P_{c_{min}} = 10,5 \times 10^{-3} \text{ daN}$

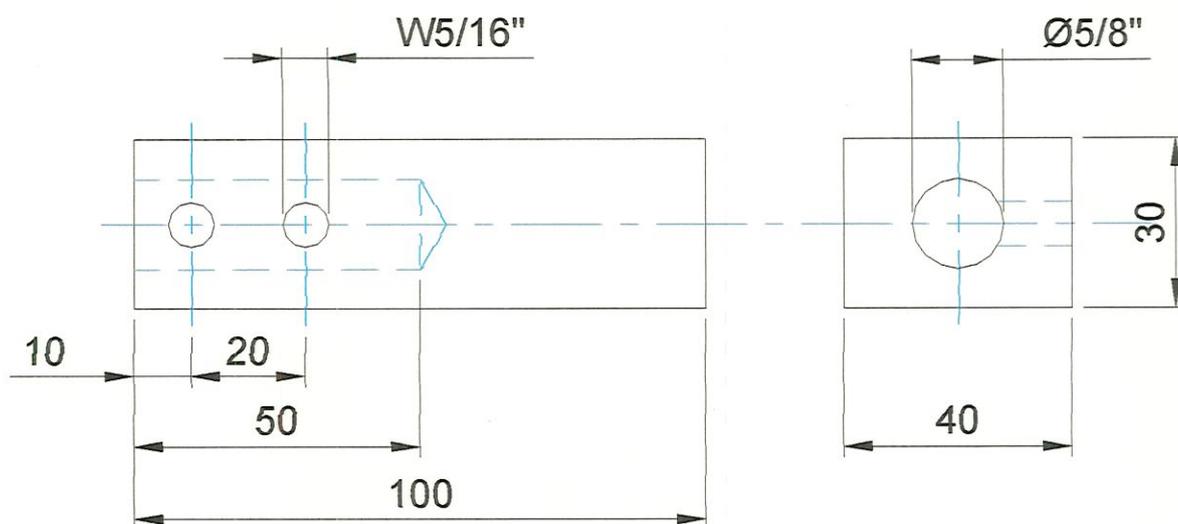
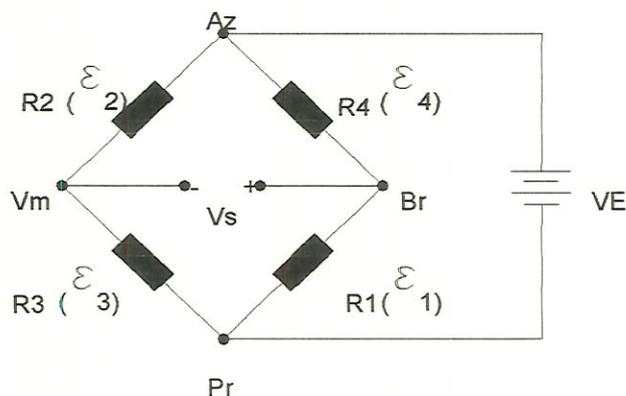


Figura 3.3 - Dispositivo de fixação do dinamômetro na máquina de ensaio.



Ponte Completa para Medida de " P_c "

Figura 3.4 - Esquema dos circuitos elétricos - ponte completa de "Wheatstone" - adotados para medição de " P_c " (Gonçalves, 1993).

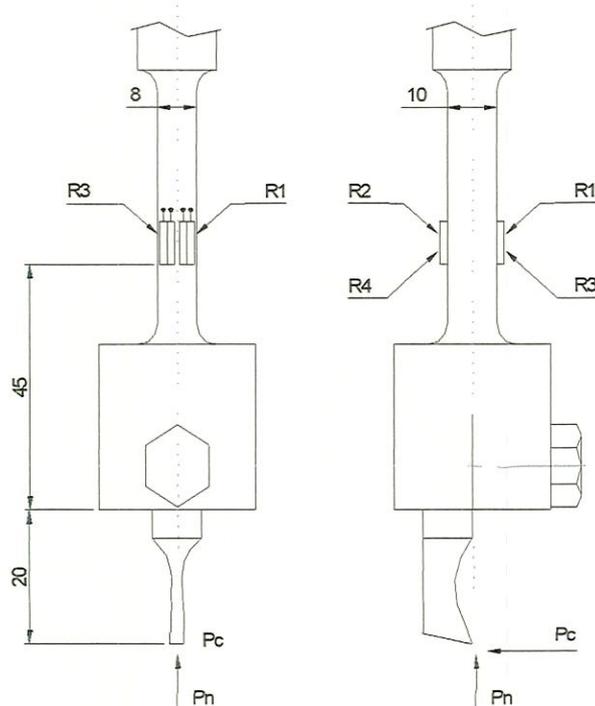


Figura 3.5 - Disposição dos extensômetros elétricos na célula de carga para medida da força principal de corte P_c . (Gonçalves, 1993).

3.2.1 - Calibração estática do dinamômetro

O ensaio estático do dinamômetro resistivo consiste numa condição essencial para verificar a relação existente entre a leitura da diferença de potencial da ponte de "Wheatstone" e o carregamento aplicado.

Para se determinar à curva de correspondência entre o carregamento e a diferença de potencial ou deformação, realizou-se o carregamento e o descarregamento gradativo do dinamômetro com cargas conhecidas, para os esforços de flexão, medindo-se a diferença de potencial em uma ponte amplificadora.

Alguns cuidados foram tomados em relação à montagem do banco de ensaio de calibração (Figura 3.6), com o intuito de se evitar um

carregamento irregular do dinamômetro, são eles:

- Montagem com uma ferramenta igual à utilizada no ensaio de corte, tomando-se o cuidado de manter a distância de 20 mm entre o ponto de aplicação da carga e a face da célula, conforme projeto original
- Alinhamento e nivelamento do dinamômetro através de instrumentos de medição, para se garantir o direcionamento da carga em relação ao centro geométrico da célula.
- Fixação do dinamômetro em uma mesa através de dispositivo metálico e grampo mecânico tipo "C", para se garantir rigidez ao sistema.

Na Figura 3.7 pode-se verificar o dispositivo metálico firmemente preso à mesa através de um grampo mecânico. A célula de carga foi fixada neste dispositivo através de parafusos, tornando-se igualmente rígida.

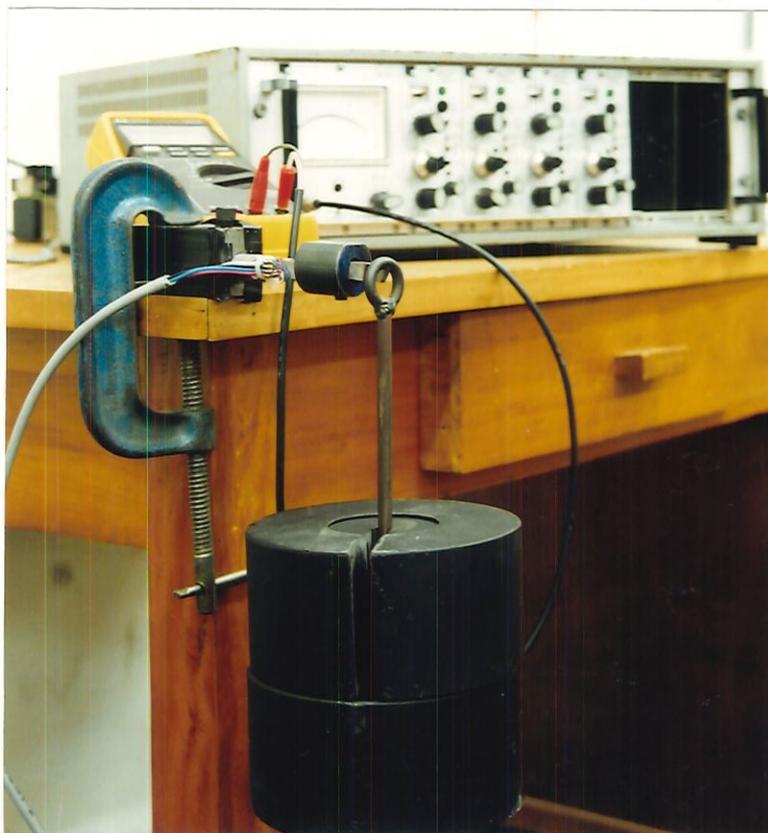


Figura 3.6 - Montagem do banco de ensaio para aferição estática do dinamômetro.

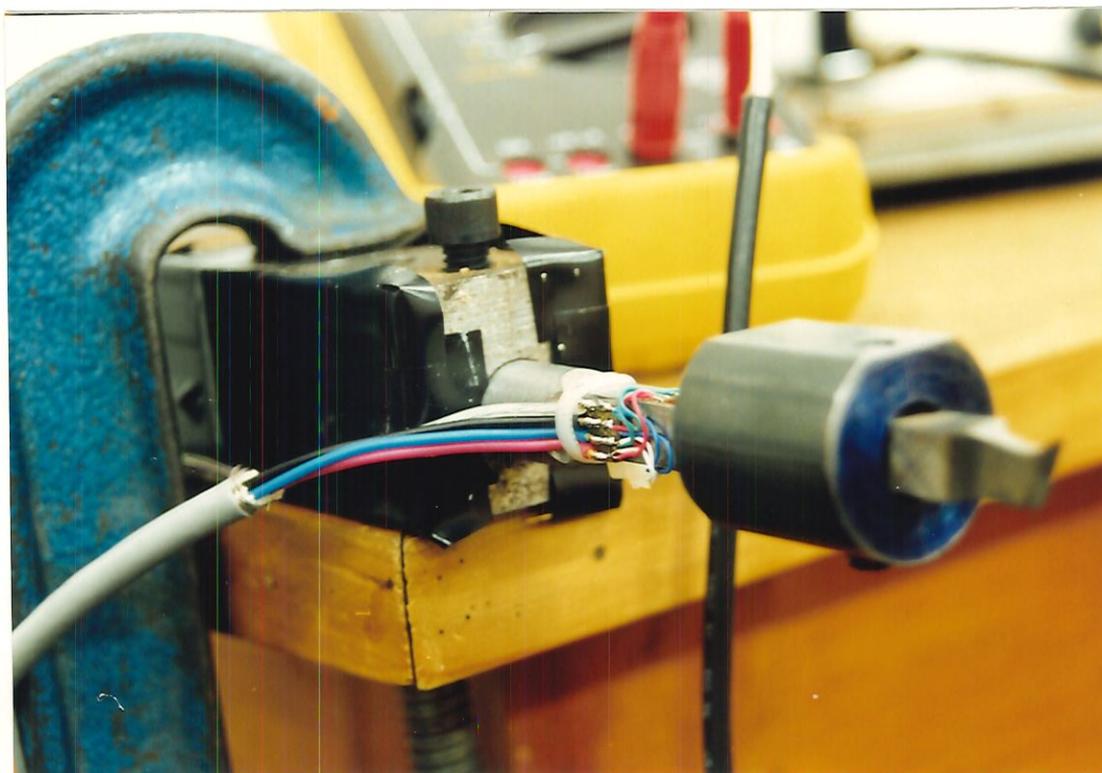


Figura 3.7 - Detalhe da fixação da célula de carga e dispositivo metálico.

Para aferição estática do dinamômetro usou-se os seguintes equipamentos e dispositivos:

- Haste metálica com prato suporte para pesos;
- Ponte amplificadora para Strain gage, marca: HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik, modelo: 3407 A, com módulo KWS 3073, fonte de 5 volts;
- Pesos aferidos de 0,5 daN, 1,0 daN, 2,0 daN, 5,0 daN e 10,0 daN;
- Multímetro digital, marca: HP-Hewlett Packard, modelo: 974 A, 4 ½ dígitos;
- Paquímetro Starrett com relógio centesimal, resolução de 0,02 mm.

O procedimento de calibração foi realizado conforme segue:

Após fixação do dinamômetro na mesa, foi montado todo o sistema de

calibração, conexões elétricas do dinamômetro na ponte amplificadora e esta no multímetro digital, procedeu-se à montagem da haste metálica na ponta da ferramenta, respeitando-se à medida de 20 mm até a face do dinamômetro, medida esta realizada com um paquímetro centesimal.

A ponte amplificadora foi zerada através do módulo KWS 3073 e a leitura realizada com multímetro digital. Este módulo dispõe de diversas escalas de trabalho, adotou-se a escala 2, por ser bastante sensível e permitiu atingir o carregamento máximo (40 daN) sem atingir o fundo de escala. Os pesos já aferidos foram colocados progressivamente a partir de 0,5 daN até 40 daN, e a leitura da diferença de potencial apresentada na ponte de "Wheatstone" foi lida diretamente no multímetro digital. Após finalizado o carregamento, procedeu-se à retirada dos mesmos na ordem inversa ao carregamento, com as devidas tomadas de leitura no multímetro digital, tomando-se o cuidado de esperar a completa estabilização do sistema.

Com os resultados (tabela 3.1) e auxílio de um programa de análise estatística, foi construída a curva de calibração do dinamômetro, a qual é apresentada na Figura 3.8.

Tabela 3.1 - Dados do carregamento e descarregamento do dinamômetro, com respectivos valores de diferença de potencial da ponte de "Wheatstone"

Peso (daN) carregamento	Leitura do multímetro (V)	Peso (daN) descarregamento	Leitura do multímetro (V)
0	0	40,0	9,87
0,5	0,12	30,0	7,42
1,0	0,25	20,0	4,96
2,0	0,5	15,0	3,72
4,0	1,0	10,0	2,49
6,0	1,51	8,0	1,99
8,0	2,0	6,0	1,50
10,0	2,5	4,0	1,00
15,0	3,74	2,0	0,49
20,0	4,98	1,0	0,24
30,0	7,42	0,5	0,12
40,0	9,87	0	0

A curva de calibração apresentou os seguintes resultados estatísticos:

R múltiplo = 0,99998653 (coeficiente de correlação)
R quadrado = 0,99997306 (coeficiente de determinação)

Curva de Calibração Estática

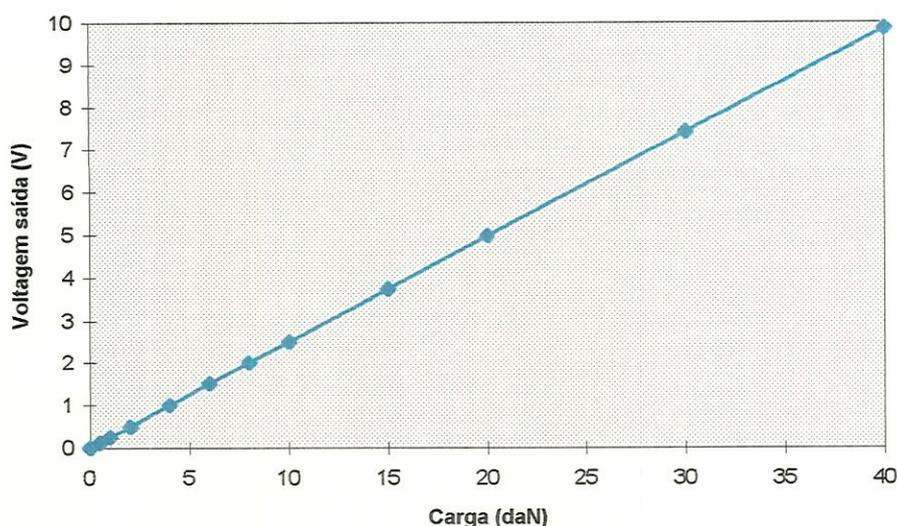


Figura 3.8 - Curva de calibração estática do dinamômetro.

3.3 - Equipamento de Ensaio de Usinagem

O ensaio de usinagem foi realizado numa Plaina Horizontal Copiadora da marca ESZTERGOM, modelo MSZ, potência máxima de 5,4 kW. A Figura 3.9 mostra uma vista geral do equipamento de ensaio, com um corpo de prova fixado sobre a mesa da máquina e ferramenta de corte montada no cabeçote da máquina.

A velocidade de deslocamento do cabeçote foi regulada para 12 golpes por minuto, que é a velocidade mais baixa disponível no equipamento. Seu curso foi regulado em 600 mm de comprimento.

3.4 Equipamento de medição da força de corte

Empregou-se o mesmo sistema de aquisição de dados da força de corte adotado por Gonçalves (1993), o qual recebe sinais elétricos e através de uma placa de interface A/D faz conexão com um micro computador PC 486.

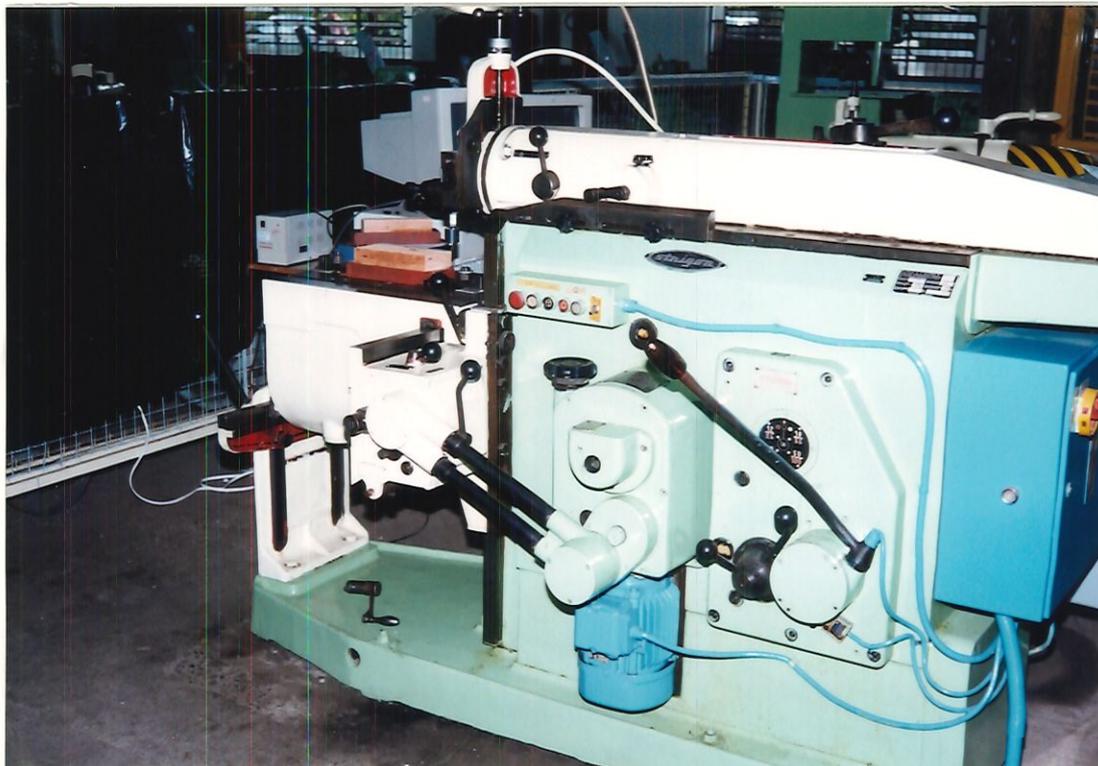


Figura 3.9 - Vista geral do equipamento de ensaio de usinagem.

A Figura 3.10 mostra a placa de interface montada no microcomputador, onde pode-se visualizar no monitor a primeira tela, aberta no início do ensaio de corte.

Para tratamento dos sinais emitidos pela célula de carga, foi empregado um programa de aquisição e outro de registro dos dados, desenvolvido em linguagem de programação Turbo C. A placa de aquisição utilizada tem capacidade de adquirir aproximadamente 945.000 pontos durante um tempo de aquisição de 40 segundos, além de filtrar os sinais de ruído.(Gonçalves, 1993).

O programa de registro dos dados foi desenvolvido para recuperar os resultados do programa de aquisição em bits e transformá-los em unidade de força (daN), para posteriormente serem visualizados no monitor e registrados em impressora (Figura 3.11). Esse programa calcula as forças de corte média e a de maior incidência (moda) durante cada ensaio.



Figura 3.10 - Detalhe da placa de interface para medição da força de corte e tela de espera para início de ensaio.

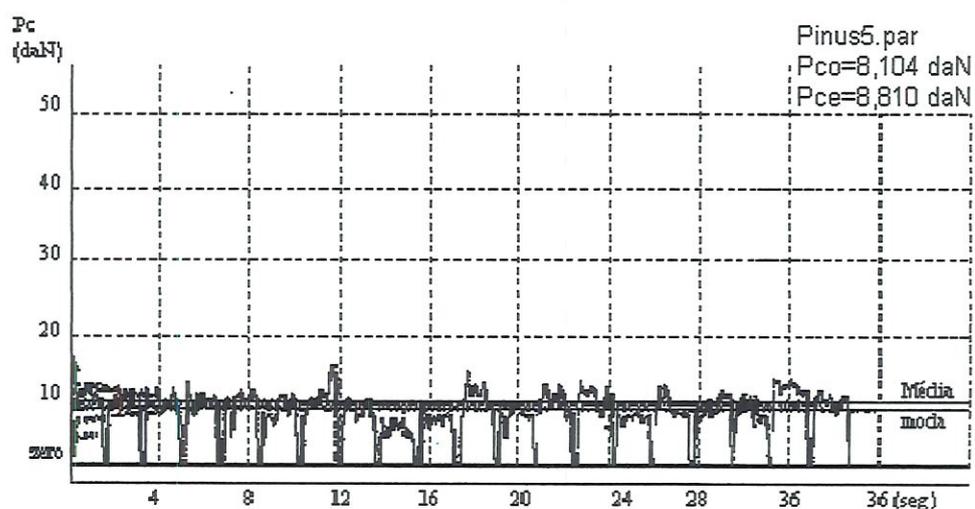


Figura 3.11 - Exemplo do gráfico da força principal de corte em função do tempo de usinagem (Gonçalves, 1993).

O gráfico da Figura 3.11 apresenta:

- a curva da variação da força principal de corte em função do tempo, para amostras de madeira de 200 mm de comprimento;
- a curva registrada na ordenada do gráfico, através de pontos que indicam a incidência de valores da força principal de corte (P_c);
- as retas que indicam as forças principais de corte média (P_{ce}) e de maior incidência (P_{co});
- na parte superior, os valores de P_{ce} , P_{co} e o nome do arquivo de registro do ensaio. A nomenclatura deste registro é composta por simbologias que representam os parâmetros envolvidos no experimento.

3.5 - Equipamento de medição do sinal de emissão acústica (EA)

Para se captar o sinal de emissão acústica, utilizou-se um sistema desenvolvido pela SENSIS São Carlos Ind. Com. Equipamentos Eletrônicos, modelo BM 12, no qual selecionou-se a constante de tempo RMS de 1ms e filtro passa alta de 1 kHz. O sensor utilizado é do tipo piezoelétrico de alta frequência modelo EA03-CF.

Durante o ensaio, o sensor de emissão acústica foi fixado firmemente na face inferior da amostra de madeira por intermédio de um parafuso, e tomou-se o cuidado de posicionar o sensor de captação no centro da amostra, conforme mostrado na Figura 3.12.

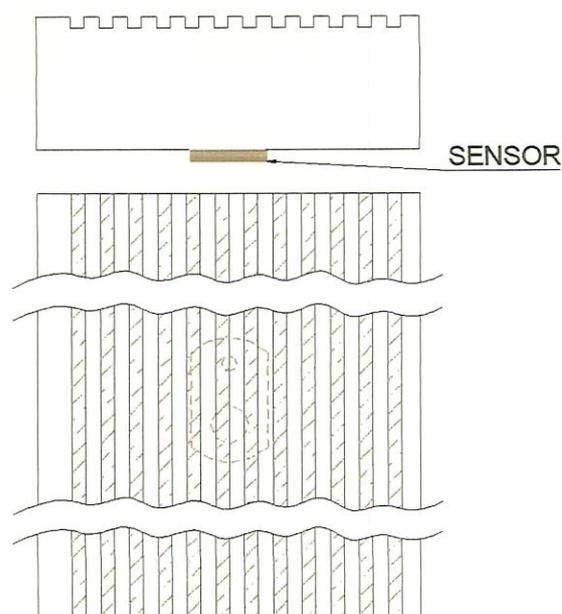


Figura 3.12 - Posicionamento do sensor de emissão acústica na amostra

O sensor foi ligado ao sistema de monitoramento, que trata o sinal e o envia a uma placa de interface A/D instalada em um micro computador PC 486 DX2, Marca IBM. Tais sinais recebem um tratamento através do programa de aquisição e registro dos dados.

Tanto o programa, quanto à placa de interface A/D foram desenvolvidos pelo Departamento de Computação da Faculdade de Ciências da UNESP – Campus de Bauru.

A placa de aquisição de dados da emissão acústica é composta por três partes funcionais: conversor analógico digital, sistema de captação e temporizador.

Conversor analógico digital

Responsável pela transformação do sinal elétrico, proveniente do sistema de captação, em sinal digital. Esta parte transforma valores analógicos em números com os quais o computador pode operar. Os valores digitais obtidos apresentam uma resolução de 8 bits - faixa de 0 a 255 unidades.

Sistema de captação

Transforma os sinais de emissão acústica em impulsos elétricos, conciliando-os aos níveis de sinais manipulados pelo conversor analógico digital.

Temporizador

Gerador de uma constante de tempo na qual os dados serão amostrados (sincronização para o Conversor Analógico Digital). Esse temporizador gera uma taxa de 2000 Hz, ou seja, 2000 valores serão capturados a cada segundo de ensaio.

A Figura 3.13 apresenta o esquema do sistema de medição da emissão acústica utilizado na experimentação.

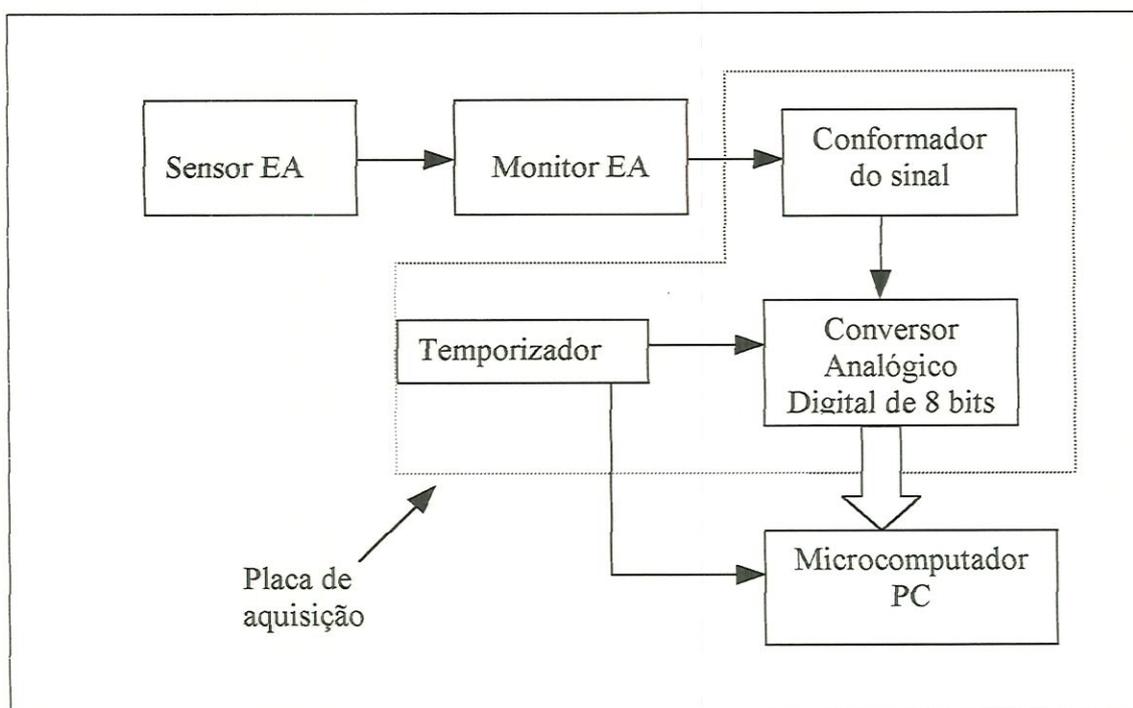


Figura 3.13 - Representação esquemática do sistema de medição EA.

O programa de aquisição adquire as informações capturadas pelo monitor de EA. Essa captura acontece com uma taxa constante de 2000 Hz gerada por interrupção pelo circuito do temporizador. A captura é iniciada quando o

nível do sinal ultrapassa um limite preestabelecido. Os dados capturados são salvos em arquivos especificados pelo usuário. Na seqüência os dados armazenados em arquivos são tratados no programa EXCEL versão 97, onde são construídos os gráficos e obtidos os valores estatísticos das curvas. A Figura 3.14 exemplifica a curva de resultados de ensaio.

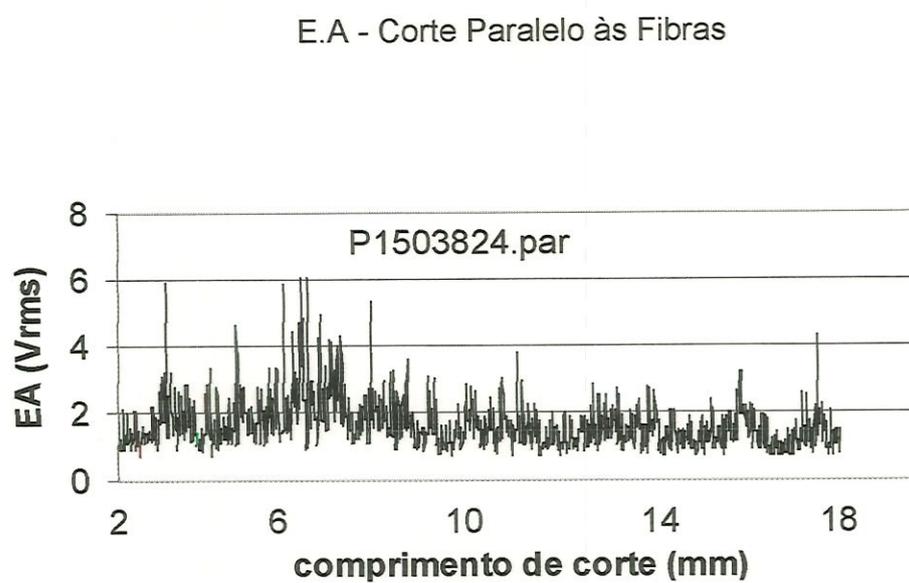


Figura 3.14 - Exemplo de curva de EA construída em programa Excel v97.

3.6 - Corpos de prova

3.6.1 - Seleção do material

A espécie de madeira escolhida para a realização dos ensaios de usinagem foi *Araucária angustifolia* (Pinho do Paraná). Essa espécie de madeira vem despertando cada vez mais a atenção da indústria de transformação, pois desponta como uma das sucessoras das madeiras nativas, dado a características de cor e padrão, rápido crescimento vegetativo, boas propriedades físico-mecânicas e localização estratégica das principais reservas, que se encontram concentradas nas regiões sul e sudeste do país.

3.6.2 - Dimensões das amostras

Dimensões nominais	- comprimento	- 200,0 mm
	- largura	- 100,0 mm
	- espessura	- 22,0 mm

Com estas dimensões pode-se garantir:

- Tempo de corte suficiente para um período seguro de aquisição de dados;
- Bom aproveitamento dimensional das peças;
- Comprimento de corte suficiente a uma boa identificação do tipo de cavaco formado durante o corte;
- Com este comprimento de amostra e na posição que ela se encontra, em relação ao curso do equipamento de ensaio, podemos considerar a velocidade de corte constante.

3.6.3 - Preparação das amostras

As amostras de pinho foram retiradas de tábuas comerciais 2,5 cm de espessura por 30 cm de largura, as quais foram aplainadas numa das faces em Plaina Desempenadeira. Na seqüência, as amostras foram fixadas a uma base metálica (Figura 3.15) para usinagem de regularização da superfície em uma Fresadora Vertical à Comando Numérico Computadorizado, empregando-se uma fresa de topo de 40 mm de diâmetro (Figura 3.16).

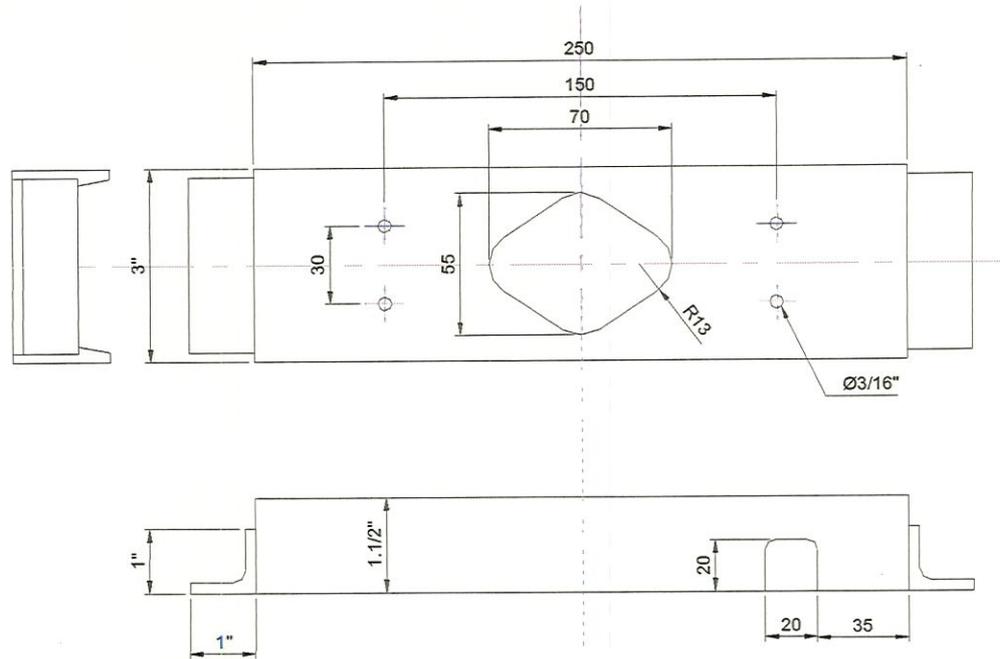


Figura 3.15 - Base de fixação das amostras de madeira.

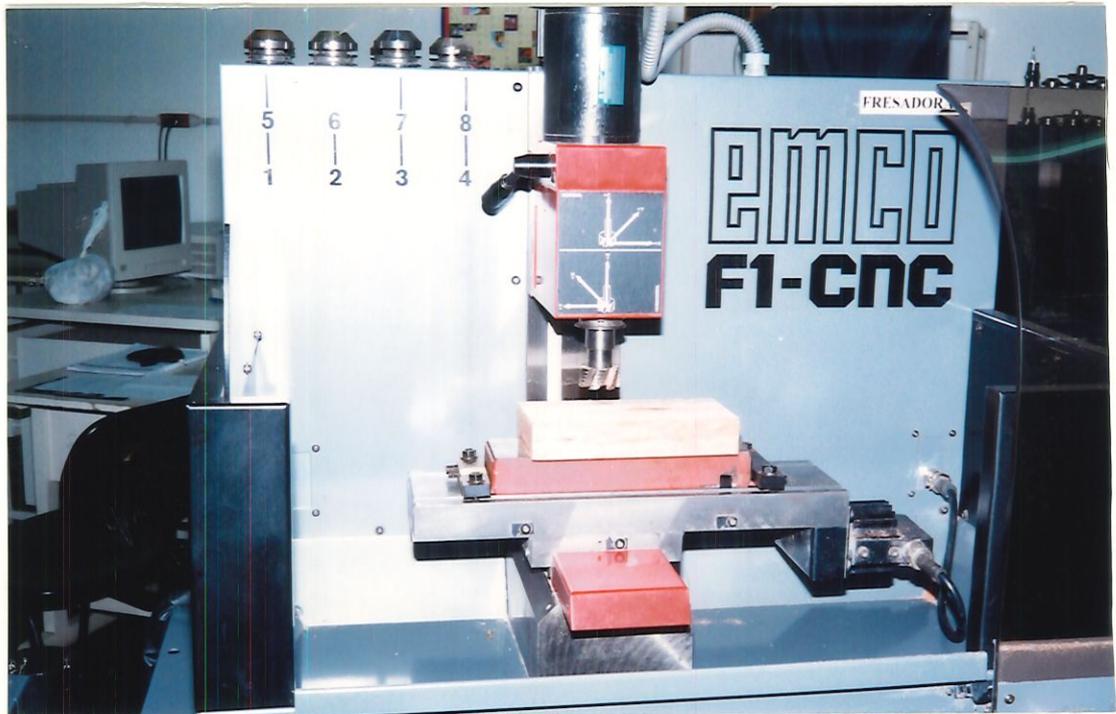


Figura 3.16 - Amostra de madeira com superfície sendo usinada em fresadora CNC.

3.6.4 - Determinação do teor de umidade e da densidade

Para a determinação do teor de umidade dos corpos de prova de madeira, foi aplicado o método da estufa e balança, descrito na norma NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira, de agosto de 1997. As amostras para determinação do teor de umidade foram retiradas conforme estabelecido do item B2 – Amostragem, da norma. Essas amostras foram preparadas com seção transversal retangular, e dimensões nominais de 2,0 cm × 3,0 cm × 5,0 cm (comprimento ao longo das fibras).

Equipamentos utilizados:

- Estufa de secagem, marca "OLIDEF", modelo 480 ES, temperatura máxima de 300 °C;
- Termômetro digital, marca Salvterm, modelo 1200 K, com termopar cromel-alumel;
- Balança eletrônica digital, marca Marte, modelo AS 500, carga máxima 500 g, sensibilidade 0,01 g;
- Paquímetro de precisão, tipo universal, capacidade de medição de 150,00 mm, resolução 0,05 mm, marca Mitutoyo.



Figura 3.17 - Equipamentos utilizados na determinação do teor de umidade das amostras de madeira

Para o cálculo do teor de umidade, empregou-se a seguinte formulação:

$$U (\%) = [(M_i - M_s) / M_s] \times 100$$

Sendo: U - teor de umidade em porcentagem, a base seca.
 M_i - massa inicial da madeira, em gramas
 M_s - massa da madeira seca, em gramas

Resultados obtidos: U = [(18,27 - 16,45) / 16,45] x 100 = 11,1 %
 Densidade aparente das amostras: ρ = 0,50 g/cm³

3.7 - Procedimentos de Ensaio

O conjunto composto por base metálica, amostra de madeira e sensor de emissão acústica, mostrado na Figura 3.18, foi fixado na mesa da máquina de ensaio (Plaina Limadora, Figura 3.19).

O curso da máquina foi ajustado de forma que o centro da amostra coincida com o ponto médio do curso total do cabeçote. Isso se justifica dado a variação de velocidade no início e no final do percurso de corte do cabeçote.

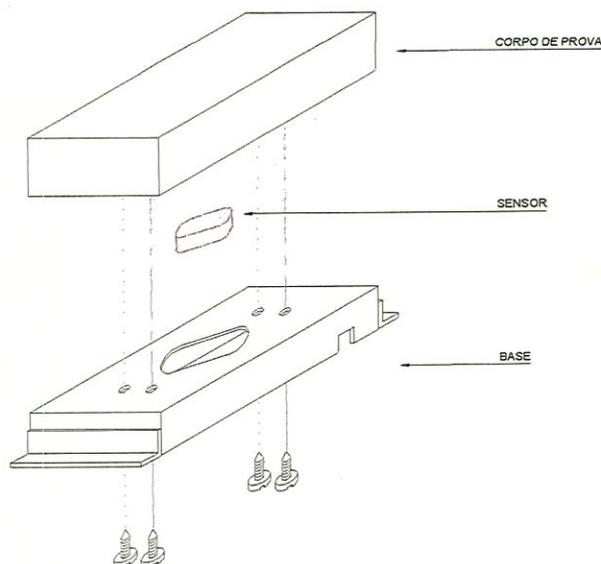


Figura 3.18 - Montagem do conjunto: amostra de madeira, base e sensor EA.

O conjunto, ferramenta de corte e célula de carga, foi montado no cabeçote da máquina, tal como mostrado na Figura 3.19.

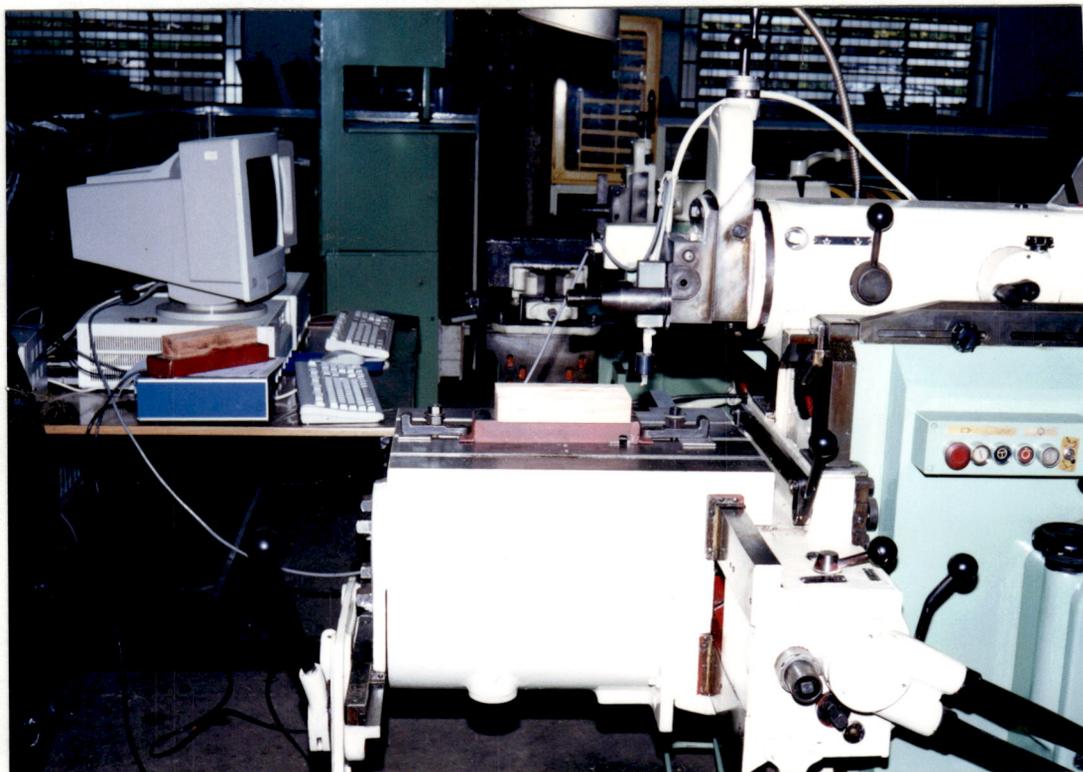


Figura 3.19 - Vista geral da máquina de ensaio, mostrando: ferramenta de corte, célula de carga, dispositivo de fixação e amostra de madeira.

Na montagem dos dispositivos sobre a máquina foi realizado um alinhamento da amostra em relação ao cabeçote da máquina, de forma que a ferramenta ficasse perpendicular à superfície da amostra e aresta de corte paralela às fibras da madeira.

Um passe com profundidade aproximada de 0,1 mm foi dado anteriormente a cada início de um novo canal, com o cabeçote da máquina iniciando o movimento linear sempre na mesma posição.

A cada ensaio, a ferramenta foi posicionada próxima a face da amostra para ajuste da profundidade de corte.

Para cada série de ensaios num mesmo canal, a seqüência adotada em relação à profundidade de corte foi: 0,4 mm; 0,3 mm; 0,2 mm e 0,1 mm.

As aquisições de dados dos dois sistemas de medição, o de força de corte e o de emissão acústica (Figura 3.20), foram iniciadas, no momento em que a ferramenta iniciava o corte.

Os arquivos de aquisição foram nomeados conforme exemplificado a seguir, recebendo a mesma codificação para cada ensaio, tanto para a medida da força quanto para a emissão acústica. Posteriormente os resultados foram recuperados e registrados.

Exemplo: **P1301117.par**

Descrição dos dígitos	Descrição do exemplo
1º dígito - espécie ensaiada:	P - pinho
2º e 3º dígitos - número da amostra	13 - amostra número 13.
4º e 5º dígitos - profundidade de corte (varia de 0,1 a 0,4 mm)	01 - profundidade de corte 0,1 mm
6º dígito - posição de corte na amostra	1 - primeiro canal, distante 5 mm da face de início da amostra.
7º e 8º dígitos - ângulo de saída da ferramenta de corte (10°, 17° ou 24°)	17 - ângulo de saída de 17°.
Extensão - dada em função do sentido das fibras da madeira.	par - sentido paralelo às fibras



Figura 3.20 - Vista dos sistemas de aquisição de dados, composto por monitor SENSIS BM-12 e microcomputadores PC.

4. - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste item, apresenta-se os resultados obtidos na 5ª série de ensaios de medição da força de corte com captação simultânea dos sinais acústicos.

Cada série de ensaios desenvolveu-se para três amostras de madeira, identificadas por código. Os resultados a seguir referem-se as amostras P13, P14 e P15. As séries anteriores serviram como ensaios preliminares, os quais proporcionaram: definir a forma mais adequada de operar o banco de ensaio e, simultaneamente realizar aquisição de dados nos dois sistemas de medição; verificar a influência de falhas na superfície da amostra sobre o sinal de emissão acústica e por fim ajustar a regulagem do monitor SENSIS B12.

A seguir apresenta-se a tabela de resultados extraídos dos gráficos de aquisição exemplificados pelas Figuras 3.11 e 3.14. Para efeito de análise dos resultados, registrou-se nesta tabela o valor da força de corte média "P_{ce}" (tabela 4.1), visto que o valor da força de maior incidência (P_{co}) foi utilizado somente como parâmetro de identificação da qualidade do ensaio. Quanto aos resultados da emissão acústica, estes foram transferidos do programa de aquisição para o programa EXCEL para posterior confecção dos gráficos de emissão acústica em função do comprimento de corte, apresentados em anexo.

Para efeito de análise dos resultados de emissão acústica, foi calculada a média e o desvio padrão dos valores adquiridos para o comprimento de corte compreendido entre 20 e 180 mm (tabela 4.2). Ou seja, desprezou-se 10% do percurso de corte em cada extremidade das amostras.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de medição da força de corte média “Pce”, valores em daN.

Corpo de Prova 13

Ângulo (γ_0)	Canal	Espessura de corte - h (mm)			
		0,1	0,2	0,3	0,4
10°	1	4,099	7,236	9,306	13,280
	2	3,817	6,176	8,818	12,840
	3	4,016	6,284	8,006	11,440
	4	3,724	6,217	8,617	14,990
	5	3,881	6,154	8,867	12,140
	6	3,741	6,092	8,423	11,750
	7	4,226	7,129	9,709	13,980
	8	4,263	6,550	8,742	13,830
	9	3,582	5,650	9,194	12,130
		Média	3,93	6,39	8,85

Corpo de Prova 14

Ângulo (γ_0)	Canal	Espessura de corte - h (mm)			
		0,1	0,2	0,3	0,4
17°	1	4,568	6,991	7,892	11,190
	2	3,864	5,346	6,905	9,293
	3	4,159	6,077	7,350	8,521
	4	3,917	5,316	6,626	9,818
	5	4,112	5,670	7,199	8,441
	6	4,403	6,432	7,575	8,654
	7	3,960	5,443	6,719	7,529
	8	4,407	6,678	7,964	9,242
	9	4,282	5,993	7,536	9,851
		Média	4,19	5,99	7,31

Corpo de Prova 15

Ângulo (γ_0)	Canal	Espessura de corte - h (mm)			
		0,1	0,2	0,3	0,4
24°	1	3,737	4,836	5,832	6,368
	2	3,888	4,820	6,056	7,333
	3	3,396	5,281	6,159	8,708
	4	3,672	5,796	6,939	9,166
	5	3,892	6,435	7,466	8,533
	6	3,603	5,516	6,564	8,086
	7	3,459	5,504	6,463	7,195
	8	3,186	4,900	5,490	6,148
	9	3,864	5,599	6,445	6,488
		Média	3,63	5,41	6,38

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de emissão acústica “EA”, valores médios em V rms e desvio padrão (σ).

Corpo de Prova 13

Ângulo (γ_0)	Canal	Espessura de corte - h (mm)							
		0,1		0,2		0,3		0,4	
		V rms	σ	V rms	σ	V rms	σ	V rms	σ
10°	1	0,910	0,258	1,003	0,267	1,036	0,256	1,258	0,432
	2	0,873	0,315	0,945	0,415	0,986	0,365	1,166	0,360
	3	0,769	0,104	0,814	0,117	0,863	0,161	1,100	0,248
	4	0,746	0,097	0,870	0,201	0,955	0,209	1,259	0,418
	5	0,790	0,137	0,823	0,143	0,901	0,195	1,041	0,275
	6	0,821	0,156	0,838	0,144	0,938	0,216	1,081	0,306
	7	0,841	0,193	0,886	0,212	0,947	0,244	1,273	0,422
	8	0,816	0,142	0,828	0,157	0,951	0,237	1,223	0,369
	9	0,780	0,125	0,837	0,158	0,898	0,212	1,087	0,315
		Média	0,82	0,17	0,87	0,20	0,94	0,23	1,16

Corpo de Prova 14

Ângulo (γ_0)	Canal	Espessura de corte - h (mm)							
		0,1		0,2		0,3		0,4	
		V rms	σ	V rms	σ	V rms	σ	V rms	σ
17°	1	1,201	0,366	1,379	0,477	1,408	0,481	1,929	0,788
	2	1,039	0,259	1,044	0,273	1,152	0,338	1,623	0,714
	3	1,052	0,249	1,062	0,247	1,115	0,287	2,198	1,214
	4	0,970	0,195	0,955	0,209	1,048	0,260	2,123	1,243
	5	1,052	0,238	1,024	0,231	1,035	0,251	2,453	1,445
	6	1,114	0,291	1,081	0,276	1,136	0,338	2,677	1,621
	7	1,057	0,241	1,087	0,273	1,087	0,272	1,622	0,823
	8	1,119	0,271	1,109	0,285	1,107	0,273	2,015	1,254
	9	1,012	0,215	0,979	0,210	0,954	0,185	1,335	0,580
		Média	1,07	0,26	1,08	0,28	1,12	0,29	1,99

Corpo de Prova 15

Ângulo (γ_0)	Canal	Espessura de corte - h (mm)							
		0,1		0,2		0,3		0,4	
		V rms	σ	V rms	σ	V rms	σ	V rms	σ
24°	1	1,459	0,431	1,325	0,364	1,398	0,479	2,456	1,370
	2	1,545	0,515	1,413	0,428	1,502	0,525	2,220	1,045
	3	1,402	0,422	1,679	0,581	1,890	0,717	2,565	1,240
	4	0,912	0,172	1,701	0,623	1,765	0,624	2,464	1,234
	5	1,370	0,427	1,789	0,753	1,914	0,881	2,251	1,160
	6	1,353	0,501	1,638	0,751	1,766	0,915	2,384	1,394
	7	1,359	0,443	1,638	0,629	1,446	0,649	2,117	0,992
	8	1,194	0,310	1,605	0,587	1,657	0,724	1,832	0,843
	9	1,431	0,443	1,850	0,756	1,785	0,668	2,103	1,045
		Média	1,34	0,41	1,63	0,61	1,68	0,69	2,27

A partir dos resultados da tabela 4.1, foram confeccionados os gráficos da força de corte com relação a espessura de corte e ângulo de saída da ferramenta (Figuras 4.1 e 4.2), mostrados a seguir.

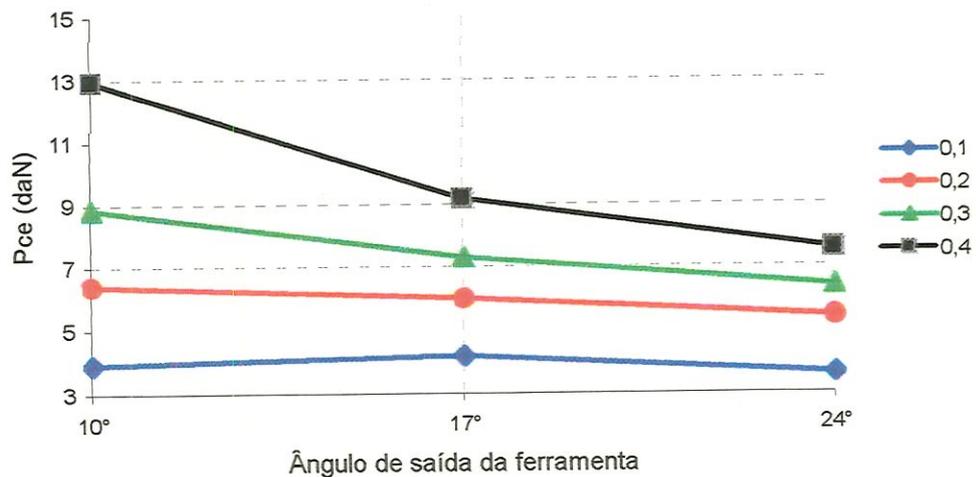


Figura 4.1 – Gráfico de Pce médio em função do ângulo de saída, para espessuras de 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 mm.

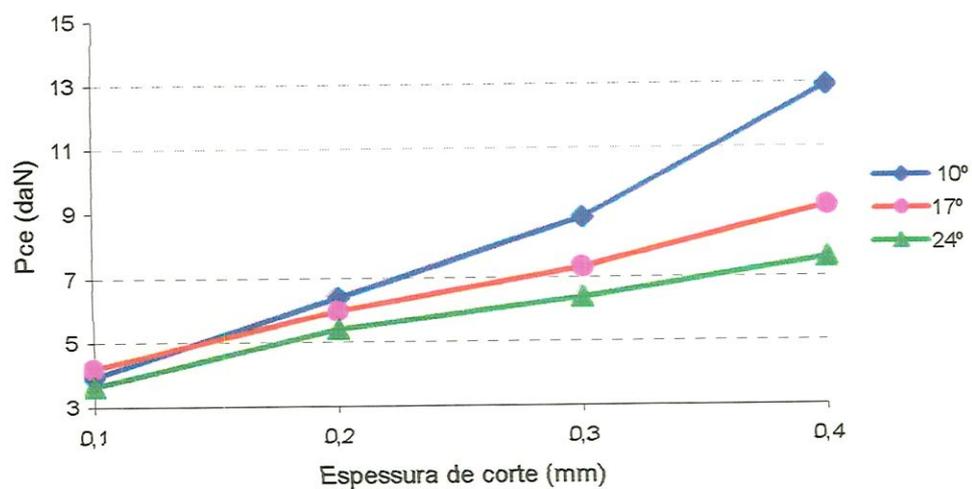


Figura 4.2 – Gráfico de Pce médio em função da espessura de corte, para ângulos de saída de 10°, 17° e 24°.

A partir dos resultados da tabela 4.2, foram confeccionados os gráficos que relacionam os valores médios e de desvio padrão registrados na emissão

acústica relacionados com: espessura de corte e ângulo de saída da ferramenta (Figuras 4.3 e 4.4), mostrados a seguir.

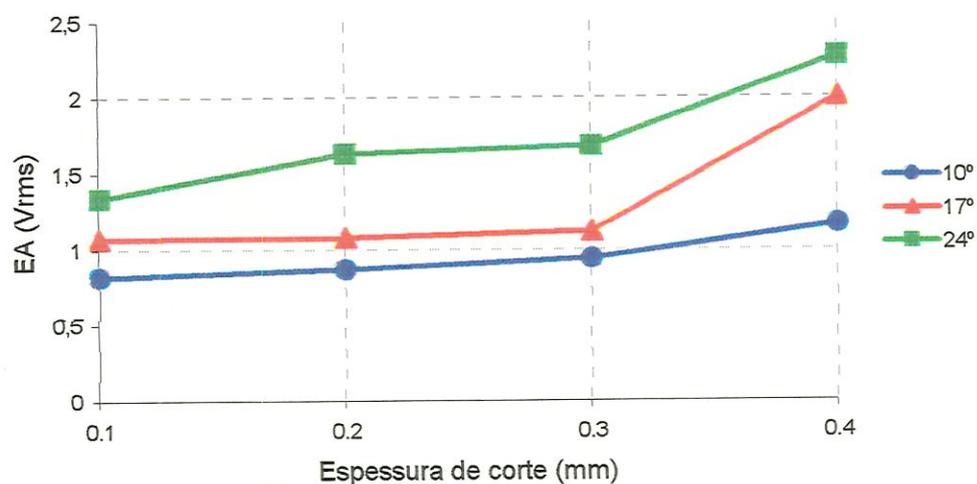


Figura 4.3 – Gráfico de valores médios de emissão acústica em função da espessura de corte para os ângulos de saída: 10°, 17° e 24°.

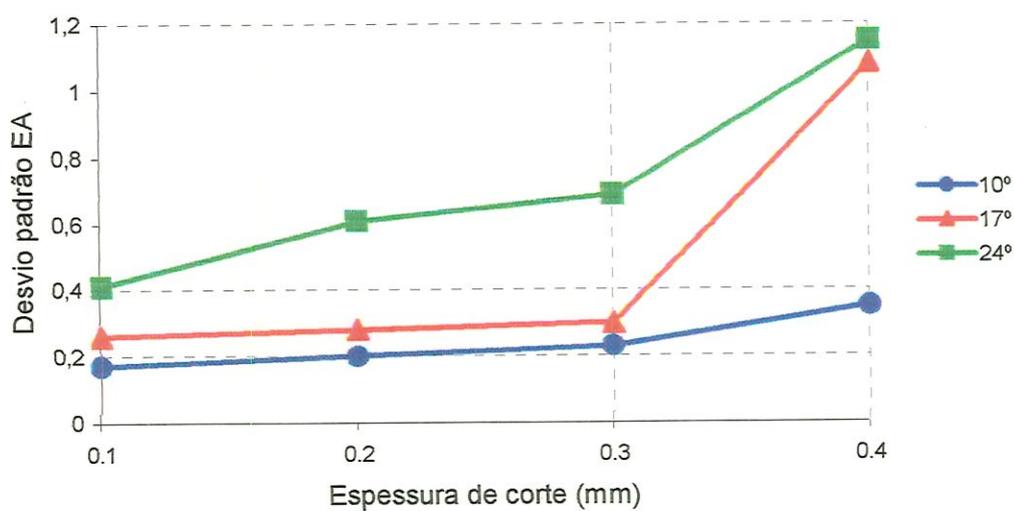


Figura 4.4 – Gráfico de valores do desvio padrão médio em função da espessura de corte para os ângulos de saída: 10°, 17° e 24°.

4.1 - Análise da variação da força de corte

As Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente, mostram de forma nítida o aumento da força de corte em relação à diminuição do ângulo de saída da ferramenta e ao aumento da espessura de corte. A seguir, apresenta-se os valores de acréscimo da força e a porcentagem que o mesmo representa para cada ângulo de saída (tabela 4.3) e para cada espessura de corte (tabela 4.4).

Tabela 4.3 - Variação da força de corte média com a variação do ângulo de saída.

Ângulos γ_o	$h = 0,1 \text{ mm}$		$h = 0,2 \text{ mm}$		$h = 0,3 \text{ mm}$		$h = 0,4 \text{ mm}$	
	ΔP_{ce} daN	%	ΔP_{ce} daN	%	ΔP_{ce} daN	%	ΔP_{ce} daN	%
10° - 17°	0,258*	6,2*	0,394	6,6	1,547	21,2	3,760	41,0
17° - 24°	0,55	15,20	0,58	10,8	0,91	14,50	1,610	21,3

* valores negativos

Da tabela 4.3 e Figura 4.1, pode-se constatar:

Para $h=0,1 \text{ mm}$, observa-se uma situação atípica para $\gamma_o = 10^\circ$, apresentando valor de P_{ce} inferior ao registrado para $\gamma_o = 17^\circ$.

Comparando-se a variação porcentual entre a diferença dos ângulos, observa-se para pequenas espessuras (0,1 e 0,2 mm), um elevado decréscimo da força de corte para 24° em relação a 17° , do que para 17° em relação a 10° .

Com o aumento da espessura de 0,1 a 0,4 mm, a diminuição de P_{ce} foi bem mais acentuada no intervalo entre 10° e 17° quando comparada ao intervalo entre 17° e 24° .

Destaca-se nesta análise, a redução de 41,0 % de Pce para espessura 0,4 mm quando se aumentou o ângulo de saída de 10° para 17°.

Tabela 4.4 - Variação da força de corte média com a variação da espessura de corte.

Espessura de corte [mm]	Ângulo de saída $\gamma = 10^\circ$		Ângulo de saída $\gamma = 17^\circ$		Ângulo de saída $\gamma = 24^\circ$	
	ΔP_{ce} daN	%	ΔP_{ce} daN	%	ΔP_{ce} daN	%
0,1 a 0,2	2,46	62,6	1,82	43,0	1,78	49,0
0,1 a 0,3	4,92	125,2	3,12	74,5	2,75	75,8
0,1 a 0,4	9,00	229,0	4,98	118,9	3,93	108,3
0,2 a 0,3	2,47	38,7	1,32	22,0	0,97	17,9
0,2 a 0,4	6,54	102,4	3,18	53,1	2,15	39,7
0,3 a 0,4	4,08	46,10	1,86	25,5	1,18	18,5

Da tabela 4.4 e Figura 4.2, pode-se constatar:

Com $h=0,1$ mm, a mesma situação atípica relatada anteriormente para o ângulo de saída de 10° em relação ao de 17°. Nas demais situações de corte, Pce diminuiu com o aumento do ângulo de saída e aumentou com o aumento da espessura de corte.

Comparando-se somente as espessuras de corte, observa-se um aumento percentual médio de Pce próximo de 50,0 % entre 0,1 e 0,2 mm; 26,0 % entre 0,2 e 0,3 mm e; 30,0 % entre 0,3 e 0,4 mm.

Como já relatado, quanto menor o ângulo de saída, maior foi o aumento percentual da força com o aumento da espessura de corte de 0,1 a 0,4 mm, porém, com o aumento de 0,1 para 0,3 mm o aumento de Pce para $\gamma_0 = 17^\circ$ foi menor que para $\gamma_0 = 24^\circ$.

4.2 - Análise do tipo de cavaco

Para efeito de análise do tipo de cavaco gerado durante a usinagem das amostras, adotou-se o mesmo procedimento realizado por Franz apud Koch, 1964. A partir da visualização através de lupa com aumento de 10 X, identificou-se nove amostras de cavacos removidos com mesma espessura de corte e ângulo de saída. A tabela 4.5 mostra os tipos de cavaco (I, II e III), para cada condição ensaiada com as amostras de madeira na condição de umidade seca ao ar.

Tabela 4.5 - Resultado da análise dos tipos de cavaco gerado para cada condição de ensaio.

Espessura de corte [mm]	Ângulo de saída $\gamma = 10^\circ$	Ângulo de saída $\gamma = 17^\circ$	Ângulo de saída $\gamma = 24^\circ$
0,1	II A1	II B1	I $\Rightarrow \Rightarrow$ II C1
0,2	II A2	II B2	I \Rightarrow II C2
0,3	II \Rightarrow III A3	I \Rightarrow II B3	I C3
0,4	II $\Rightarrow \Rightarrow$ III A4	I B4	I C4

Obs.: os índices de A1 à C4 indicam a situação de corte de cada ensaio.

\Rightarrow tendência fraca

$\Rightarrow \Rightarrow$ tendência

Os resultados apresentaram-se muito próximos aos obtidos por Franz (1964) quando comparados à espécie "Sugar Pine", com teor de umidade de 8,0 %, por ele ensaiado, indicando cavacos somente do Tipo II para as situações A1, A2, B1 e B2, as quais correspondem a ângulos de saída de pequenos a intermediários, combinados a pequenas espessuras de corte; cavacos Tipo I

para situações B4, C3 e C4, as quais correspondem a ângulos de saída de médios a elevados, combinados a maiores espessuras de corte. As situações A3 e A4 apresentaram combinação dos Tipos II e III, com maior ocorrência do Tipo III para a situação A4, tal fato comprovou a tendência desse tipo de formação para pequenos ângulos de saída combinados a elevadas espessuras de corte. As demais situações, B3, C1 e C2 apresentaram combinação dos Tipos I e II, com maior ocorrência do Tipo II para a situação C1.

4.3 - Análise dos sinais de emissão acústica

As Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente, mostram a variação dos valores médios dos sinais de emissão acústica adquiridos em V_{rms} e o desvio padrão desses valores em função da espessura de corte, para os três ângulos de saída ensaiados. A seguir, apresenta-se os valores de variação em V_{rms} e a porcentagem que o mesmo representa para cada espessura de corte (tabela 4.6), os mesmos valores para cada ângulo de saída (tabela 4.7) e a variação dos valores médio do desvio padrão para cada ângulo de saída (tabela 4.8).

Tabela 4.6 - Valores de variação do sinal acústico em V_{rms} e respectiva porcentagem com a variação do ângulo de saída.

Ângulos	$h = 0,1 \text{ mm}$		$h = 0,2 \text{ mm}$		$h = 0,3 \text{ mm}$		$h = 0,4 \text{ mm}$	
	V_{rms}	%	V_{rms}	%	V_{rms}	%	V_{rms}	%
17 - 10°	0,25	30,5	0,55	103,8	0,18	19,2	0,83	70,9
24 - 17°	0,27	25,2	0,55	50,90	0,56	50,0	0,27	13,5

* valores negativos

Tabela 4.7 - Variação dos valores médios de emissão acústica com a variação da espessura de corte.

Espessura de corte [mm]	Ângulo de saída $\gamma_o = 10^\circ$		Ângulo de saída $\gamma_o = 17^\circ$		Ângulo de saída $\gamma_o = 24^\circ$	
	Vrms	%	Vrms	%	Vrms	%
0,1 a 0,2	0,05	6,1	0,01	0,9	0,29	21,6
0,1 a 0,3	0,12	14,6	0,05	4,7	0,34	25,4
0,1 a 0,4	0,35	42,7	0,83	86,9	0,93	69,4
0,2 a 0,3	0,07	8,1	0,04	3,7	0,05	3,1
0,2 a 0,4	0,30	34,5	0,92	85,2	0,64	39,3
0,3 a 0,4	0,23	24,5	0,88	78,6	0,59	35,1

Tabela 4.8 - Variação do desvio padrão dos valores médios de EA com a variação da espessura de corte.

Espessura de corte [mm]	Ângulo de saída $\gamma_o = 10^\circ$		Ângulo de saída $\gamma_o = 17^\circ$		Ângulo de saída $\gamma_o = 24^\circ$	
	σ	%	σ	%	σ	%
0,1 a 0,2	0,03	17,6	0,02	7,7	0,20	48,8
0,1 a 0,3	0,06	35,3	0,04	15,4	0,28	68,3
0,1 a 0,4	0,18	105,9	0,82	315,4	0,74	180,5
0,2 a 0,3	0,03	115,0	0,02	7,1	0,08	13,1
0,2 a 0,4	0,15	175,0	0,80	285,7	0,54	88,5
0,3 a 0,4	0,12	52,2	0,78	260,0	0,46	66,7

A Figura 4.3 relaciona o sinal de emissão acústica com a respectiva espessura de corte. Como se pode observar os valores da emissão acústica crescem com o correspondente aumento da espessura de corte para os três ângulos de saída utilizados, sendo que os maiores valores são verificados para os ângulos de 24° , 17° e 10° , respectivamente. Tais comportamentos dos sinais de emissão acústica podem ser creditados a maior quantidade de energia envolvida na remoção de volumes crescentes de material e aos mecanismos de formação de cavaco a eles associados. De um modo geral a remoção é acompanhada de fenômenos ligados aos deslocamentos da

estrutura do material, tal como o fendilhamento, cuja energia liberada reflete diretamente nos sinais de emissão acústica.

O maior nível de emissão acústica gerada para a maior espessura de corte, de 0,4 mm, sugere que esta condição envolve a remoção de material e, conseqüentemente, a formação de cavaco por mecanismos de fendilhamento à frente da aresta de corte da ferramenta. Tal fato pode ser comprovado pelo cavaco do Tipo I formado nesta condição para os ângulos de 17° e 24°.

Com relação ao tipo de cavaco formado e os correspondentes sinais médios de emissão acústica pode-se inferir que para a curva de maior ângulo (24°) o cavaco predominante foi do Tipo II, tendendo para o Tipo I na menor espessura (0,1mm). Já para a espessura de 0,2 mm o cavaco predominante passou a ser o cavaco do Tipo I com pequena incidência do Tipo II, até que para espessuras de 0,3 e 0,4 mm constatou-se a formação única de cavaco do Tipo I.

Analogamente também foi constatada a mudança do tipo de cavaco para curva de 17°, sendo que nesta condição a formação predominante foi do Tipo II para espessuras de até 0,3 mm, verificando-se pequena variação dos sinais de emissão acústica neste trecho. Após $h=0,3$ mm, nota-se uma variação acentuada na energia emissão acústica, correspondendo à mudança do cavaco para o Tipo I.

Por último, ângulo de 10°, o sinal de emissão acústica mostrou um comportamento próximo ao anterior até a espessura de 0,3 mm, sendo que para valores maiores ocorreu um pequeno aumento na energia emissão acústica, provavelmente devido à formação predominante de cavaco do Tipo III.

Na Figura 4.4 observa-se que o comportamento do desvio padrão em função da espessura de corte foi próximo aquele verificado na emissão acústica média (Figura 4.3), ou seja, houve aumento do desvio padrão dos sinais de EA com o correspondente aumento da espessura de corte.

Os maiores valores de desvio padrão são verificados na maior espessura de corte (0,4 mm) onde se dão mais intensamente os fenômenos de formação de cavaco por fendilhamento (cavaco Tipo I) e conseqüentemente as maiores parcelas de energia (representadas pela força principal de corte) identificadas por uma maior dispersão dos sinais de emissão acústica.

5 - CONCLUSÕES

De forma a identificar as situações de corte que promoveram o melhor desempenho no processo de usinagem da madeira, a fim de relacioná-los aos sinais acústicos adquiridos, visando o monitoramento e controle do processo através de emissão acústica, podemos concluir sobre os resultados aqui obtidos:

A usinagem da madeira com pequenas espessuras de corte requer pequenos esforços e promove formação de cavaco do tipo II para ângulos de saída pequenos e intermediários, resultando em sinais de emissão acústica de baixa amplitude, conforme pode-se constatar nos gráficos de aquisição de sinais, em anexo.

Para espessuras de corte entre 0,3 e 0,4 mm, os ângulos de 17 e 24° apresentaram melhor desempenho em relação à força de corte obtida para o ângulo de 10°, no entanto promoveram quase sempre a formação de cavaco tipo I, o qual reduz acentuadamente a qualidade da superfície usinada, dado a ocorrência de fendilhamento à frente da aresta principal de corte. Tal fato pode ser confirmado através das curvas de emissão acústica que apresentaram elevada amplitude dos sinais acústicos adquiridos.

Da análise efetuada através das tabelas de 4.3 à 4.8, a partir das Figuras de 4.1 à 4.4, conclui-se que a situação de corte mais adequada, à qual alia, desempenho de corte, formação de cavaco e emissão acústica, indicam espessuras de corte próximas de 0,2 e 0,3 mm e ângulos de saída próximos de 17°. Tal indicação pode ser confirmada através dos gráficos de sinais emissão acústica em anexo (páginas de a.13 à a.17), os quais apresentam

em todo o comprimento de corte um comportamento do sinal bastante regular, com amplitude intermediária e pequena variação ocasional do sinal. Isto pode ser visualizado no gráfico da Figura 5.1, onde o cavaco do Tipo II, que é o tipo de cavaco que apresenta o melhor acabamento da superfície usinada, se formou quando a espessura de corte foi de 0,1 mm e 0,2 mm e ângulos de saída de 10° e 17°.

Do exposto anteriormente, para situações de corte indicada, a tabela 4.2 estabelece a faixa de variação dos valores médios do sinal Vrms entre 1,08 e 1,12 e desvio padrão desses valores entre 0,27 e 0,30.

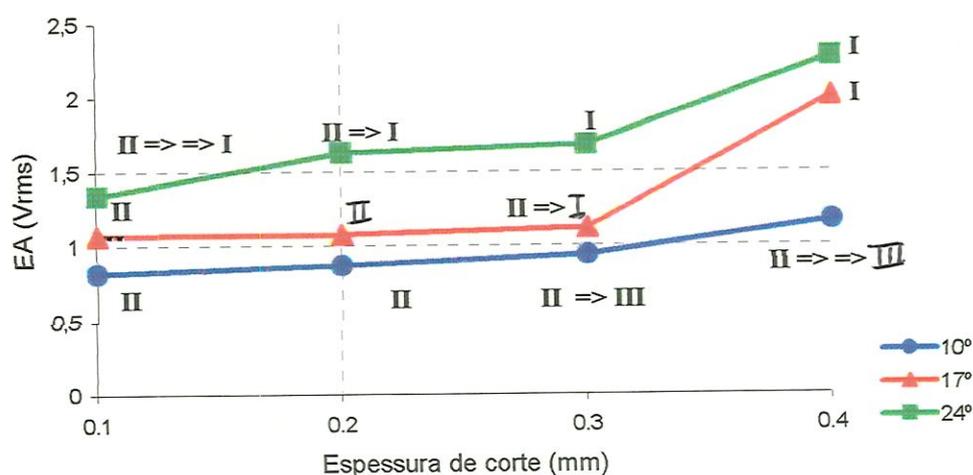


Figura 5.1 – Gráfico de valores de emissão acústica média em função da espessura de corte para os três ângulos de saída ensaiados, apresentando o tipo de cavaco gerado em cada situação.

Recomendações para trabalhos futuros

- Estudar o comportamento dos sinais de emissão acústica em diversas espécies de madeira de reflorestamento e produtos à base de madeira.

- Estudar a relação entre a emissão acústica e as variações estruturais da madeira, tais como revezamento de fibras, proximidade de nós, defeitos, etc.

- Estudar o comportamento dos sinais de emissão acústica na direção perpendicular às fibras.

- Estudar o comportamento dos sinais de emissão acústica no processo de fresamento periférico.

6 - BIBLIOGRAFIA

- ANALYSIS of acoustic emission from single-grit scoring. (1995). **Industrial Diamond Review (IDR)**, v.55, n.564, p.20-22.
- AMEMIYA, R.; AOYAMA, T. e TOCHIGI, T. (1981). Acoustic Cutting Force of a Single Saw Tooth I (Cutting force of a single swage set tooth). **Mokuzai Gakkaishi (JJWRS)**, v.27, n.4, p.290-295.
- ARROYO MENDIZABAL, R.O. (1991). **Monitoramento do Processo de Retificação Através de Técnicas Acústicas**. São Carlos. 108p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988). **NBR - 6162/88 - Conceito da Técnica de Usinagem, Movimentos e Relações Geométricas - Terminologia**. São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1989). **NBR - 6163/89 - Conceito da Técnica de Usinagem, Geometria da Cunha de Corte - Terminologia**. São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR - 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira**. São Paulo.

- BIFANO, T.G.; YI, Y. (1992). Acoustic emission as an indicator of material removal regime in glass micro-machining. **Precision Engineering**, v.14, n.4, p. 219-228.
- BLUM, T.; DORNFELD, D.A. (1990). Grinding process feedback using acoustic emission. In: INTERNATIONAL GRINDING CONFERENCE AND EXPOSITION, 4., Dearborn, 1990. **Proceedings**. Michigan, SME.
- BRINKSMEIER, E. (1993). Application of AE Sensors for the Monitoring of the Dressing Process. **Annals of the CIRP**, v. 42. n.1, p.397-400.
- CALORI, J.V.; FIER, I.S.N.; KIKUTI, P. (1995). Estudo das Propriedades Físico-Mecânicas da Madeira de Eucalipto Grandis em diferentes idades. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 5., Belo Horizonte, 1995. **Anais**. Minas Gerais, CEFET/MG. v.2, p.123-130.
- CHANG, Y.P.; DORNFELD, D.A. (1993). Chatter and surface pattern detection for grinding processes using a fluid coupled acoustic emission sensor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINING OF ADVANCED MATERIALS, 1993. **Proceedings**. s.n. p.159-167.
- CYRA, G. e TANAKA, C. (1997). The Effects of grain orientation on routing surface finish, cutting force and acoustic emission. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13, Vancouver, 1997. **Proceedings**. Vancouver, Ed. Forintec, Canada corp.. p.323-331.
- DINIZ, A.E.; BALDO, E.D.; OLIVEIRA, J.F.G.; FELIPE JR, J. Um Método adequado para a retificação de precisão com pequena remoção de cavaco. **Máquinas e Metais**, n.350, p.78-101.

- DOI, O.; YOKOYAMA, M. (1975). Cutting force analysis of wood – I – (orthogonal cutting accompanied with splits ahead of tool). **Bulletin of the JSME**, 18 (22): 905-912, Aug.
- DOI, O.; YOKOYAMA, M. (1977). Cutting force analysis of wood – II – (orthogonal cutting accompanied with front split down split, side crack and lateral crack). **Bulletin of the JSME**, v. 20, n. 140: p.240-247, Feb..
- DORNFELD, D.A. (1988). Monitoring of the cutting process by means of AE sensor. **INTERNATIONAL MACHINE TOOL ENGINEERS CONFERENCE**, 3., Tokyo, **Proceedings**, 17p.
- DORNFELD, D.A. (1992). Application of acoustic emission techniques in manufacturing. **NDT & International**, v.25, n.6, p.259-269.
- DORNFELD, D.A.; CAI, H.G. (1984). An Investigation of grinding and wheel loading using acoustic emission. **Journal of Engineering for Industry**, v.106, p.28-33.
- DORNFELD, D.A.; LEMASTER, R.L. (1982). Sensing of tool wear by acoustic emission. In: **INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR**, 7, Richmond, 1982. **Proceedings**. Richmond, Ed. J. F. Walters, p.312-323.
- FELIPE JUNIOR, J. (1996). **Contribuição para Implementação de funções de retificação inteligente (R.I.) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica**. São Carlos. 138p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FERRARESI, D. (1970). **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo. Edgard Blucher. 751p.



- GONÇALVES, M.T.T. (1990). **Contribuição para o estudo da usinagem de madeiras**. São Carlos. 241p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GONÇALVES, M.T.T. (1993). **Proposta de metodologia para medição dos esforços de corte da madeira**. São Carlos. 148p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- GONÇALVES, M.T.T.; RODRIGUES, R.; TAKAHASHI, J.S.I. (1997). An Experimental analysis of the Influences of machining conditions on the parallel cutting force in orthogonal cutting for ten brazilian wood species. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13, Vancouver, 1997. **Proceedings**. Vancouver, Ed. Forintek Canada cop., p.481-487.
- GONÇALVES, M.T.T.; RUFFINO, R.T. (1989). Mecanismo de formação do cavaco na usinagem da madeira - In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., São Carlos, 1989. **Anais**. São Paulo, LaMEM/EESC/USP. v.4, p.163-202.
- GONÇALVES, M.T.T.; RUFFINO, R.T. (1993). Proposta de metodologia para medição dos esforços de corte na usinagem da madeira - In: ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, São Paulo, 1993. **Anais**. São Paulo, EPUSP/PEF. v.1, p.145-155.
- GONÇALVES, M.T.T.; RUFFINO, R.T. (1997). Measurement of cutting force in orthogonal cutting of wood. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13, Vancouver, 1997. **Proceedings**. Vancouver, Ed. Forintek Canada corp., p.499-505.

- GONÇALVES, M.T.T.; TAKAHASHI, J.S.I.; RODRIGUES, R. (1997). Analysis of the specific cutting force in parallel direction to the grain for ten brazilian wood species. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13; Vancouver, 1997. **Proceedings**. Vancouver, Ed. Forintek Canada corp., p.489-497.
- GONÇALVES, M.T.T.; TEIXEIRA, M.C. (1995). Relacionamento entre a força de corte e alguns parâmetros que Interferem em sua grandeza. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 5., Belo Horizonte, 1995. **Anais**. Minas Gerais, CEFET/EEUFMG/IBRAMEM. v.2, p.185-194.
- GONÇALVES, R.; HERNÁNDEZ, R; NÉRI, A. C. (1998). Avaliação de forças de corte em madeira de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., Florianópolis, 1998. **Anais**. Santa Catarina, UFSC/IBRAMEM. v.3, p.437-448.
- GRONLUND, A. (1988). Measuring and modelling of cutting forces - progress report on an ongoing project. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 9; Richmond, 1988. **Proceedings**. Richmond, Ed. Forest Products Laboratory, p.342-350.
- HARDY JR., H.R. (1972). Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research. **Acoustic Emission**, Philadelphia, ASTM, p.41-83, (ASTM STP 505)
- HARTBOWER, C.E.; REUTER, W.G.; MORAIS, C.F.; CRIMMINS, P.P. (1972). Use of acoustic emission for the detection of weld and stress corrosion cracking. **Acoustic Emission**, Philadelphia, ASTM, p.187-221. (ASTM STP 505).

- HELLMEISTER, J.C. (1983). Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, I., São Carlos, 1983. **Anais**. São Paulo, LaMEM/EESC/USP. v.1, p.1-37.
- HUNDT, W.; KUSTER, F.; REHSTEINER, F. (1997). Model-based emissão acústica monitoring of the grinding process. **Annals of the CIRP**, v. 46. n.1. p.243-247.
- HUTTON, P.H. (1972). Acoustic emission applied outside of the laboratory. **Acoustic emission**, Philadelphia, ASTM, p.114-128, (ASTM STP 505).
- INASAKI, I. (1985). Monitoring of dressing and grinding process with acoustic emission. **Annals of the CIRP**, v. 34. n.1. p.277-280.
- INASAKI, I. (1991). Monitoring and optimization of internal grinding process. **Annals of the CIRP**, v. 40, n.1, p.182-184.
- KANNATEY-ASIBU JR, E.; DORNFELD, D.A. (1981). Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting. **Journal Engineering for Industry**. V.103, p.330-340.
- KATO, K.; LEMASTER, R.L. (1991). Generation of acoustic emission during chip formation. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 10. Richmond, 1993. **Proceedings**. Richmond, Ed. Forest Products Laboratory, p.146-158.
- KAWAMOTO, S. (1994). Attenuation of acoustic emission waves during the drying of wood I - relationship between drying checks in wood discs and acoustic emission behavior. **Mokuzai Gakkaishi - JJWRS**, v.40, n.7, p.694-702.

- KIVIMAA, E. (1952). Die schnittkraft in der holzbearbeitung. **Holz als Roh und Werkstoff**, v.10, n.3, p.94-108.
- KOCH, P. (1964). **Wood machining Processes**. New York. Ronald Press Company. 530p.
- KOLMANN, F.F.P. (1959). **Tecnologia de la madera e sus aplicaciones**. Madri. 675p.
- KÖNIG, W.; KLUMPEN, T. (1993). Monitoring and sensor concepts for higher process reliability. In: INTERNATIONAL GRINDING, 5., Cincinnati, 1993. **Anais**. Ohio.
- KÖNIG, W.; MEYEN, H.P. (1990). AE in grinding and dressing: accuracy and process reliability. In: INTERNATIONAL GRINDING CONFERENCE, 4, Dearborn, 1990. **Proceedings**. Michigan, 20p.
- LAN, M.S.; NAERHEIM, Y. (1985). Application of acoustic emission monitoring in machining. NORTH AMERICAN MANUFACTURING RESEARCH INSTITUTION (NAMRC), 13., **Proceeding**, p.310-313, 1985.
- LEE, H.; QUARLES, S.L.; SCHNIEWIND, A.P. (1996). Wood fracture, acoustic emission, and the drying process. part 2. acoustic emission pattern recognition analysis. **Wood Science and Technology**. v.30. p.283-292.
- LEMASTER, R.L.; DORNFELD, D.A. (1993). The use of acoustic emission to monitor an abrasive machining process. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 11. Norway, 1993. **Proceedings**. Norway, Ed. Norwegian Institute of wood technology, p.231-245.
- LIANG, S.Y.; DORNFELD, D.A. (1987). **Detection of cutting tool wear using adaptive time series modeling of acoustic emission signal -**

sensors for manufacturing, New York, ASME, p.27-38.

MARINELLI FILHO, N. (1997). **Monitoramento da operação de dressagem de rebolos através da emissão acústica.** São Carlos. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MARINESCU, I.D.; ZENG, R. (1996). Acoustic emission investigation of ceramic lapping process. In: INTERNATIONAL MANUFACTURING ENGINEERING CONFERENCE, Storrs, 1996. **Proceedings.** Storrs, p.51-55.

MATSUMOTO, H.; MURASE, Y. (1997). Acoustic emission characteristics in wood sanding - acoustic emission measurement in disc sanding. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13, Vancouver, 1997. **Proceedings.** Vancouver, Ed. Forintek Canada corp., p.353-361.

McKENZIE, W.M. (1960). Fundamental aspects of the wood cutting process. **Forest Products Journal**, v.10, n.9, p. 447-456.

McKENZIE, W.M. (1962). The relationship between the cutting properties of wood and its physical and mechanical properties. **Forest Products Journal**, v.12, n.6, p. 287-294.

McKENZIE, W.M.; FRANZ, N.C. (1964). Basic aspects of inclined or oblique wood cutting. **Forest Products Journal**, v.14, n.12, p. 556-566.

McKENZIE, W.M. (1967). Effects of edge bluntness in the cutting of wood. **Forest Products Journal**, v.17, n.4, p. 45-50.

McKENZIE, W.M. (1991). Application of the slow-cutting experimental approach to some sawing problems. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 10, Richmond, 1991. **Proceedings.** Richmond,

Ed. Forest Products Laboratory, p.174-188.

MENDIZABAL, R.O.A. (1991). **Monitoramento do processo de retificação através de técnicas acústicas**. São Carlos. 108p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MOMBER, A. W.; KOVACEVIC, R.; MOHAN, R. S. (1995). Acoustic emission measurements on brittle materials during abrasive waterjet cutting. In: INTERNATIONAL MACHINING AND GRINDING CONFERENCE – SME, **Proceeding**, p. 441-457.

NÉRI, A.C. (1998). **Medida de Forças de Corte na Madeira de Eucalipto**. Campinas. 152p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A.; SCHNEIDER, C. (1994). **A Otimização da Dressagem e a Redução do Custo de Rebolos**. Revista Máquinas e Metais, p.32-42.

OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A.; WINTER, B. (1994). Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface Through Acoustic Emission. **Annals of the CIRP**, v. 43. n.1. p.291-294.

OLIVEIRA, J.F.G.; EIRAS, J.A.; FELIPE JR.,J.; BASSORA, L.A.; VIEIRA JR., M.; MARINELLI FILHO, N. (1995). Desenvolvimento de capsulas piezoelétricas de emissão acústica para o controle de retificação CNC. **Congresso Nacional da Sobracon**.

OZAKI, S.; FUKUI, H. (1982). Studies on oblique cutting of wood I - cutting forces in cutting parallel and perpendicular to the grain. **Mokuzai Gakkaishi - JJWRS**, v.31, n.5, p.284-294.

REVISTA DA MADEIRA (1997). Curitiba, n.32, ano 6, Agosto.

RODRIGUES, R.; GONÇALVES, M.T.T., MUSSI, F. (1998). Estudo de usinabilidade da madeira para operações de desbaste em espécies de reflorestamento. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., Florianópolis, 1998. **Anais**. Santa Catarina, UFSC/IBRAMEM. v.3, p.427-436.

SANCHEZ, L.E.A. (1997). **Estudo do comportamento da emissão acústica (ea) no ensaio de riscamento em materiais cerâmicos**. São Carlos. 123p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

SAWADA, T. & OHTA, M. (1997). Simulation of the chip formation in the orthogonal wood cutting by the extended distinct element method. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. Vancouver, Ed. Forintek Canada corp., p.525-533.

SCHNIEWIND, A.P.; QUARLES, S.L.; LEE, H. (1996). Wood fracture, acoustic emission, and the drying process. part 1. acoustic emission associated with fracture. **Wood Science and Technology**. v.30. p.273-281.

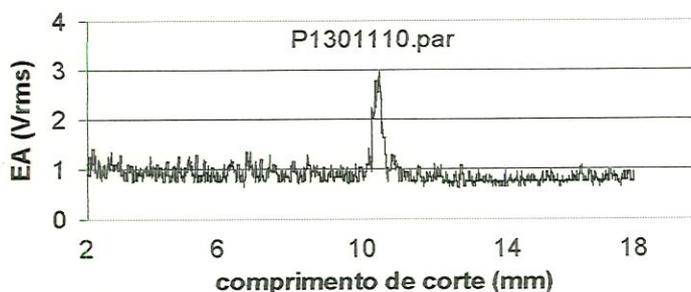
SPEICH, G.R.; FISHER, R.M. (1972). Acoustic emission during martensite formation. **Acoustic emission**, Philadelphia ASTM, p.140-151. (ASTM STP 505).

STEWART, H. A. (1988). Analysis of tool forces and edge recession after cutting medium - density fiberboard. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 9, Richmond, 1988. **Proceedings**. Richmond, Ed. Forest Products Laboratory, p.320-341.

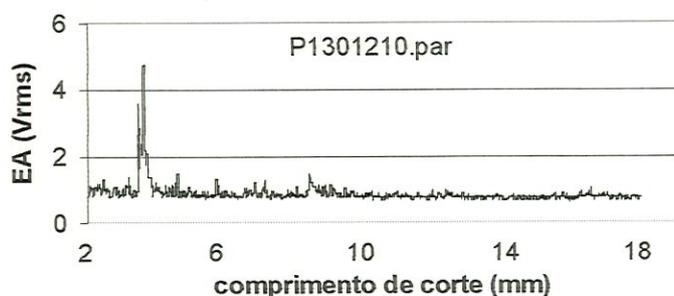
- TANIKELLA, B.V.; SCATTERGOOD, R.O. (1995). Acoustic emission during indentation fracture. **Journal of the American Ceramic Society**. v.78, n.6, p.1698-1702.
- TAKAHASHI, J. S. I., GONÇALVES, M. T. T., SOUZA, A. J. D. (1998). Análise do desempenho de corte das espécies comerciais grubixá e imbuia. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 6., Florianópolis, 1998. **Anais**. Santa Catarina, UFSC/IBRAMEM. v.3, p.449-458.
- TANAKA, C. (1991). Relationship between surface finish quality and acoustic emission count rate in circular sawing. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 10, Richmond, 1991. **Proceedings**. Richmond, Ed. Forest Products Laboratory, p.308-316.
- TETELMAN, A.S.; CHOW, R. (1972). Acoustic emission and microcracking processes. **Acoustic emission**, Philadelphia, ASTM, p.30-40. (ASTM STP 505).
- VIEIRA JR., M. (1996). **Avaliação da dureza de rebolos em trabalho através do uso da emissão acústica na dressagem**. São Carlos. 186p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- YEE, K.W. (1987). Material dependency of chip-form detection using acoustic emission. **Manufacturing Technology Review**, v.2, p.458-462.

ANEXOS

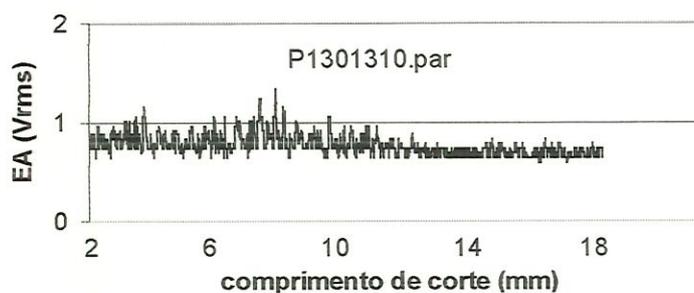
Neste anexo são apresentadas as curvas dos sinais de emissão acústica geradas durante a usinagem da espécie de madeira "Pinho" para os corpos de prova de números 13, 14 e 15.



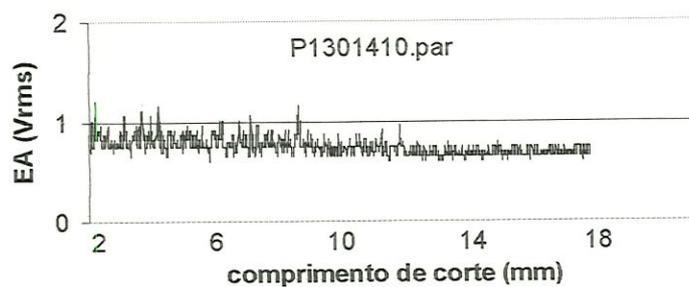
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 1 - ângulo 10°



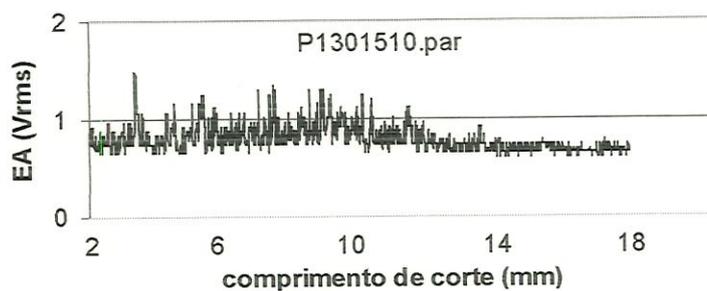
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 2 - ângulo 10°



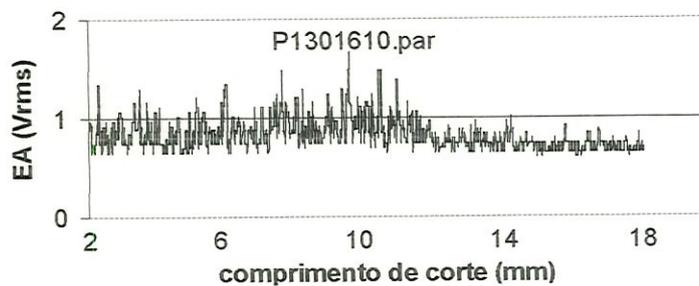
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 3 - ângulo 10°



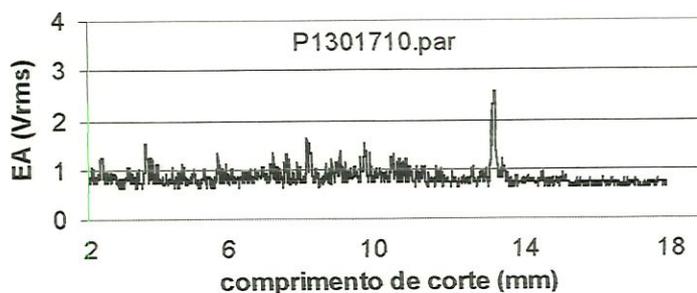
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 4 - ângulo 10°



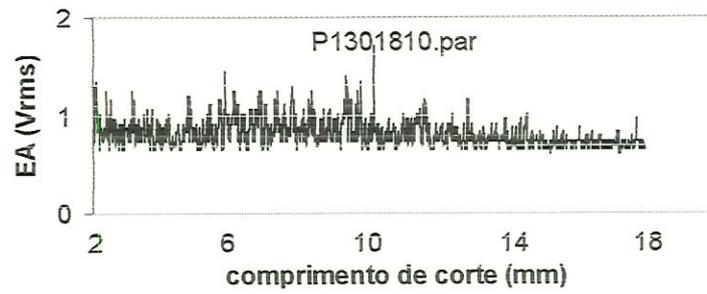
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 5 - ângulo 10°



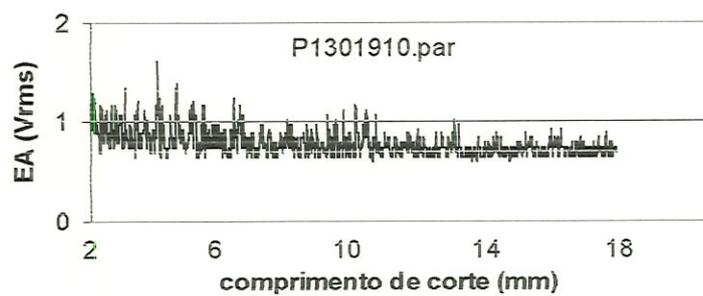
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 6 - ângulo 10°



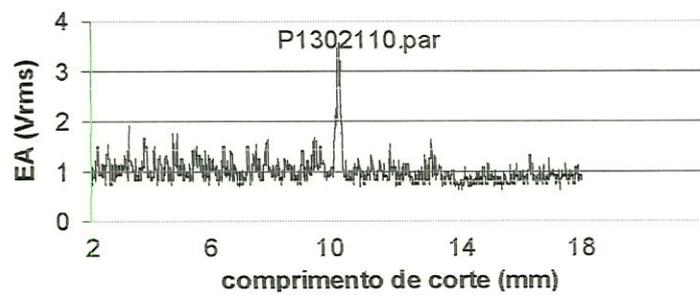
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 7 - ângulo 10°



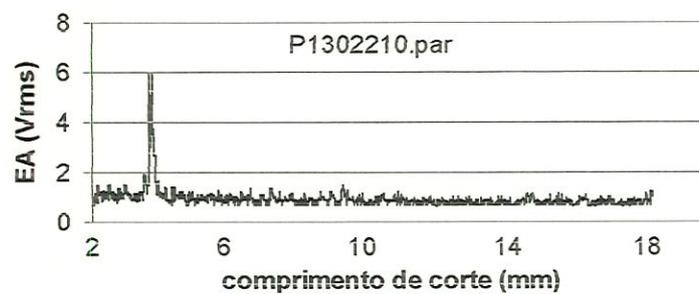
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 8 - ângulo 10°



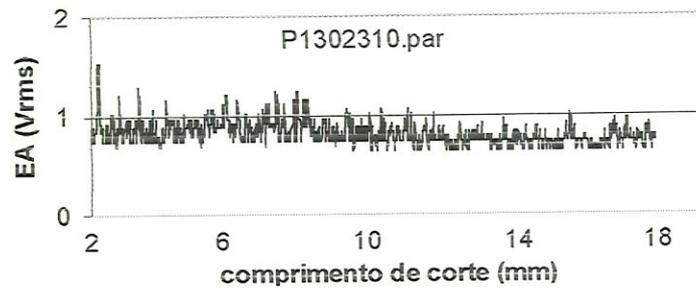
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,1mm - canal 9 - ângulo 10°



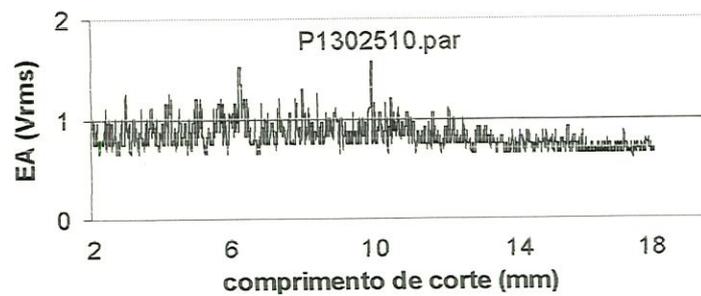
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,2mm - canal 1 - ângulo 10°



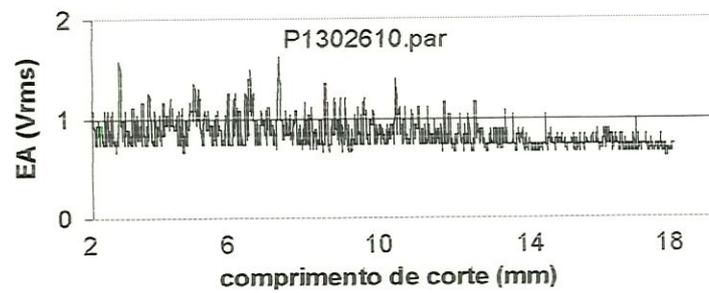
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,2mm - canal 2 - ângulo 10°



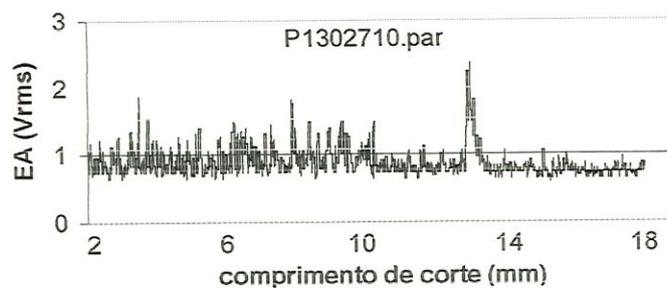
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,2mm - canal 3 - ângulo 10°



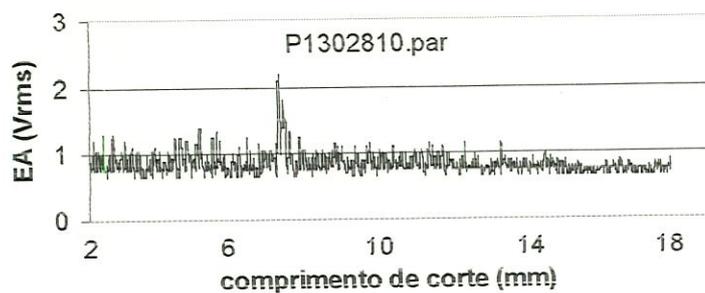
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,2mm - canal 5 - ângulo 10°



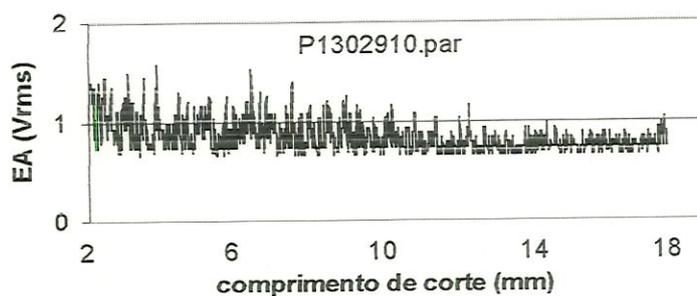
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,2mm - canal 6 - ângulo 10°



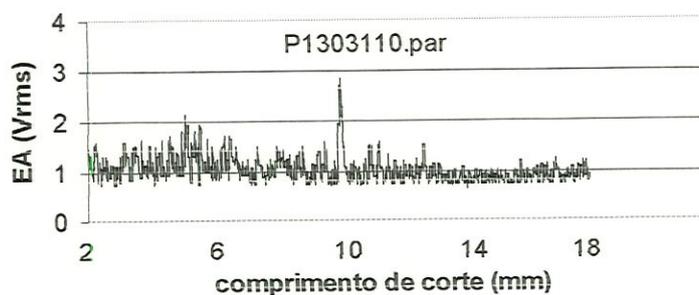
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,2mm - canal 7 - ângulo 10°



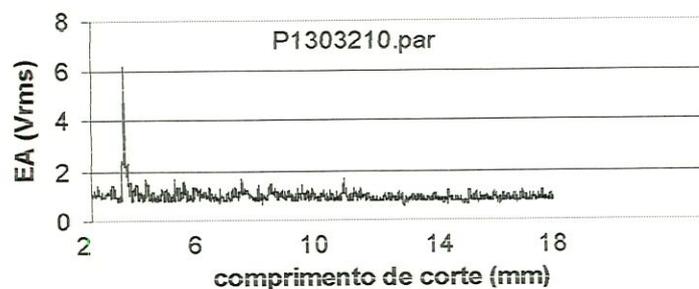
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,2mm - canal 8 - ângulo 10°



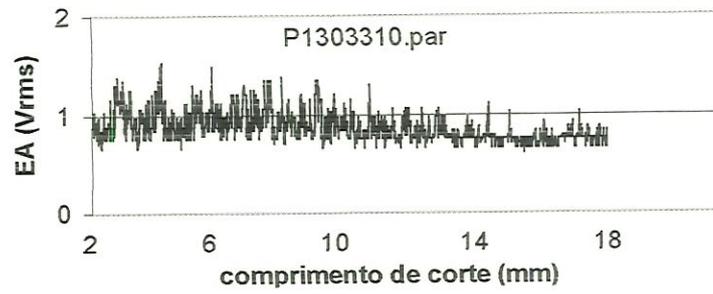
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,2mm - canal 9 - ângulo 10°



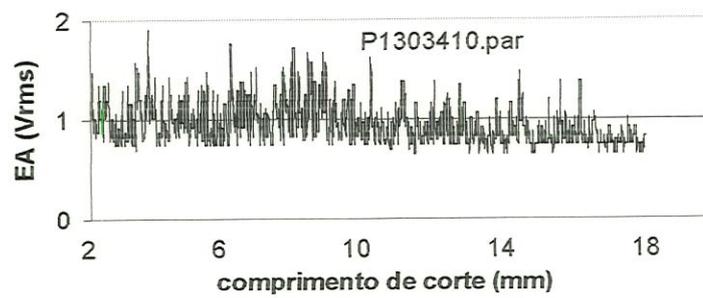
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 1 - ângulo 10°



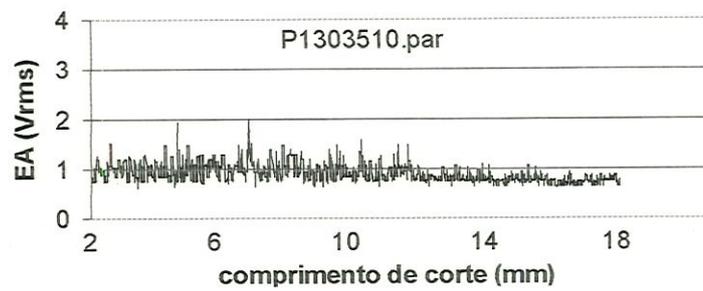
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 2 - ângulo 10°



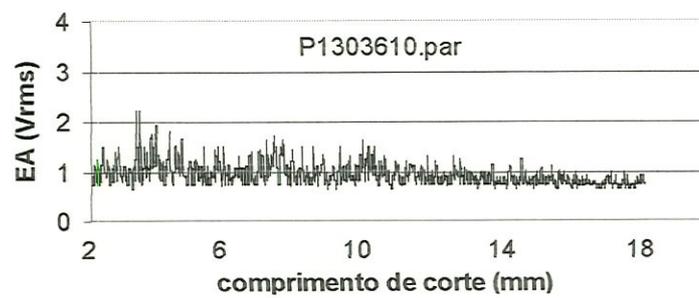
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 3 - ângulo 10°



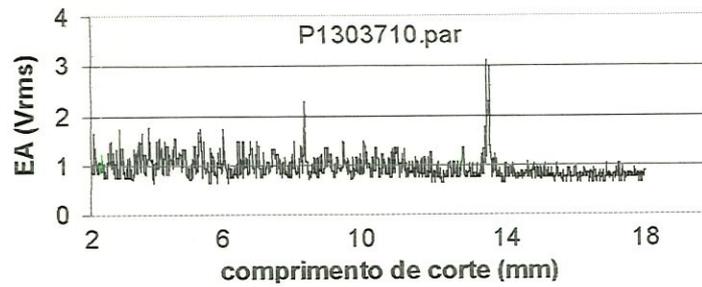
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 4 - ângulo 10°



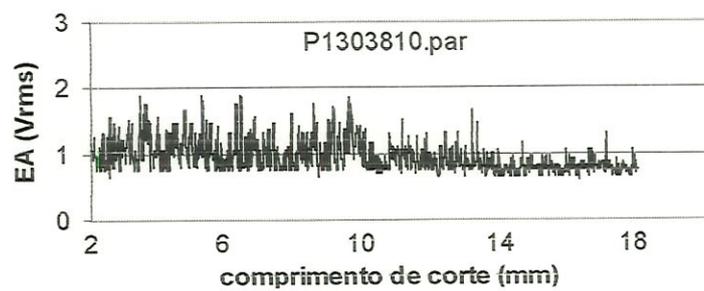
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 5 - ângulo 10°



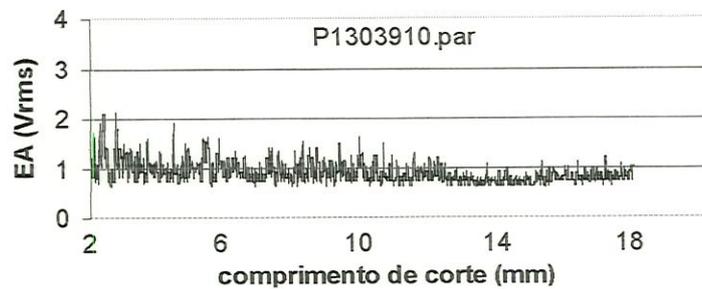
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 6 - ângulo 10°



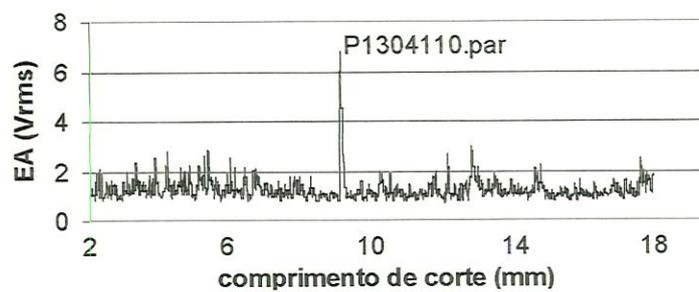
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 7 - ângulo 10°



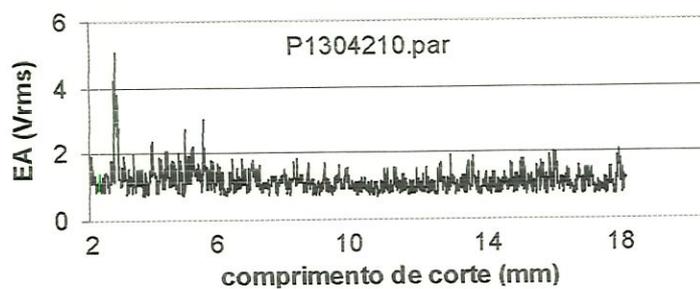
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 8 - ângulo 10°



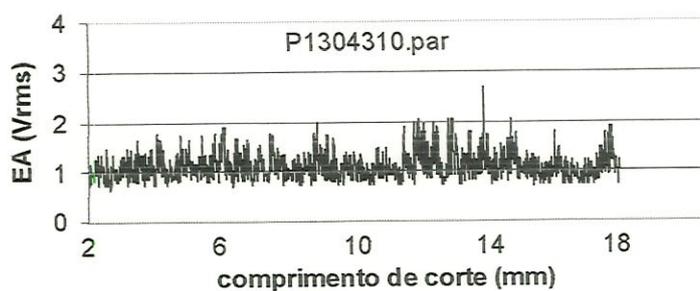
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,3mm - canal 9 - ângulo 10°



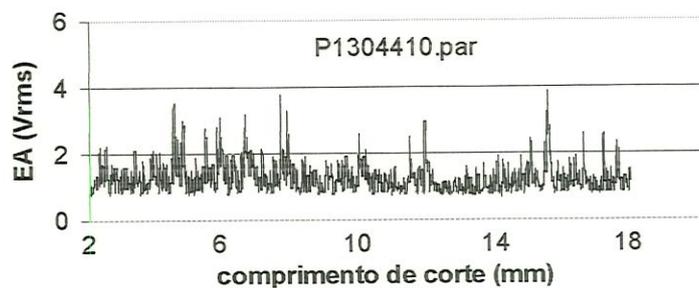
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 1 - ângulo 10°



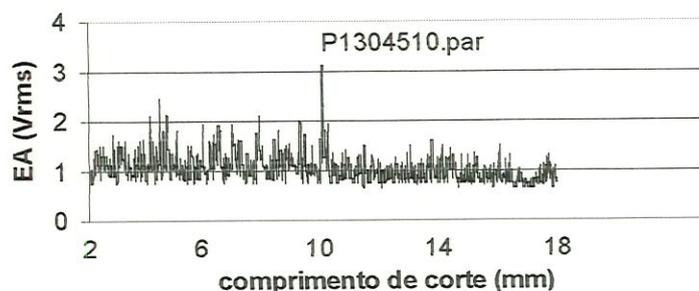
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 2 - ângulo 10°



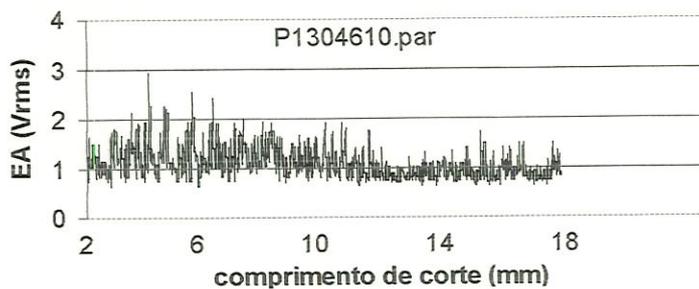
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 3 - ângulo 10°



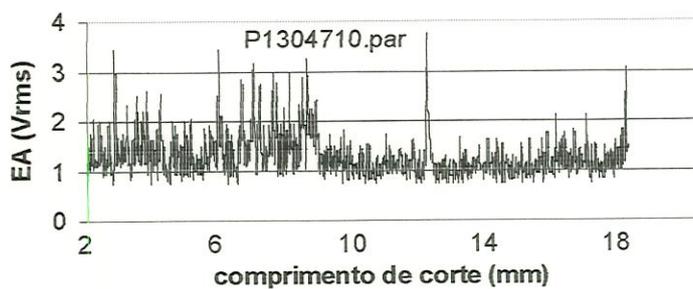
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 4 - ângulo 10°



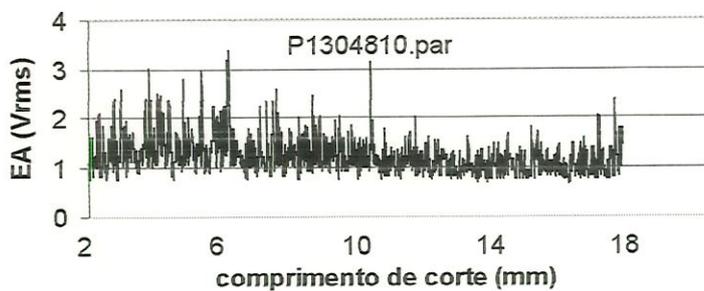
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 5 - ângulo 10°



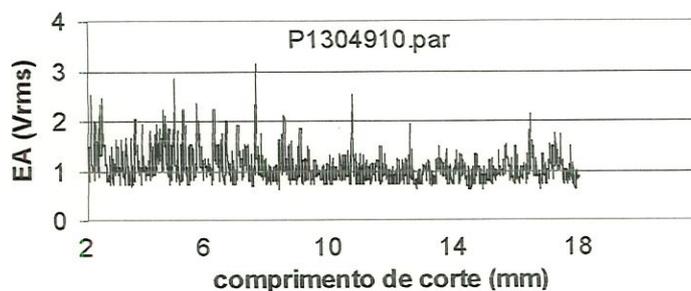
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 6 - ângulo 10°



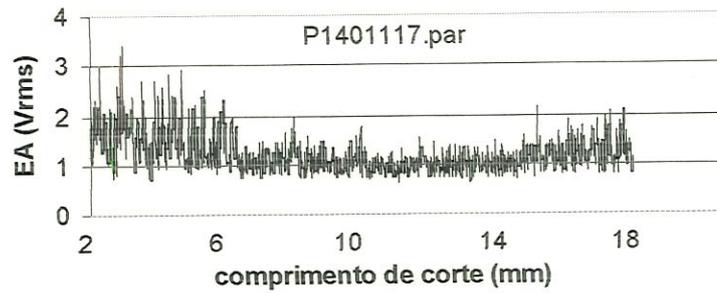
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 7 - ângulo 10°



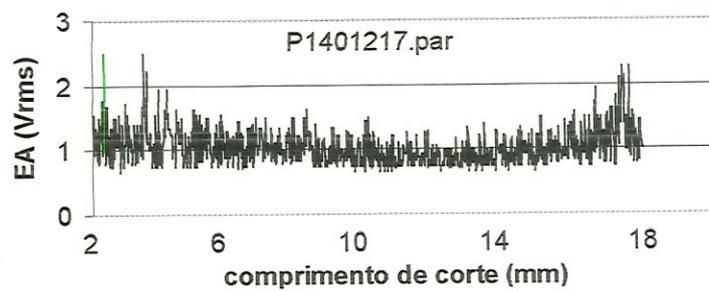
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 8 - ângulo 10°



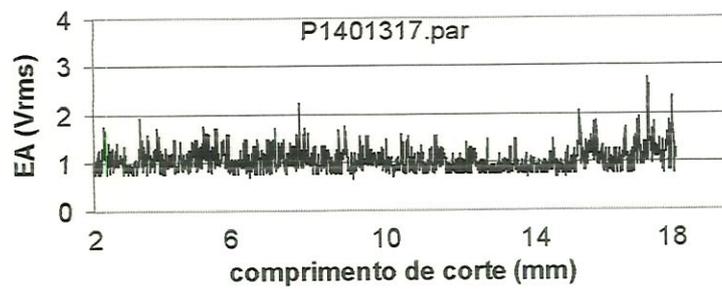
Identificação: corpo de prova nº 13 - h=0,4mm - canal 9 - ângulo 10°



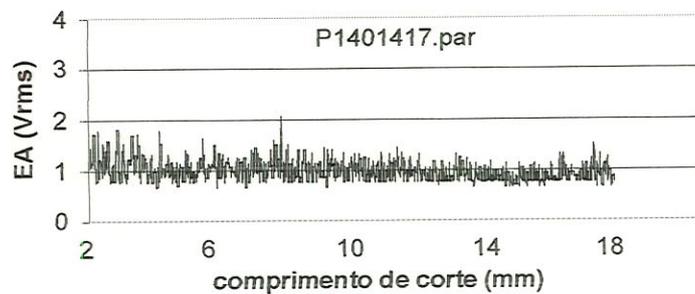
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 1 - ângulo 17°



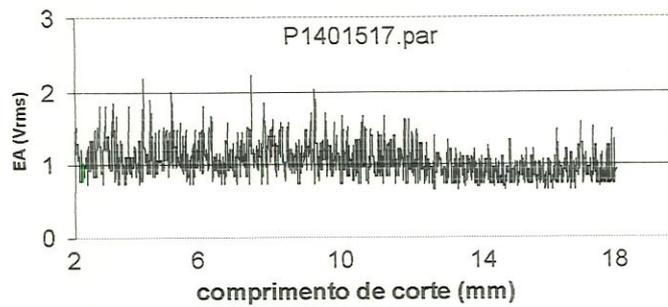
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 2 - ângulo 17°



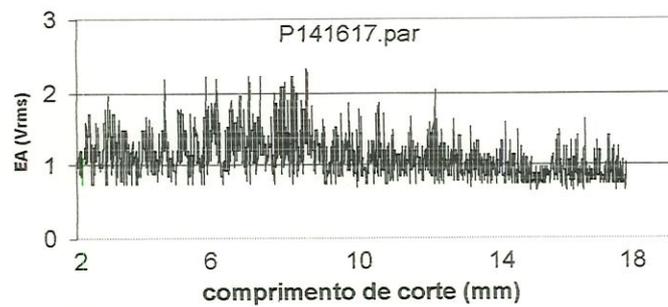
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 3 - ângulo 17°



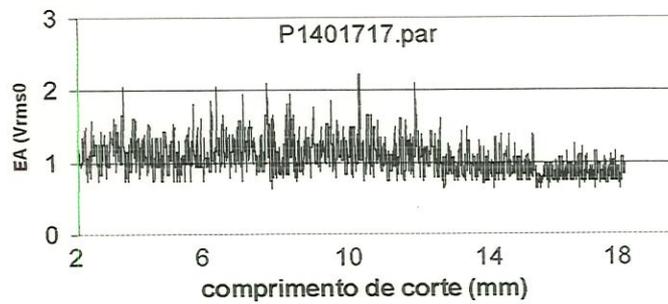
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 4 - ângulo 17°



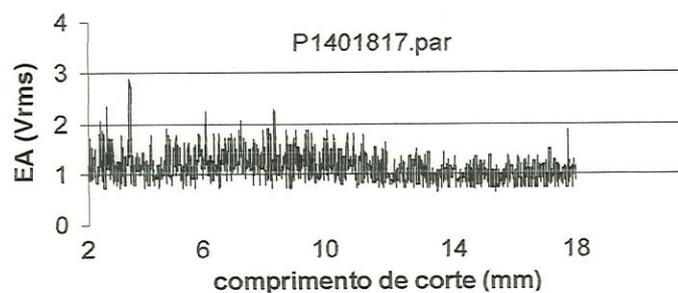
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 5 - ângulo 17°



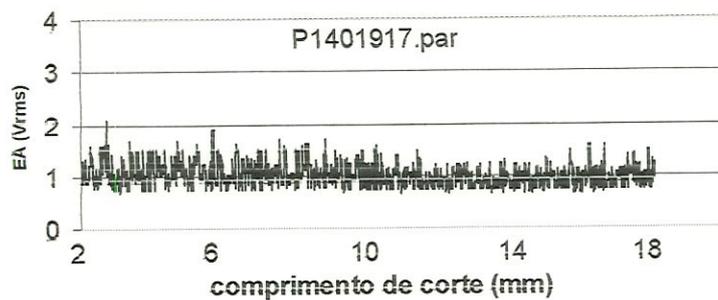
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 6 - ângulo 17°



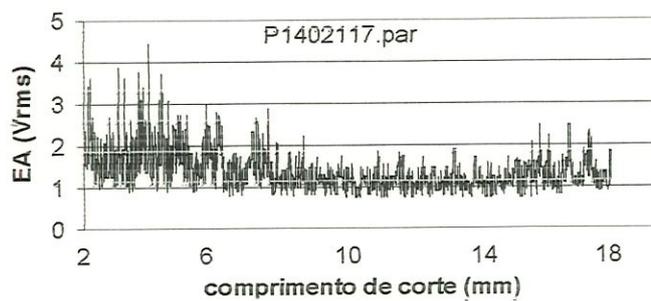
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 7 - ângulo 17°



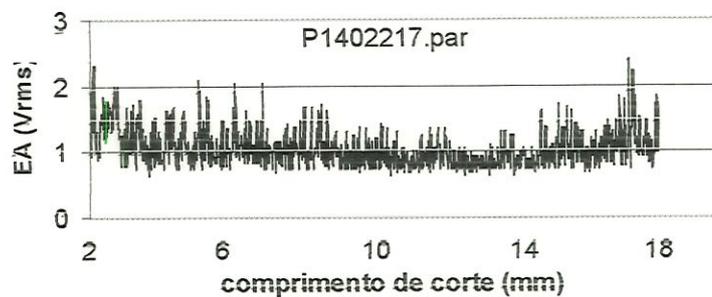
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 8 - ângulo 17°



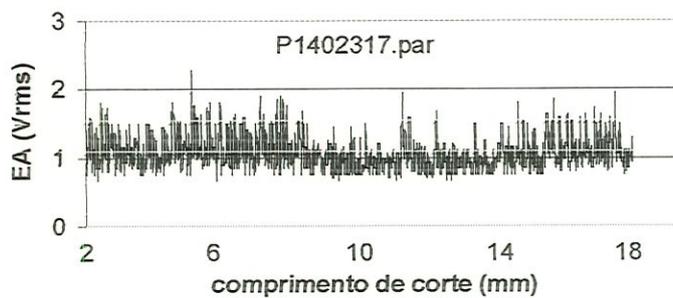
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,1mm - canal 9 - ângulo 17°



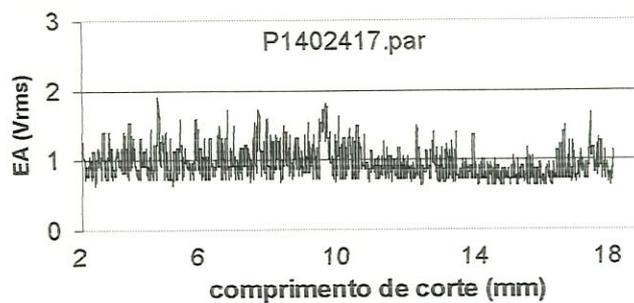
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 1 - ângulo 17°



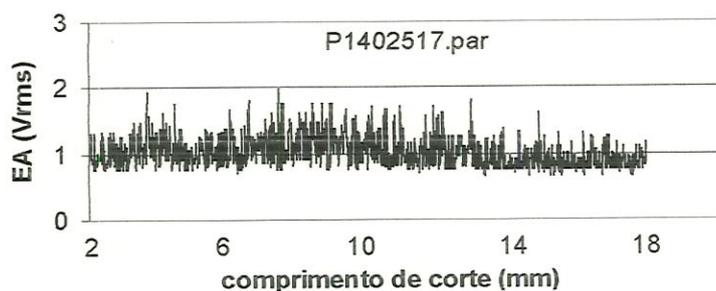
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 2 - ângulo 17°



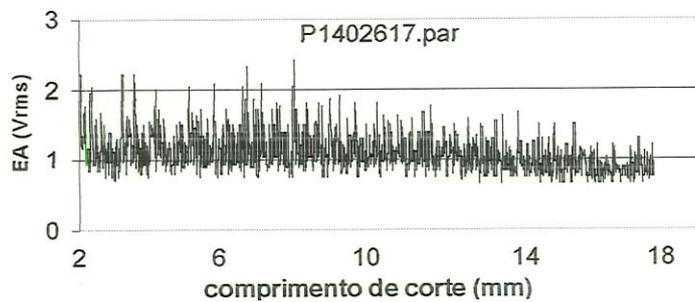
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 3 - ângulo 17°



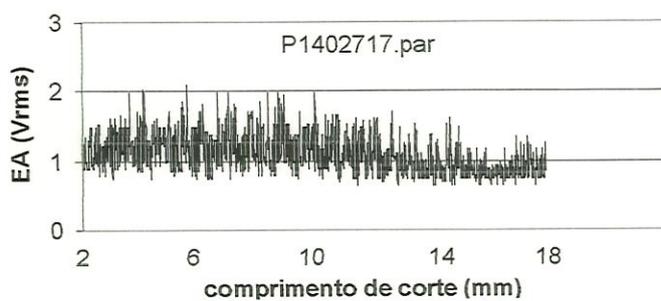
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 4 - ângulo 17°



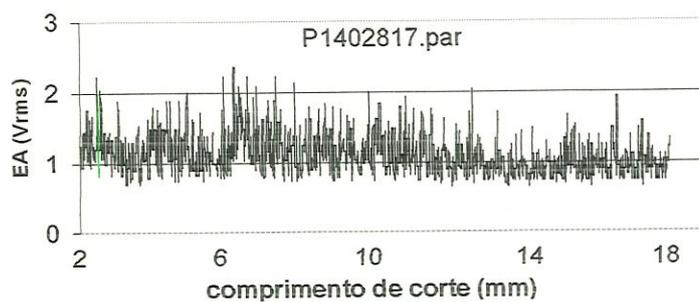
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 5 - ângulo 17°



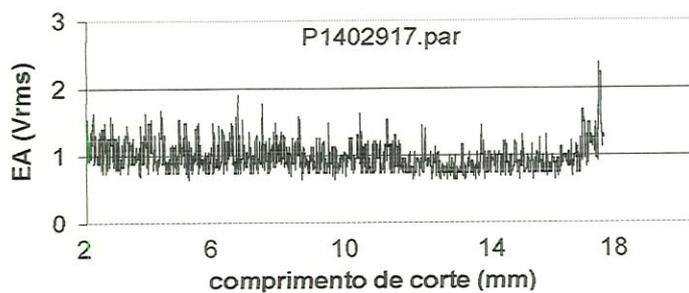
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 6 - ângulo 17°



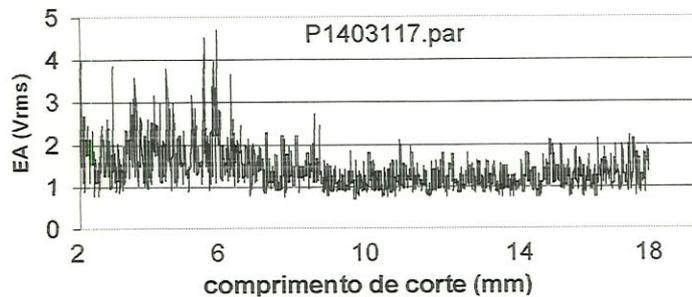
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 7 - ângulo 17°



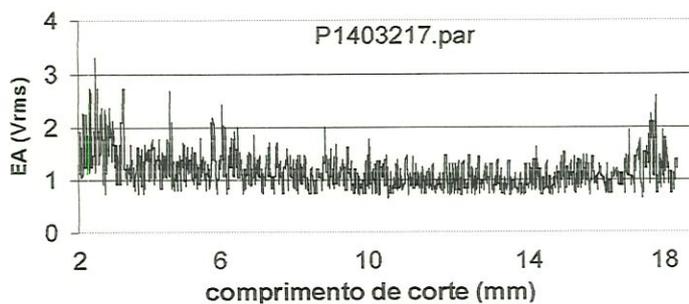
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 8 - ângulo 17°



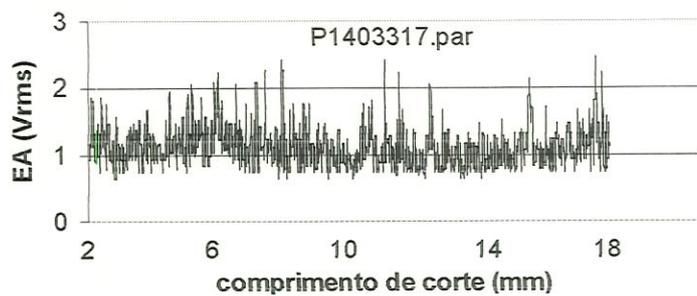
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,2mm - canal 9 - ângulo 17°



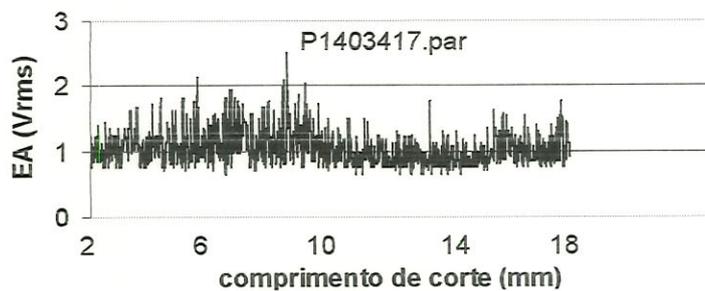
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 1 - ângulo 17°



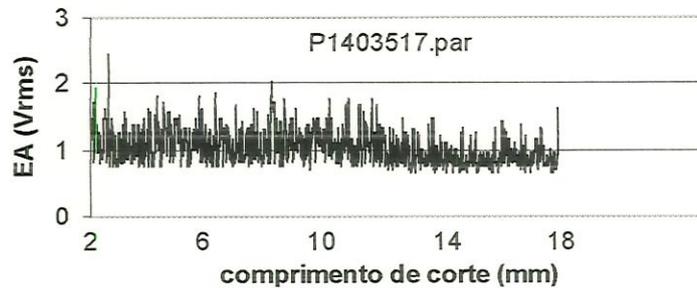
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 2 - ângulo 17°



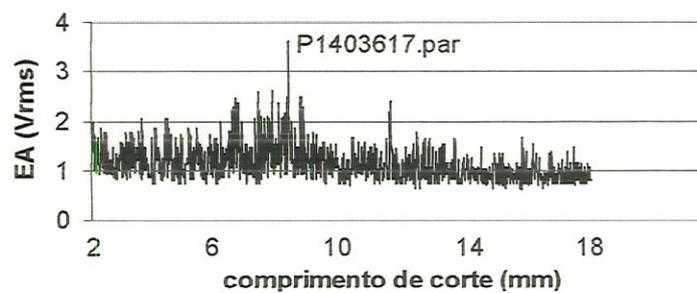
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 3 - ângulo 17°



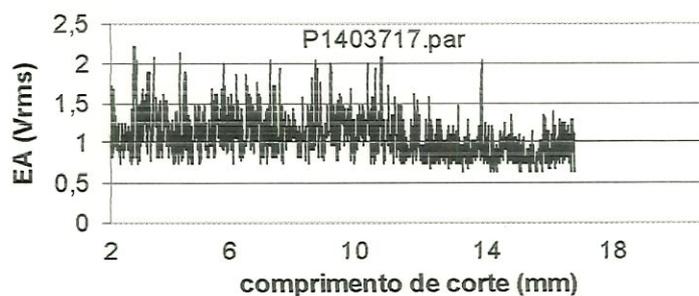
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 4 - ângulo 17°



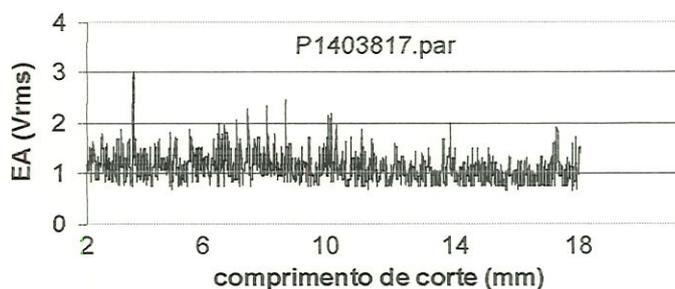
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 5 - ângulo 17°



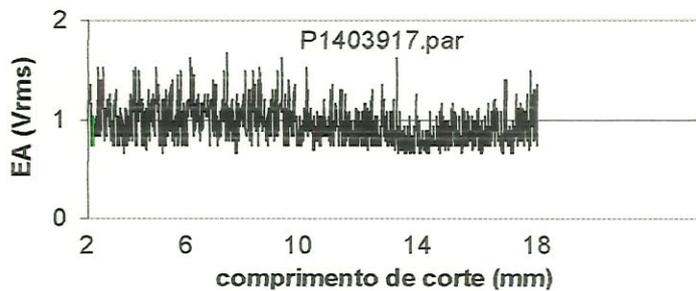
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 6 - ângulo 17°



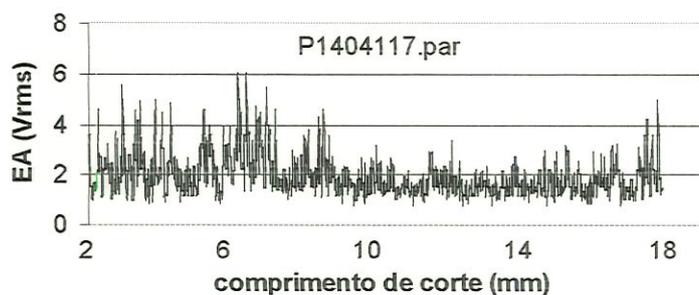
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 7 - ângulo 17°



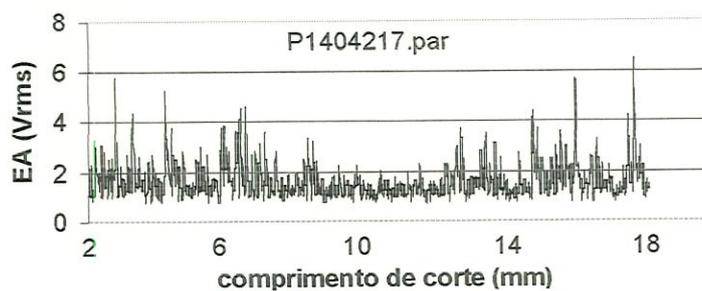
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 8 - ângulo 17°



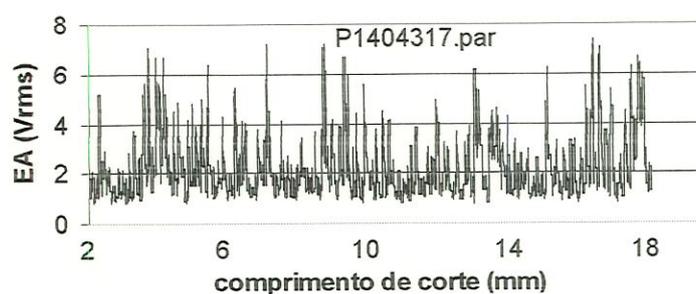
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,3mm - canal 9 - ângulo 17°



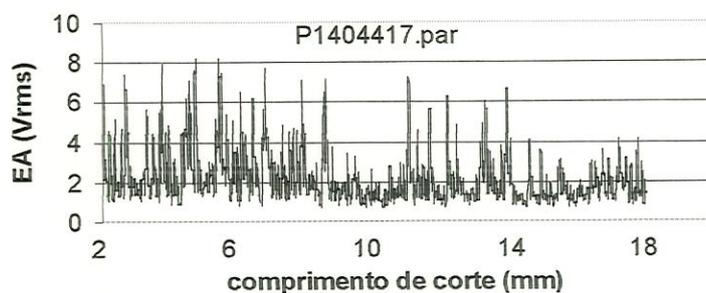
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 1 - ângulo 17°



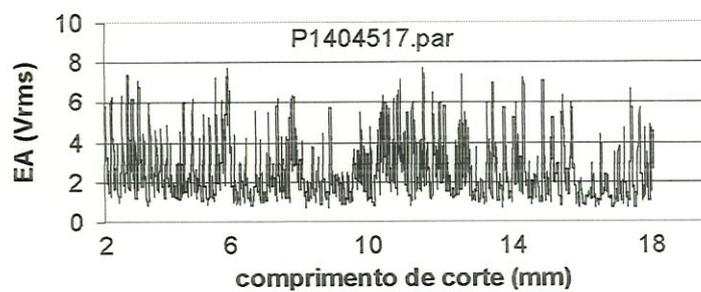
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 2 - ângulo 17°



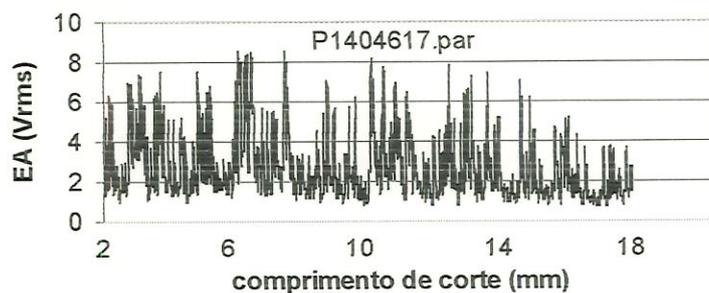
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 3 - ângulo 17°



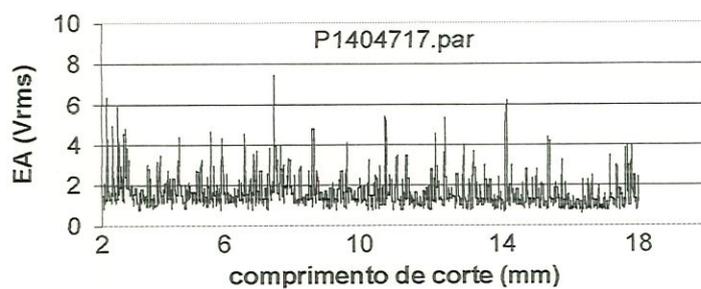
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 4 - ângulo 17°



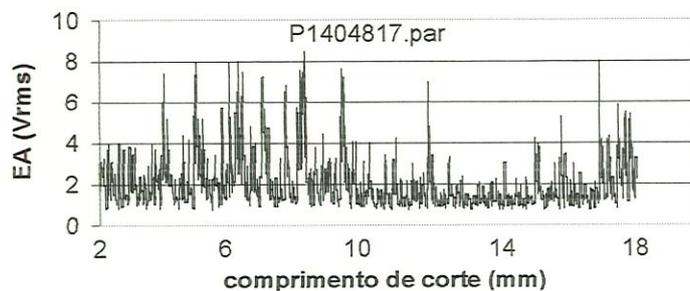
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 5 - ângulo 17°



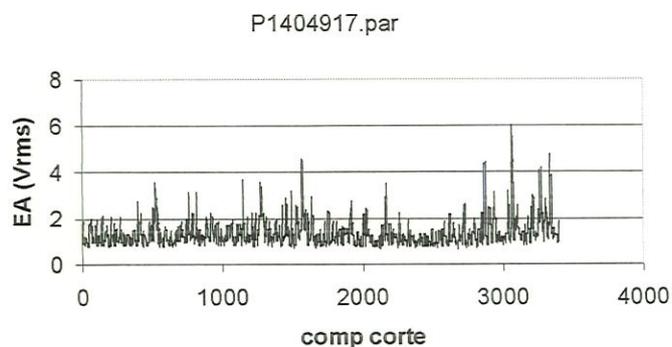
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 6 - ângulo 17°



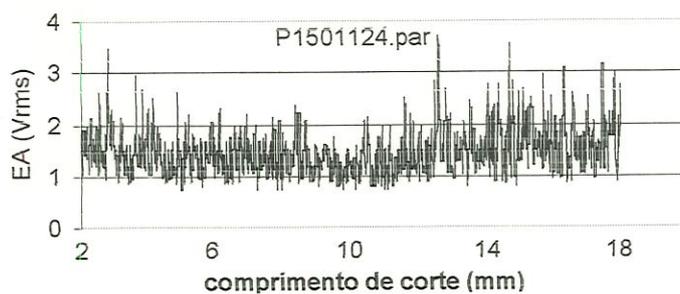
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 7 - ângulo 17°



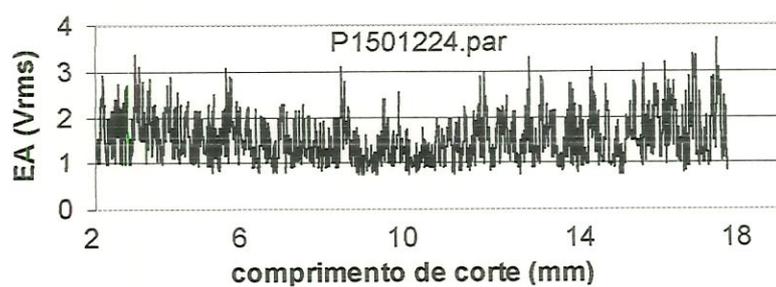
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 8 - ângulo 17°



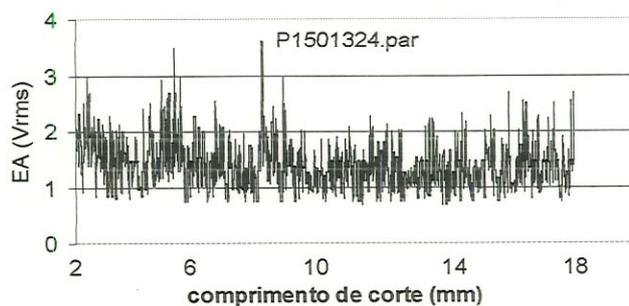
Identificação: corpo de prova nº 14 - h=0,4mm - canal 9 - ângulo 17°



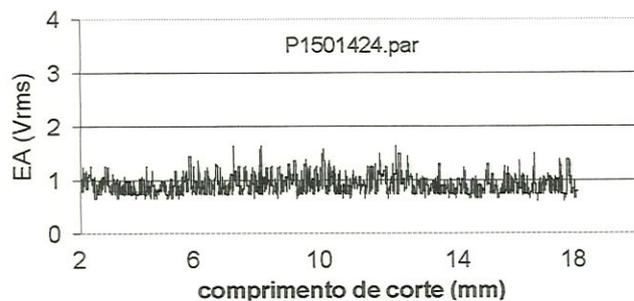
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 1 - ângulo 24°



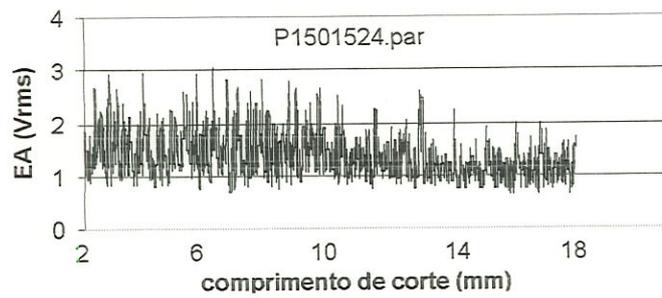
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 2 - ângulo 24°



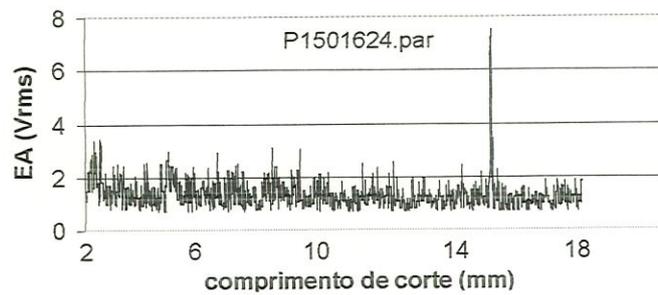
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 3 - ângulo 24°



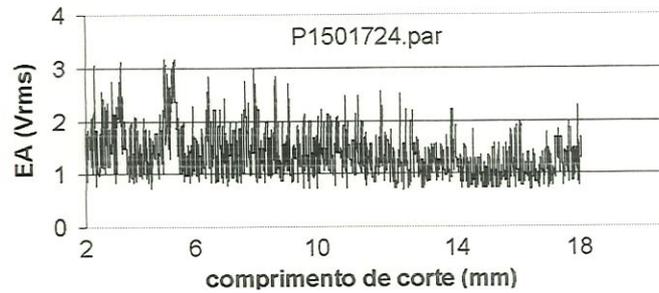
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 4 - ângulo 24°



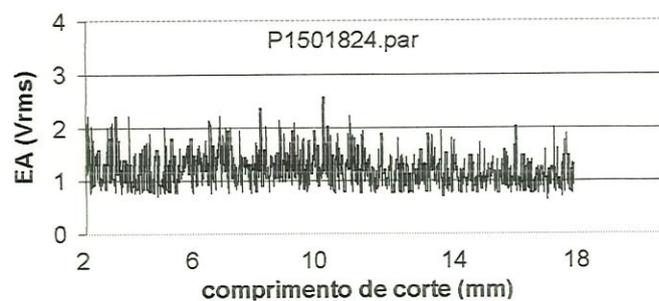
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 5 - ângulo 24°



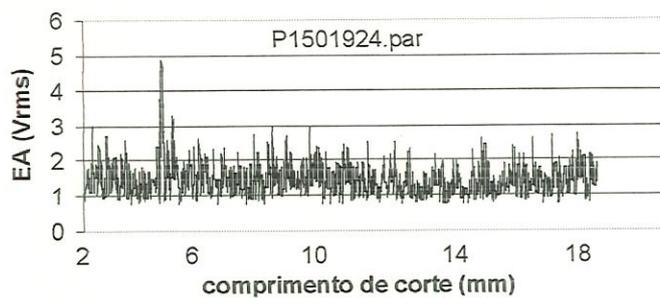
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 6 - ângulo 24°



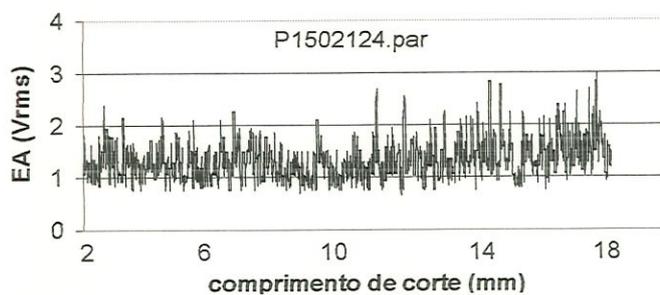
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 7 - ângulo 24°



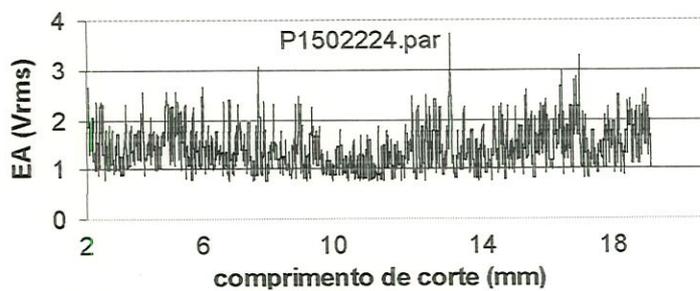
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 8 - ângulo 24°



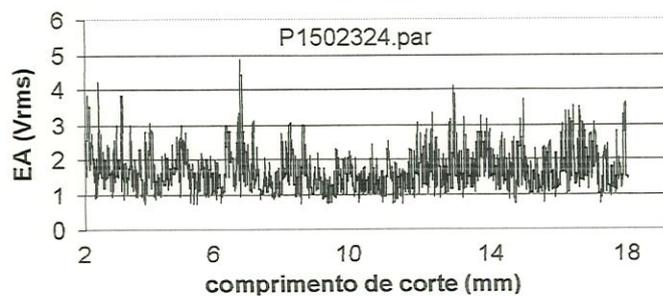
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,1mm - canal 9 - ângulo 24°



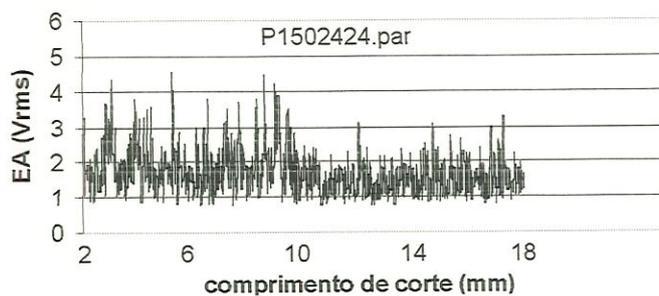
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 1 - ângulo 24°



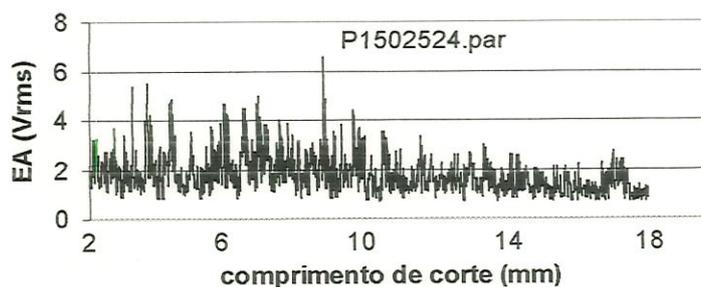
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 2 - ângulo 24°



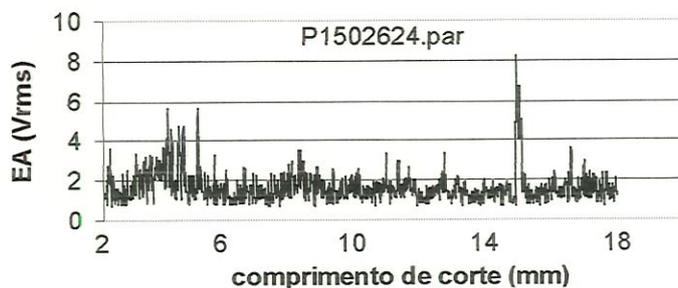
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 3 - ângulo 24°



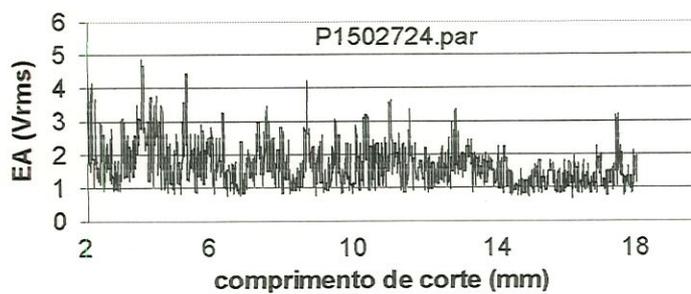
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 4 - ângulo 24°



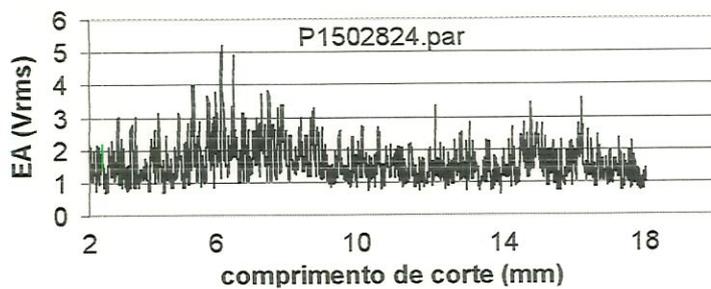
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 5 - ângulo 24°



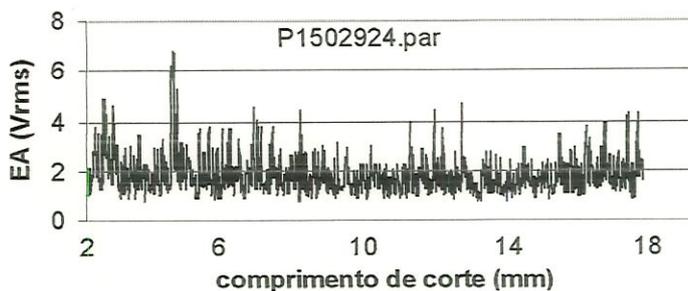
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 6 - ângulo 24°



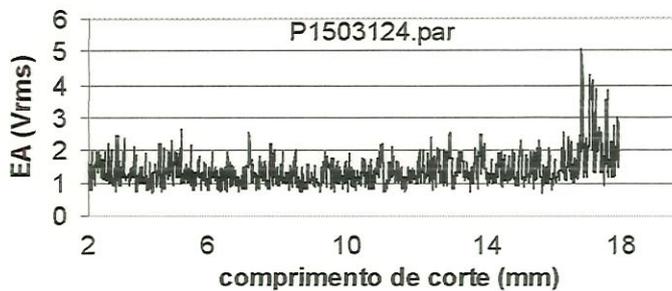
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 7 - ângulo 24°



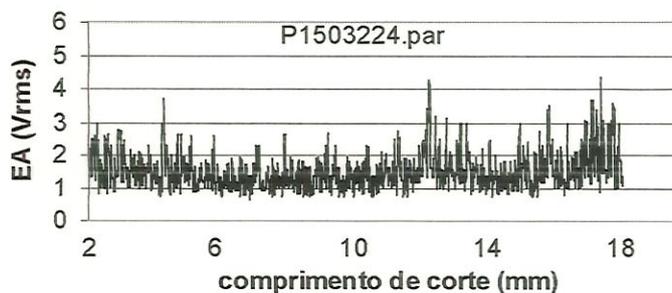
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 8 - ângulo 24°



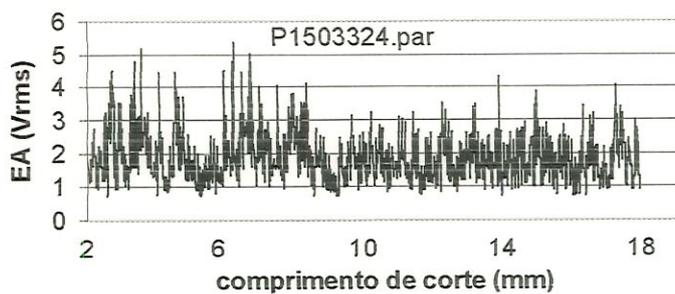
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,2mm - canal 8 - ângulo 24°



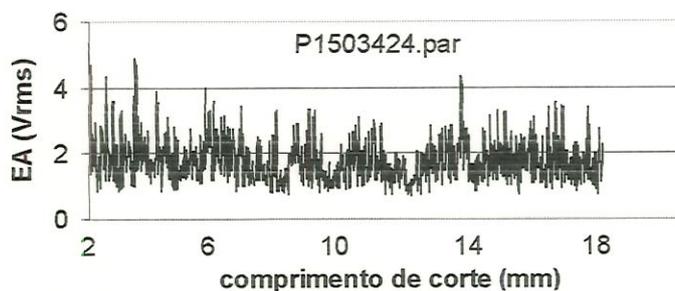
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 1 - ângulo 24°



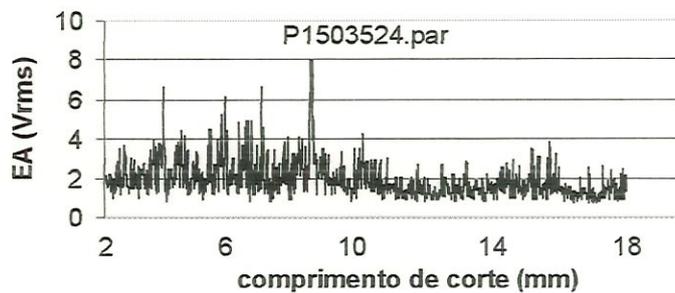
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 2 - ângulo 24°



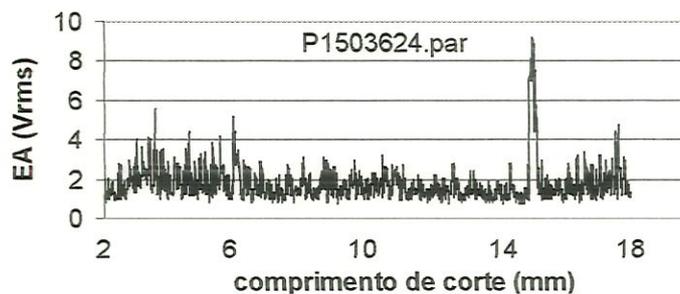
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 3 - ângulo 24°



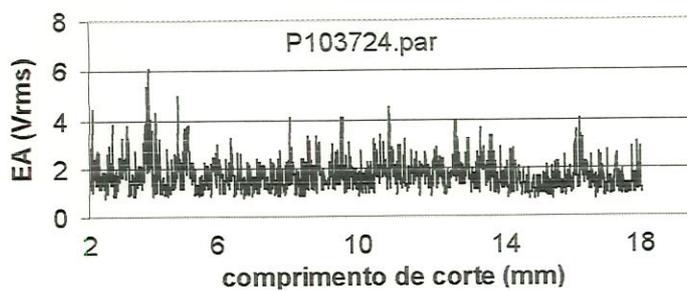
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 4 - ângulo 24°



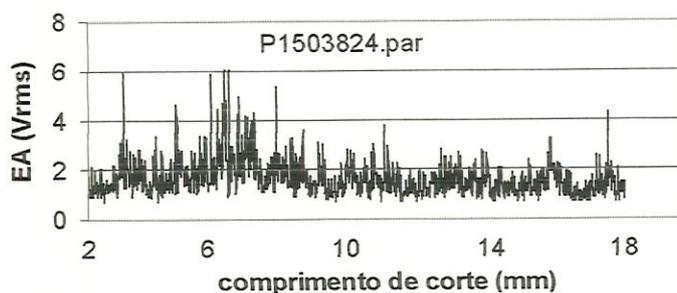
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 5 - ângulo 24°



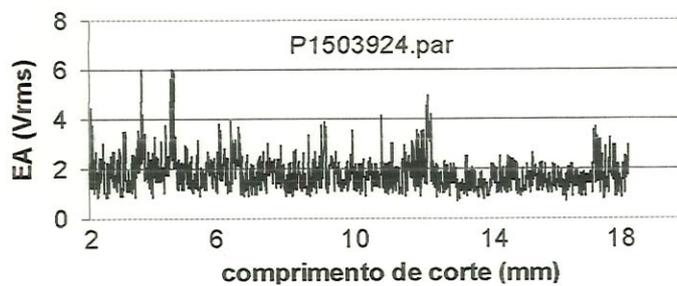
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 6 - ângulo 24°



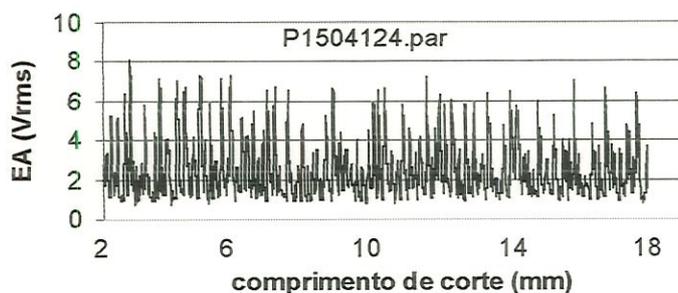
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 7 - ângulo 24°



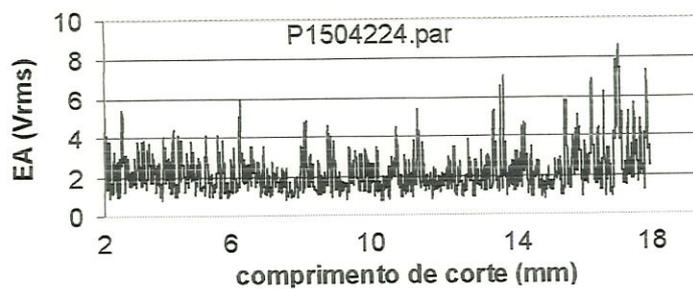
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 8 - ângulo 24°



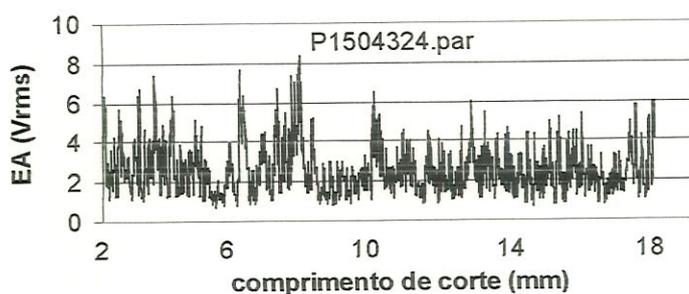
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,3mm - canal 9 - ângulo 24°



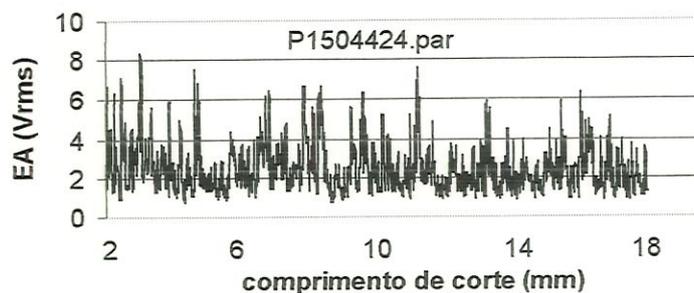
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 1 - ângulo 24°



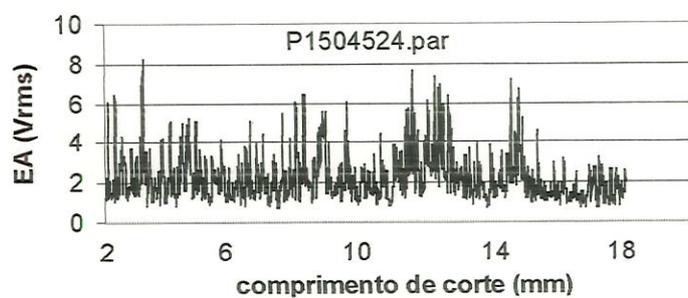
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 2 - ângulo 24°



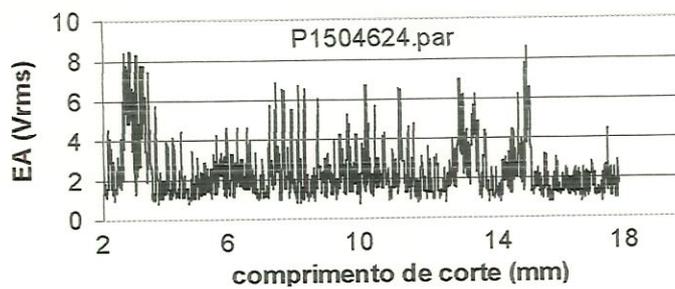
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 3 - ângulo 24°



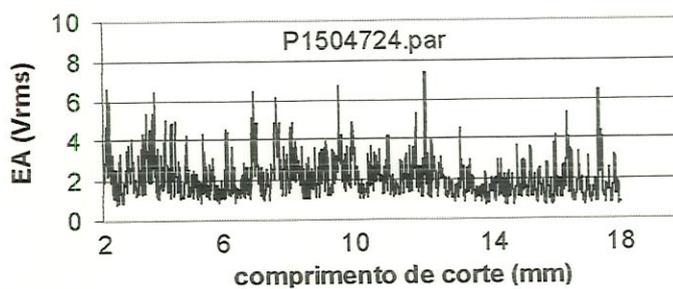
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 4 - ângulo 24°



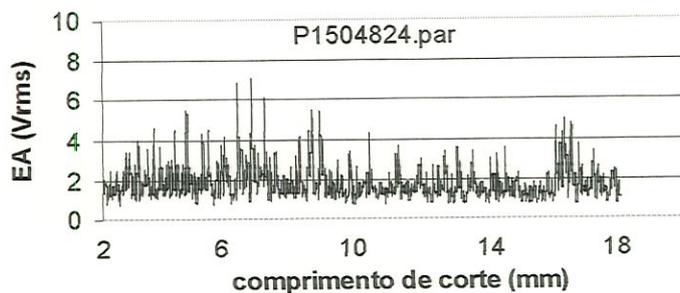
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 5 - ângulo 24°



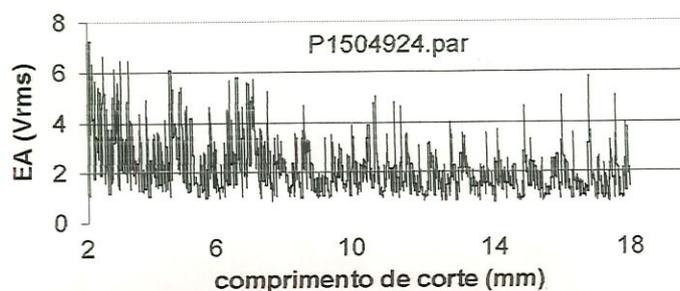
Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 6 - ângulo 24°



Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 7 - ângulo 24°



Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 8 - ângulo 24°



Identificação: corpo de prova nº 15 - h=0,4mm - canal 9 - ângulo 24°