

**WALDEMAR GEHRING JUNIOR**

**MONITORAMENTO DA DEFLEXÃO DE SERRAS DE FITA CONTÍNUA  
COMO PROPOSTA DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE  
DE PEÇAS SERRADAS DE MADEIRA**

**WALDEMAR GEHRING JUNIOR**

**MONITORAMENTO DA DEFLEXÃO DE SERRAS DE FITA CONTÍNUA  
COMO PROPOSTA DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE  
DE PEÇAS SERRADAS DE MADEIRA**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro  
Co-Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

Guaratinguetá  
2016

G311m Gehring Junior, Waldemar  
Monitoramento da deflexão de serras de fita contínua como proposta  
de avaliação da qualidade de peças serradas de madeira / Waldemar  
Gehring Junior – Guaratinguetá, 2016  
132 f. : il.  
Bibliografia: f. 122-129

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

1. Serrarias. 2. Vibração. 3. Sustentabilidade. I. Título

CDU 683.3(043)

*WALDEMAR GEHRING JUNIOR*

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO  
Orientador / UNESP/FEG

  
Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA  
UNESP/feg

  
Prof. Dr. JOSÉ ORLANDO GOMES  
NCE-UFRJ

  
Prof. Dr. CARLOS DE OLIVEIRA AFFONSO  
UNESP/Itapeva

Julho de 2016



## **DADOS CURRICULARES**

### **WALDEMAR GEHRING JUNIOR**

<b>NASCIMENTO</b>	02.07.1964 – ITAPEVA / SP
<b>FILIAÇÃO</b>	Waldemar Gehring Irma Santos de Mattos Gehring
<b>1979/1982</b>	Curso Profissionalizante Técnico em Mineração – ETE DR Demétrio Azevedo Júnior
<b>1984/1995</b>	Curso de Graduação em Engenharia Produção, Mecânica. na Escola de Engenharia de São Carlos da USP
<b>2009/2011</b>	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
<b>2012/2016</b>	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

À minha esposa Maria Inês Tassinari,  
fonte de inspiração e vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço pela vida, pela família e pelos recursos cognitivos vindo da Graça.

Agradeço aos meus filhos Lucas Tassinari Gehring e Frederico Tassinari Gehring pela presença da vida deles na minha.

Agradeço ao meu co-orientador Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves amigo incondicional.

Agradeço ao Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro pelo acolhimento e ao Prof. Dr. Carlos de Oliveira Affonso pelo incentivo.

Ao Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves sua motivação e compromisso com o ensinar.

Agradeço ao Prof. Dr. José Fernando de Jesus e ao Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza pelo apoio e cuidado.

Agradeço ao Prof. Dr. José Orlando Gomes pela sua valiosa contribuição.

Aos meus queridos pais Waldemar Gehring e Irma Santos Mattos Gehring todo o incentivo, apoio e segurança desde meus primeiros passos.

Agradeço ao Dr. Ulysses Tassinari e Sra. Marly Bertocco Tassinari amigos ímpares nesta jornada.

Aos meus irmãos Luiz Waldemar Mattos Gehring e Carlos Henrique Mattos Gehring, nossa amizade e convívio. Agradeço também aos meus cunhados, cunhadas, sobrinhos e sobrinhas pela nossa parceria.

Agradeço ao Eng. Luiz José S. Neto pelo apoio no presente trabalho.

Aos técnicos dos laboratórios da Unesp-Itapeva, sem distinção.

A todos os colegas de trabalho e da pós que me ensinaram a aprender no dia a dia.

Aos amigos de todas as horas, sejam estas quais forem.

E por fim, gostaria de agradecer ao programa de Pós-graduação da UNESP e ao Conselho de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá pela inclusão da linha de pesquisa Materiais Compósitos Lignocelulosicos, na Área de Materiais, no Campus de Itapeva da Unesp.

Muito obrigado.

*“Seja lá o que você pode fazer ou sonhar, ... comece.  
A ousadia sempre traz consigo genialidade, poder e  
mágica”*

Goethe, J.W.

GEHRING JUNIOR, W. **Monitoramento da deflexão de serras de fita contínua como proposta de avaliação da qualidade de peças serradas de madeira.** 2016. 132 f. Tese de Doutorado ( Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

## RESUMO

No serramento contínuo da madeira por serra de fita, o projeto da ferramenta de corte, o desgaste e as avarias do uso destas ferramentas no processo de produção fazem com que o comportamento da lâmina ao longo de um ciclo de uso seja mais ou menos instável, podendo perder estabilidade e impactando em produtos mal serrados. Conhecer essa tendência ao longo de toda a vida útil da serra ou mesmo a sua aplicação em dado período em condições reais de corte permite avaliar o projeto da serra e sua durabilidade. Para isso, o projeto de um dispositivo robusto, resistente a vibração e a ambientes severos e sujos, além de boa capacidade de armazenamento de informações é de grande valia. O objetivo do presente trabalho foi propor um dispositivo de registro de dados para monitorar a instabilidade/vibração da ferramenta de corte no processo de serramento da madeira por serra de fita. Com vistas a essas premissas foram estudados os elementos para o projeto da ferramenta de corte e as referências sobre os fundamentos da usinagem da madeira, o projeto da ferramenta de corte, sua geometria e causas para as decorrências como a vibração, estabilidade e desgaste. Foi construído um protótipo em escala laboratorial, onde foi validado o pré-projeto e o sistema de aquisição de dados. Optou-se pelo uso do microcontrolador Arduino que disponibiliza *software* livre para sua programação permitindo que o sistema possa ser reproduzido a baixo custo. Em um segundo estágio este mecanismo de controle foi expandido para um ambiente industrial madeireiro onde pôde ser utilizado como apoio para a avaliação do processo de corte. O dispositivo mostrou-se robusto e operacional em condições reais de produção em um serraria de grande porte. O presente trabalho relata o sensor usado, o microcontrolador, sua programação e afirma que por meio do monitoramento da deflexão da serra de fita é possível registrar as tendências da deflexão da ferramenta de corte em operações de serramento da madeira por serra de fita e indiretamente medir a qualidade da madeira serrada e a capacidade do processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Serrarias. Sustentabilidade. Vibração. Arduino. Sensores. Conversão.

GEHRING JUNIOR, W. **Monitoring the deflection of continuous bandsaw as an proposal for lumber quality evaluation.** 2016. 132 p. Doctoral Thesis (Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### **ABSTRACT**

In continuous sawing wood by a large Bandsaw the cutting tool design, use and tools faults in the production process causes blade behavior over a duty cycle. The process loses stability and impacts in badly sawn products. Knowing this trend throughout the life of the blade or its application in a given period on real conditions of cut allows evaluating the project and the durability of the saw. For this, the design of a robust device, resistant to vibration, harsh and dirty environments and good information storage capacity is a big deal. The aim of this study was to propose a data recording device to monitor the instability / vibration of the cutting tool in Bandsawing process of the wood. With a view to these assumptions were studied elements for cutting tool design and references about the fundamentals of wood machining, cutting tool design, geometry and the causes that origin vibration, instability and tools wear. A prototype in laboratory scale which has validated the pre-design and data acquisition system was built. We chose to use the Arduino microcontroller that provides free software to its programming allowing the system to be reproduced at low cost too. In a second stage this control mechanism has been expanded to a timber industrial environment where it might be used as support for the evaluation of the cutting process. The device proved to be robust and operational in real production conditions in a large sawmill. This paper reports the used sensor, microcontroller, its programming and states that by monitoring the bandsaw deflection is possible to record the trends of the cutting tool instability in sawing operations of wood by bandsaw and indirectly measure quality lumber and capability of the process.

**KEYWORDS:** Sawmill. Bandsaw. Precision. Vibration. Arduino. Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produtividade de árvores plantadas no Brasil e no mundo.....	24
Figura 2 - Ilustração dos três planos referenciais de um tronco de madeira .....	27
Figura 3 - Sistemas de corte aplicado à seção transversal da madeira .....	28
Figura 4 - Formação e ruptura do cavaco .....	29
Figura 5 - Forças atuantes : (a) esforços na ferramenta e (b) decomposição da resultante ....	33
Figura 6 - Serra de fita vertical .....	34
Figura 7 - Serra de fita dupla .....	35
Figura 8 - Serra de fita quádrupla .....	35
Figura 9 - Serra de fita horizontal de cabeçote móvel .....	36
Figura 10 - Serra de fita horizontal de cabeçote fixo .....	36
Figura 11 - Serra de fita inclinada .....	37
Figura 12 - Componentes de uma serra de fita .....	38
Figura 13 - Guia convencional utilizada nos experimentos de laboratório .....	41
Figura 14 - Guia de pressão utilizada nos experimentos na indústria.....	42
Figura 15 - Deslocamento da serra pela ação da força da guia de pressão .....	42
Figura 16 - Guia magnética ativa .....	43
Figura 17 - Equipamento para retífica da guia de pressão da serra .....	44
Figura 18 - Sistema 3D para medir toras .....	47
Figura 19 - Afiadora dos dentes da serra de fita .....	50
Figura 20 - Perfis de dentes utilizados em serras de fita .....	51
Figura 21 - Geometria de um dente de serra .....	52
Figura 22 - Terminologia usada para os dentes da serra de fita .....	53
Figura 23 - Folga lateral em um dente de serra de fita comum .....	55
Figura 24 - Equipamento para retificação do ângulo de folga tangencial e axial .....	55
Figura 25 - Cálculo do volume da garganta de um dente de serra .....	57
Figura 26 - Influência da temperatura na dureza dos materiais .....	66
Figura 27 - Arduino Uno .....	82
Figura 28 - Modelagem dinâmica e controle de manipuladores para deflexão elástica da serra de fitas em relação ao plano de corte no processo de serragem .....	84
Figura 29 - Sensor Indutivo - dimensões básicas [mm] .....	85
Figura 30 - Conjunto da guia de pressão completo e o suporte para o sensor adaptado.....	86
Figura 31 - Sensor indutivo montado no suporte da guia de pressão .....	86

Figura 32 - Equipamento Serra de Fita Geminada do ambiente industrial .....	89
Figura 33 - Serra de fita vertical geminada, guia de pressão e sensor montados .....	91
Figura 34 - Afiadora de lâminas de serra de fita .....	92
Figura 35 - Dispositivo para medição da altura e simetria do dente .....	93
Figura 36 - Manômetro do macaco hidráulico de estiramento da serra .....	94
Figura 37 - Serramento da tora de <i>Pinus spp</i> no ambiente industrial .....	95
Figura 38 - Serra de fita do laboratório de processamento da madeira da Unesp-Itapeva.....	97
Figura 39 - Detalhe da guia convencional com o suporte desenvolvido .....	98
Figura 40 - Volante superior da serra de fita do laboratório de processamento da madeira da Unesp .....	99
Figura 41 - Serra de fita vertical do laboratório de processamento de madeira da Unesp-Itapeva .....	100
Figura 42 - Pesos do sistema de braços de tensionamento da serra .....	100
Figura 43 - Sistema de alimentação e posicionamento do sensor .....	101
Figura 44 - Suporte para colocação do sensor na guia do equipamento .....	102
Figura 45 - Pontaletes de <i>Pinus spp</i> utilizados para ensaios em laboratório .....	102
Figura 46 - Tábuas obtidas no ensaio em laboratório .....	105
Figura 47 - Plaina moldureira S4S para aplainamento da madeira .....	105
Figura 48 - Madeira aplainada para ensaios de serramento .....	106
Figura 49 - Cabeçote de usinagem: acabamento superficial ( $f_z$ ) em função do número de facas ( $z$ ), rotação da ferramenta ( $n$ ) e velocidade de alimentação ( $v_f$ ) .....	107
Figura 50 - Qualidade da superfície em função da distância visível entre marcas das facas..	107
Figura 51 - Sequência de medidas da espessura das tábuas serradas no ensaio 6 .....	108
Figura 52 - Detalhe do conjunto guia e sensor após 8 horas de uso contínuo .....	109
Figura 53 - Amplitude da deflexão da serra fita ensaio 1A: máquina G3 – 1º turno .....	110
Figura 54 - Amplitude da deflexão da serra fita ensaio 1B: máquina G3 – 2º turno .....	111
Figura 55 - Amplitude da deflexão da serra fita ensaio 2A: máquina G1 – 1º turno .....	112
Figura 56 - Amplitude da deflexão da serra fita ensaio 2B: máquina G1 – 2º turno .....	113
Figura 57 - Amplitudes da deflexão da serra nas primeiras 2 horas do ensaio 2A .....	114
Figura 58 - Ensaio 3 no laboratório de Usinagem da Unesp - Itapeva .....	115
Figura 59 - Deflexão captada da serra de fita ao longo de 28 minutos de ensaios .....	115
Figura 60 - Amplitude da oscilação com variação de tensão de estiramento .....	117
Figura 61 - Deflexão da serra durante o serramento de 6 peças de madeira aplainada .....	117
Figura 62 - Detalhe compreendido entre os tempos 280s e 420s da Figura 61 .....	118



Figura 63 - 6 tábuas aplainadas serradas dispostas aleatoriamente .....	118
Figura 64 - Representação gráfica dos valores reais das espessuras medidos nas 6 tábuas ..	119
Figura 65 - Sobreposição dos perfis encontrados com ajuste matemático das curvas .....	120

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Consumo de madeira em volume [m <sup>3</sup> ] e setor produtivo no Brasil .....	24
Quadro 2 - Área plantada [ha] Gênero <i>Pinus</i> por classe de idade – ano base 2015 .....	25
Quadro 3 - Velocidade de corte recomendada em função da abrasividade da espécie .....	31
Quadro 4 - Relação entre diâmetro do volante e potência do motor .....	40
Quadro 5 - Correlações entre nome e perfis de dentes utilizados .....	52
Quadro 6 - Ângulos nas serras de fitas no corte da madeira .....	53
Quadro 7 - Relações entre diâmetro do volante e espessura da lâmina .....	54
Quadro 8 - Metal duro, sua aplicação e desempenho .....	64
Quadro 9 - Constituição química e metalográfica do metal duro .....	64
Quadro 10 - Composição do <i>Stellite</i> de grau 1 e 12 .....	67
Quadro 11 - Especificações técnicas do sensor indutivo .....	87
Quadro 12 - Parâmetros fixos do equipamento utilizado para o desdobro .....	95
Quadro 13 - Parâmetros variáveis do projeto de ferramenta e da condição de corte .....	96
Quadro 14 - Testes executados em laboratório : duração e objetivos .....	98
Quadro 15 - Parâmetros fixos da Serra de Fita Vertical da UNESP .....	103
Quadro 16 - Parâmetros variáveis do projeto de ferramenta e da condição de corte .....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos testes realizados e dados obtidos .....	88
Tabela 2 - Dados referentes a produção para o experimento realizado na indústria .....	90
Tabela 3 - Testes realizados em laboratório .....	114
Tabela 4 - Cálculo da amplitude nos trechos de 4 e 10 min .....	116
Tabela 5 - Média das medidas reais das seis tábuas serradas .....	119
Tabela 6 - Custo do sistema de captação de dados .....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria da Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACR	Associação Catarinense de Reflorestadores
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
BCIT	<i>British Columbia Institute of Technology</i>
CLP	Comando Lógico Programável
CNPJ	Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas
DAP	Diâmetro na altura do peito
EWD	<i>Esterer WD GmbH &amp; Co.</i>
Fe-C	Liga de ferro com carbono (aço)
FSC	<i>Forestry Stewardship Council</i>
GS	<i>Grain Size</i> ou tamanho do grão micrográfico do metal [ $\mu\text{m}$ ]
GFI	Índice de ocupação da garganta do dente
HV	<i>Hardness Vickers</i> ou número de dureza na escala Vickers
HS	Aços semi rápidos
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEA	Instituto de Economia Agrícola
IOG	Índice de ocupação da garganta do dente
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normas e Qualidade Industrial
KB	Kilo <i>bytes</i> .
<i>Kerf</i>	Espessura de corte
MD	Metal duro
<i>off set</i>	Deslocamento da linha relativo ao plano dos volantes
op.	Operadores
SAWTEC	Encontro Internacional da Tecnologia do Processamento da Madeira – Curitiba
S4S	Sistema de aplainamento da madeira nas 4 faces simultaneamente.
WC	Carbeto de Tungstênio

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v_c$	Velocidade de corte	[m/s]
$D_v$	Diâmetro do volante	[m]
$n_v$	Número de revoluções por minuto do volante motor [rpm]	
$n_m$	Número de revoluções por minuto do motor elétrico [rpm]	
$D_{mt}$	Diâmetro da polia motora	[mm]
$D_{mv}$	Diâmetro da polia movida	[mm]
$v_{fmáx}$	Velocidade de avanço máxima	[m/min]
GFI	Índice Alimentar da Garganta	[%]
$v_c$	Velocidade de corte	[m/min]
$S$	Área da garganta	[mm <sup>2</sup> ]
$p$	Passo dos dentes	[mm]
$a_p$	Profundidade de corte	[mm]
$F_N$	Força normal	[N]
$F_f$	Força paralela	[N]
$F_a$	Força axial	[N]
$T$	Trabalho necessário para o corte	[Nm]
$F_c$	Força de corte	[N]
$H$	Altura ou espessura de corte	[m]
st	Volume de madeira empilhada ou metro cúbico estéreo	
mst	Metro estéreo	
2d	Sistema de medição que projeta os valores a um plano	
$S_d$	Área da garganta do dente da serra de fita [mm <sup>2</sup> ]	
$h$	Altura do dente	[mm]
$t$	Alimentação por dente da serra	[mm]
$v_f$	Velocidade de avanço	[m/min]
hp	<i>Horse Power</i>	[1 hp = 645,7 W]
$f_z$	Marcas visíveis das facas	[mm]
$z$	Número de facas	
$\varphi$	ângulo de corte	[grau]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1	Objetivos da pesquisa .....	22
<b>2</b>	<b>PROCESSO DE SERRAMENTO</b> .....	<b>23</b>
2.1	Setor Florestal no Brasil .....	23
2.2	Conceituação e tecnologia do processo .....	26
<b>2.2.1</b>	<b>Fundamentos da usinagem</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Classes e tipos de máquinas de serramento.</b> .....	<b>34</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Dinâmica do processo de serramento</b> .....	<b>38</b>
2.3	Desempenho da indústria madeireira .....	45
2.4	Ferramentas de corte .....	49
<b>2.4.1</b>	<b>O projeto da ferramenta</b> .....	<b>49</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Materiais para ferramentas de corte</b> .....	<b>59</b>
2.5	Estabilidade do corte por serra de fita .....	68
<b>2.5.1</b>	<b>Desgaste da aresta de corte</b> .....	<b>69</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Aspectos da vibração da ferramenta de corte</b> .....	<b>75</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Ondulação do corte e corrugações na madeira</b> .....	<b>76</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Modelagens e controle de operações de serramento</b> .....	<b>77</b>
2.6	Arduino.....	82
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>84</b>
3.1	Instrumentação .....	84
<b>3.1.2</b>	<b>Procedimento de ensaio</b> .....	<b>88</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>109</b>
4.1	Análise dos resultados obtidos .....	109
4.2	Custo do sistema.....	121
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>122</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>131</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cenário econômico mundial levando em conta a escassez de recursos materiais, o alto custo da energia elétrica, das matérias primas e dos materiais de consumo; o crescente custo da mão de obra, entre outras despesas, além dos custos de produção faz com que empresas busquem cada vez mais uma maior eficácia para que possam sobreviver e manter seu lugar no mercado.

O Anuário Estatístico de Base Florestal para o Estado de Santa Catarina (2016 – ano base 2015) registra que embora a exportação mundial de madeira serrada de coníferas tenha apresentado uma queda de 2,6% entre 2006-2015, a partir de 2014 a exportação brasileira destes serrados aumentou em 31,4% em volume e 25,0% em valor. Esta diferença de valores evidencia a redução do valor unitário da exportação corroborado pela queda nos preços internacionais dos produtos florestais, entre eles os serrados de pinus.

O mercado global valoriza qualidade e prazos, assim, as empresas que se destacam nesse cenário são aquelas que conseguem uma melhor produtividade nos diversos aspectos do processo dentro de uma base sustentável das suas boas práticas de gestão.

A Associação Brasileira da Indústria de Madeira Plantada Mecanicamente (ABIMCI) constata que a indústria de madeira processada mecanicamente no Brasil é composta por cerca de 24,3 mil empresas atuantes até o final de 2012. A maior participação é de empresas que produzem artefatos diversos de madeira (exceto móveis), com 41%, bem como de serrarias, as quais realizam o desdobro da madeira (tora) em serrado, com 20% do total de empresas atuantes até 2012.

Na indústria madeireira o ponto chave do sucesso está no início do processo. O primeiro desdobro de toras é onde o ganho de produtividade se estabelece, gerando impactos em toda a cadeia produtiva. Madeira bem serrada tem pouca sobremedida, seca bem, não empena e não precisa ser aplainada em excesso para se obter um produto final de qualidade.

Um procedimento comum em operações de processamento da madeira é serrar com serra de fita larga, especialmente toras, o que traz impacto com claras vantagens na produtividade. Seja por baixa geração de resíduos, ou pela possibilidade de se trabalhar com peças de grandes dimensões, alta velocidade de corte e corte mais fino. Assim, diversos fatores devem ser levados em conta para se buscar a melhor eficiência no processo de usinagem para desdobro de toras de madeiras.

Para a melhor produtividade das serrarias existem fatores que impactam diretamente o resultado econômico do processo, tais como: o aumento da velocidade de alimentação das

toras, o aumento do rendimento e a diminuição de horas paradas, fatores estes relativos ao conjunto de equipamentos que formam o sistema de corte. Aliado aos fatores operacionais, o bom projeto da ferramenta de corte, com corretos ângulos de corte, geometria da garganta dos dentes e velocidades de corte serão responsáveis pelo desempenho e resultados do sistema produtivo.

No processo de usinagem da madeira, o atrito entre a ferramenta de corte e a madeira gera calor provocando perda e desgaste da aresta de corte. A escolha de um melhor material para a aplicação na aresta de corte é uma premissa importante, pois o trabalho efetivo de uma ferramenta com menos horas paradas para troca e afiação, impacta diretamente em maior produção e, conseqüentemente em maior produtividade.

O rendimento de uma serraria é a relação entre o volume de toras serradas em um período e o volume de madeira serrada obtido deste material. Os processos tecnológicos possíveis para a otimização são conhecidos, tais como digitalização de imagens e sistemas integrados de otimização e posicionamento do plano de corte, porém estes além de caros ainda necessitam de um conjunto de equipamentos adicionais para que funcionem perfeitamente, como descascadores e *software* para otimização integrados ao carro porta-toras e posicionamento da serra fita. Equipamentos estes muito longe da realidade nacional e acessível a poucos, devido ao custo e necessidade de mão de obra especializada tanto na manutenção quanto na operação destes.

As inter-relações que afetam diretamente a eficiência do corte podem ser divididas em parâmetros quantificáveis fixos e variáveis. Os parâmetros fixos do serramento por serra de fita são o diâmetro do volante do equipamento a ser utilizado e a altura de corte ou o diâmetro da tora. Os parâmetros variáveis podem ser descritos como a espessura da serra, a folga lateral, a velocidade de corte, o passo, a velocidade de alimentação da tora e a área da garganta dos dentes da ferramenta.

A partir desses parâmetros fixos e variáveis têm-se resultados quantificáveis para o processo como: a espessura de corte, a velocidade de corte do dente, a alimentação por dente e o índice de ocupação da garganta deste. Como conseqüência desses fatores o rendimento, a acuracidade do corte, o acabamento superficial, o desgaste do dente, a produtividade e a potência necessária serão os resultados provenientes da correta (ou da má) escolha destes.

No processo de serramento da madeira, o desvio causado por ferramentas mal projetadas ou com deficiências em sua manutenção, faz com que as tolerâncias geométricas e as sobre-medidas para acerto de especificações e erros de corte, gerem impactos negativos nos números de conversão e conseqüentemente nos resultados, de produção e na produtividade.



No desdobro de madeiras com muita tensão de crescimento, a influência da ferramenta é menos impactante do que a escolha do padrão de corte, porém uma ferramenta adequada poderá garantir maior tempo efetivo de corte e conseqüentemente, dar ao serrador melhor condição para posicionar o plano de corte com precisão e eleger o que menos irá impactar em tensões de crescimento e no respectivo tensionamento da madeira serrada.

A espécie de madeira serrada e seus constituintes internos farão com que muitas vezes aconteça um desgaste prematuro da aresta de corte, gerando perda da capacidade de corte da ferramenta e conseqüente necessidade de troca. Desse modo, a escolha de um material que resulte em melhores resultados no desempenho da indústria madeireira é um fator importante e decisivo.

Como se pode observar, o serramento da madeira em função de tantas variáveis de processo e em relação à própria matéria prima é de extrema complexidade. Nesse contexto, o desenvolvimento de uma solução tecnológica que permita que, de forma indireta, seja monitorado dinamicamente a qualidade e estabilidade do processo, além de ser aplicável a realidade de pequenas e médias empresas, pode ser uma solução de grande valia e necessidade.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo do presente trabalho foi propor um sistema de simples concepção, utilizando de ferramentas de *hardware* e *software* de fonte abertas, que possa medir e registrar a deflexão da serra periodicamente e que este sistema permita ao operador conhecer o resultado da qualidade dimensional da peça serrada e da estabilidade da serra.

Outro objetivo relacionado ao sistema proposto é que este possibilite que nas intervenções no projeto da ferramenta de corte e do desenho desta, sejam gerados dados que permitam a comparação entre um projeto de ferramenta e outro, permitindo assim ao técnico afirmar qual é o melhor projeto, o qual contribui com maior estabilidade dimensional na serra, e conseqüentemente nos produtos serrados de madeira.

Para isso, buscou-se referencias que correlacionem precisão do corte no serramento da madeira por serras de fita e a interação entre esta precisão e a origem dessa perda ou instabilidade.

Dentro de tais premissas, duas perguntas podem resumir e orientar como um azimute à presente pesquisa:

Existe como conhecer e registrar a variação dimensional de uma peça de madeira serrada obtida pelo serramento contínuo por serra de fita sem medir fisicamente o produto resultante ?

É possível que isso seja feito por meio do monitoramento da deflexão da serra de fita durante o processo produtivo ?

## 2 PROCESSO DE SERRAMENTO

### 2.1 SETOR FLORESTAL NO BRASIL

O setor florestal Brasileiro, em especial o que tem por base as florestas plantadas, é um importante setor da economia do Brasil. Esse setor fornece madeira em toras para a cadeia produtiva de base florestal a qual representa os principais elos entre indústria, floresta e mercado.

As árvores plantadas são vistas, cada vez mais, como fonte importante de pesquisa para temas ligados ao futuro da humanidade.

O uso múltiplo dos plantios de árvores nos próximos anos levará o setor a uma nova realidade, na qual a base florestal será fundamental para atender demandas relacionadas ao crescimento populacional mundial (IBÁ, 2014).

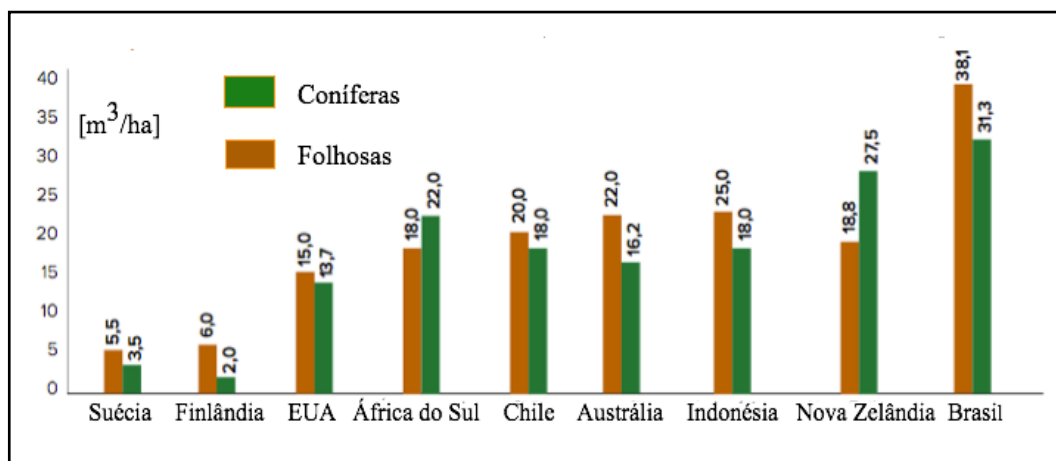
Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI-2013) a cobertura florestal brasileira é da ordem de 519,3 milhões de hectares, dos quais, 98,6% (512,1 milhões de hectares) são representados por florestas nativas, as quais estão predominantemente localizadas na Região Amazônica (florestas tropicais).

O crescimento na produção brasileira de madeira em tora de florestas plantadas entre 2006 e 2015 atingiu 48,2%. Do total de madeira em toras oriunda da silvicultura em 2014, 79% é de *Eucalyptus*, 18% é de *Pinus spp.* e 3% é de outras espécies (ACR, 2016).

A área de árvores plantadas no mundo é de 264 milhões de hectares e representa 7% de todas as florestas globais e 22% das florestas destinadas à exploração comercial. No Brasil, existem 7,6 milhões de hectares de árvores plantadas para fins industriais. Embora o Brasil detenha apenas 0,03% da área de florestas plantadas no mundo contribui com 17% da quantidade de madeira colhida em decorrência da baixa produtividade mundial (IBÁ, 2014).

Na Figura 1 é possível observar a diferença na produtividade de florestas plantadas com árvores coníferas e folhosas no Brasil e no mundo. Alguns dos fatores apontados pela observada maior produtividade das florestas no Brasil está relacionado aos fatores de umidade e regime de chuvas, solos e o desenvolvimento de espécies bem adaptadas a essas condições (IBÁ, 2014).

Figura 1 - Produtividade de árvores plantadas no Brasil e no mundo



Fonte: adaptado de (IBÁ, 2014).

No Quadro 1 pode ser observado o consumo [m³] da madeira *in natura* por setor da economia. Observa-se que as indústrias de serrarias e outros produtos sólidos consomem aproximadamente 22,5 milhões de m³ e deste total a madeira de *Pinus spp.* é responsável por 67% desse consumo.

Quadro 1 - Consumo de madeira em volume [m³] e setor produtivo no Brasil

Segmento	<i>Eucalyptus spp.</i>	<i>Pinus spp.</i>	outras	total
Celulose e papel	56.628.357	8.067.258	498.085	65.193.700
Painéis reconstituídos	6.428.162	13.457.258	278.612	20.164.032
Serrados e outros produtos sólidos	6.870.498	15.295.499	357.052	22.523.049
Carvão	23.533.724			23.533.724
Lenha industrial	41.832.528	3.929.361	4.262.239	50.024.128
Madeira Tratada	1.824.012			1.824.012
Cavacos de madeira e outros	11.129.621		781.200	11.910.821
Total	148.246.902	40.749.376	6.177.188	195.173.466

Fonte : adaptado de (IBÁ, 2014)

ABIMCI (2013) afirma haver 4.852 serrarias com desdobro de toras no Brasil com CNPJ cadastrados, as quais podem não estar em sua totalidade ativas. IBÁ (2014) cita haver no Brasil em 2013 um total de 1600 serrarias ativas que processam madeira plantada, sendo que 92% dessas serrarias estão localizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, cita ainda a mesma fonte, que a demanda global por madeira serrada cresceu 18% em 2013.

A maioria dessas serrarias está localizada nos estados de Santa Catarina, Paraná e São Paulo. Nesses estados o consumo de toras por serrarias é feito dentro de uma classe de diâmetros acima de 16 cm, cuja idade se encontra entre 13 a 16 anos. Toras abaixo de 16 cm

não são usadas por serrarias, pois não se dispõe no Brasil de tecnologia de processamento de toras que permitam que indústrias madeireiras obtenham produção mínima satisfatória dentro de pequenos das classes de baixo diâmetro. Os maiores importadores da madeira serrada de coníferas do Brasil são os EUA (47,9%) e a Ásia (44,5%).

Wanzuíta (2016) apresenta uma projeção de volumes de toras por estado e por classe diamétrica. Suas informações se referem as regiões onde concentra a maior quantidade de plantios de *Pinus spp* do Brasil. É possível observar no Quadro 2 que a tendência de idade média de floresta a ser processada em serrarias está a partir da classe dos 13 a 16 anos devido a presença de indivíduos de maior diâmetro passíveis de serem processadas como toras.

Quadro 2 - Área plantada [ha] Gênero *Pinus* por classe de idade – ano base 2015

Estado	Classes de Idade [anos] / Área [ha]						Total	
	1 a 4	5 a 8	9 a 12	13 a 16	17 a 20	> 20	[ha]	%
Santa Catarina	69.888	66.121	101.165	131.763	112.659	71.379	552.975	41%
Paraná	93.216	160.777	168.635	106.939	47.961	59.873	637.401	47%
São Paulo	26.692	57.684	28.855	15.548	8.877	21.227	158.883	12%
Total	189.796	284.582	298.655	254.250	169.496	152.480	1.349.258	
	14%	21%	22%	19%	13%	11%		100 %

Fonte: adaptado de (WANZUÍTA, 2016)

Observa-se que o estado do Paraná detém quase 47% das áreas reflorestadas com *Pinus spp*, o estado de Santa Catarina 41% e o estado de São Paulo com 12 % do total de áreas plantadas do gênero *Pinus*.

Referente ao mercado interno, o INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA-2015) cita que o setor de florestas entrou no segundo semestre de 2015 com as cotações bastante inferiores as praticadas no ano anterior, refletindo setorialmente o quadro de desaquecimento em que se encontra a economia brasileira.

## 2.2 CONCEITUAÇÃO E TECNOLOGIA DO PROCESSO

### 2.2.1 Fundamentos da Usinagem

#### O Processo de Usinagem

Ferraresi (1982) classifica o processo mecânico de usinagem em grupos distintos. Exemplos desses grupos são serramento, fresamento, torneamento, aplainamento, furação, lixamento, retificação entre outros. O autor descreve as grandezas de corte e de avanço, suas definições e simbologias para estes processos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) padronizou por meio da norma NBR ISO 3002-1<sup>1</sup> de 07/01/2013 os movimentos no processo de usinagem, quais sejam movimentos relativos entre a aresta de corte e a peça, definindo como movimentos de corte, de avanço e efetivo. Destes resulta o processo de usinagem e da remoção contínua ou repetida de cavaco<sup>2</sup>. Outros movimentos auxiliares ao processo são citados como de ajuste, de correção, de aproximação e de recuo.

Serramento é um processo mecânico de usinagem destinado ao seccionamento ou recorte com o auxílio de ferramentas multicortantes de pequena espessura. Para tal a ferramenta gira ou se desloca, ou executa ambos os movimentos e a peça se desloca ou se mantém parada. O serramento pode ser retilíneo (serra de fita) ou circular (serras circulares), segundo Ferraresi (1982).

De acordo com Gonçalves (2000), o processo de usinagem de serramento por serra de fita contínua classifica-se como corte ortogonal perpendicular às fibras. Dalois (1990), define a operação de serrar como fatiar a tora em várias partes por meio de remoção de cavacos na forma de serragem. O corte é o sulco formado na madeira pela passagem das arestas cortantes dos dentes da serra. A operação de corte no serramento por serra de fita é caracterizada por três dimensões: a espessura, altura e comprimento.

---

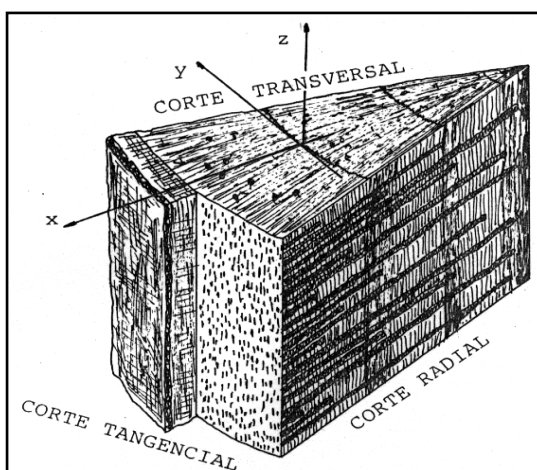
<sup>1</sup> A norma ABNT NBR ISO 3002-1:2013 substituiu em 07/01/2013 a Norma NBR 6163 de 30/05/1990.

<sup>2</sup> Cavaco – Porção de material da peça retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma irregular (FERRARESI, 1982).

Gonçalves (2000) cita que a madeira é um material tridimensional e sua anatomia pode ser descrita por três seções ou superfícies de corte, conforme a Figura 2.

- Seção Transversal: plano de corte normal ao eixo do tronco;
- Seção Tangencial: plano de corte da madeira no sentido de crescimento axial, perpendicular ao raio do tronco e, ainda, tangencial às camadas ou anéis de crescimento;
- Seção Radial: plano de corte da madeira no sentido de crescimento axial passando pelo eixo.

Figura 2 - Ilustração dos três planos referenciais de um tronco de madeira

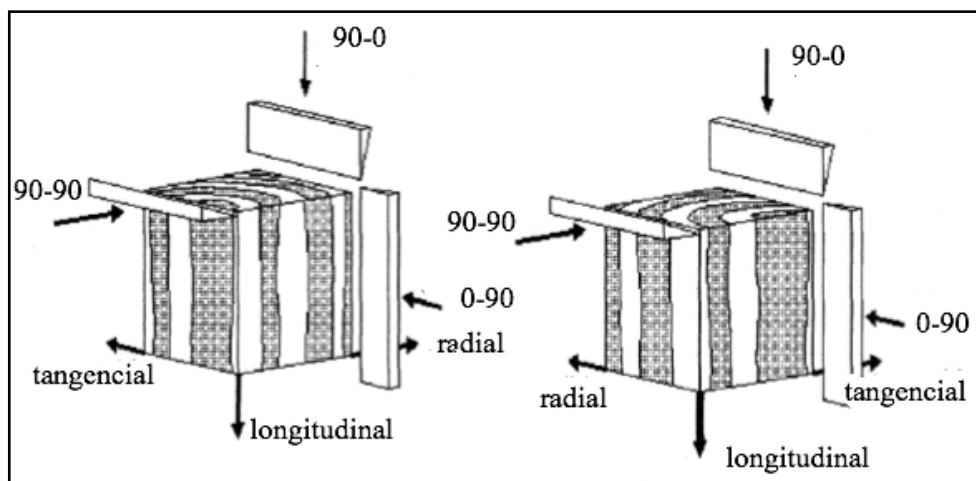


Fonte: (GONÇALVES, 2000).

McKenzie (1961), Koch (1964) e Gonçalves (2000) descrevem que os diferentes sistemas de corte da madeira são definidos por uma notação sugerida por onde o primeiro número da notação representa o ângulo da aresta de corte em relação à direção das fibras e, o segundo número fornece o ângulo da direção do movimento em relação à direção das fibras, como descrito a seguir e também exemplificado na Figura 3.

- Corte 90-0 : A aresta de corte faz um ângulo de 90° com a direção das fibras e a direção de movimento a 0° com a direção das fibras;
- Corte 0-90 : A aresta de corte está paralela à direção das fibras e a direção do movimento é perpendicular às fibras;
- Corte 90-90 : Tanto a aresta de corte como a direção do movimento, são perpendiculares à direção das fibras. Este sistema de corte aplica-se nas operações do processo de serramento de desdobro.

Figura 3 - Sistemas de corte aplicado à seção transversal da madeira



Fonte: (GONÇALVES, 2000).

#### Mecanismo de formação do cavaco

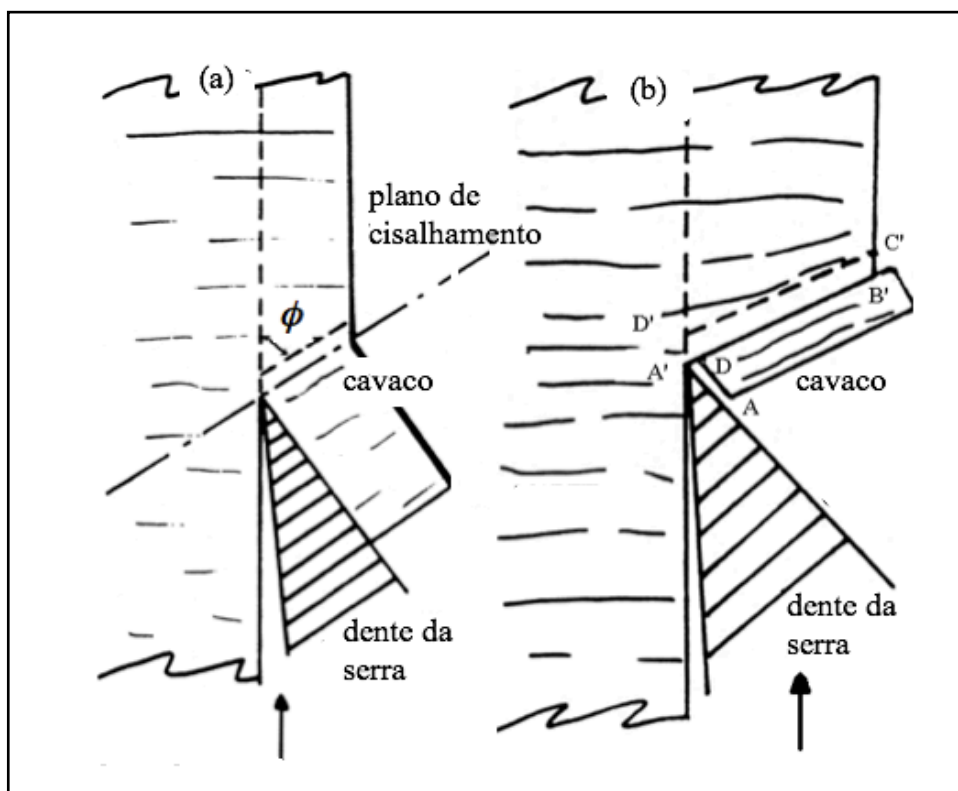
O processo de usinagem de serramento por serra de fita contínua classifica-se como corte ortogonal perpendicular às fibras no corte 90-90. De acordo com Sales (1990) o processo de formação de cavaco no serramento por serra de fita, pode ser decomposto em duas fases, conforme representado na Figura 4.

Na primeira fase, o dente comprime e curva as fibras da madeira. As tensões que se desenvolvem em ambos os lados do plano de corte, durante a penetração do dente, ocasionam a ruptura das fibras. O fenômeno de compressão e flexão é tanto mais acentuado, quanto menor a resistência mecânica da madeira à compressão transversal (madeiras macias). Na segunda fase, as fibras cortadas escoam em ambos os lados dos dentes ou sobre a superfície de saída da ferramenta, sob a forma de partículas finas, chamadas de serragem.

A região do cavaco próxima à aresta de corte apresenta uma zona de grandes deformações. Esquemáticamente, pode-se representar este fenômeno por uma deformação em um plano, chamado de plano de cisalhamento, definido por um ângulo " $\phi$ " com relação à trajetória da ferramenta. Sabe-se que a separação do cavaco da madeira não se deve apenas a um fenômeno de cisalhamento. Na verdade ocorre um modo de ruptura mais complexo, composto por flexão e esmagamento do cavaco por ação dos esforços de compressão.



Figura 4 - Formação e ruptura do cavaco: (a) plano de cisalhamento e (b) ruptura do cavaco



Fonte : adaptado de (GONÇALVES, 2000).

Observa-se na Figura 4b que AB representa a espessura do cavaco e BC o comprimento do cavaco fracionado. Os valores de " $\phi$ " não são constantes e variam com as condições de corte.

Quando a ferramenta penetra na madeira, o volume de material ABCD situado próximo à aresta de corte é comprimido. Nesta região, ocorre o rompimento das fibras, o escoamento deste segmento ao longo da superfície de saída e a ruptura no plano " $\phi$ ". As pressões se transmitem em seguida, ao volume elementar A'B'C'D'.

A dimensão e a forma do cavaco dependem: do comportamento mecânico da madeira à compressão; cisalhamento e flexão; da geometria da ferramenta e da orientação das fibras da madeira em relação à direção de corte.

## Parâmetros de usinagem por serramento

### Velocidade de corte:

Corresponde a distância percorrida pela aresta de corte do dente por unidade de tempo. É diretamente proporcional ao diâmetro e a rotação dos volantes e pode ser calculada pela Equação 1.

$$v_c = (\pi * D_v * n_v) / 60 = 0,05236 * D_v * n_v \quad (1)$$

Sendo:

- $v_c$  = velocidade de corte [m/s]
- $D_v$  = diâmetro dos volantes [m]
- $n_v$  = número de revoluções por minuto do volante motor [rpm]

A Equação 2 é uma decorrência da Equação 1 e permite calcular a velocidade de corte a partir da rotação do motor, do diâmetro das polias de transmissão de potência e do diâmetro do volante da serra de fita.

$$v_c = 0,05236 * D_v * n_m * (D_{mt} / D_{mv}) \quad (2)$$

Sendo :

- $D_v$  = diâmetro dos volantes [m]
- $n_m$  = número de revoluções por minuto do motor elétrico [rpm]
- $D_{mt}$  = diâmetro da polia motora [mm]
- $D_{mv}$  = diâmetro da polia movida [mm]

Segundo Gonçalves (2000), em uma máquina de serra de fita, a velocidade de corte usual para serra de desdobro para madeiras macias é de até 50 m/s, para madeiras duras entre 40 e 46 m/s e para madeiras extremamente duras de 30 a 35 m/s.

Sales (1990) faz recomendações de velocidade de corte em função da densidade da madeira e da sua abrasividade<sup>3</sup>, conforme descrito no Quadro 3:

<sup>3</sup> O estudo da abrasividade de algumas espécies de madeira tropical brasileira foi desenvolvido pelo autor em 2011 e publicado nos anais do 13º EBRAMEM realizado em Vitória (ES), 2012.

Quadro 3 - Velocidade de corte recomendada em função da abrasividade da espécie

característica da espécie florestal	Velocidade de corte recomendada
Madeira dura e muito abrasiva com grande altura de corte	25
Madeira dura e muito abrasiva a pequena altura de corte	de 25 a 35
Madeira mediamente abrasiva em grande altura de corte	de 25 a 35
Madeira de média abrasividade com pequena altura de corte	de 35 a 45
Madeira pouco abrasiva em grande altura de corte	de 35 a 45
Madeira pouco abrasiva e pequena altura	45
Madeira muito pouco abrasiva e coníferas	45
	velocidade de corte [m/s]

Fonte: adaptado de (SALES, 1990).

### Velocidade de avanço

Velocidade de avanço (ou velocidade de alimentação) é definida como sendo a distância percorrida por unidade de tempo entre a ferramenta e a madeira. Para operações de desdobro, as velocidades de avanço estão entre 15 a 100 m/min<sup>4</sup> dependendo do modelo da máquina e da espécie usinada (GONÇALVES, 2000).

Lehmann (2004) propõe a metodologia para o cálculo da máxima velocidade ( $v_{fm\acute{a}x}$ ) de alimentação conforme a Equação 3.

$$v_{fm\acute{a}x} = (GFI * v_c * S) / (p * a_p) \quad (3)$$

Sendo :

$v_{fm\acute{a}x}$	=	velocidade de avanço máxima [m/min]
GFI	=	índice alimentar da garganta [% de garganta cheia]
GFI	=	70%
$v_c$	=	velocidade de corte [m/min]
S	=	área da garganta [mm <sup>2</sup> ]
p	=	passo dos dentes [mm]
$a_p$	=	profundidade de corte [mm]

No Brasil emprega-se usualmente velocidades de avanço próximas de 17 m/min para madeiras de média e alta densidade, 22 m/min para madeiras de baixa densidade, podendo atingir 35 m/min em função da altura de corte.

<sup>4</sup> Durante o Seminário Técnico Internacional Sawtec realizado em março de 2015 em Curitiba, empresas e palestrantes apresentaram tecnologia existente usinando toras a velocidades de alimentação acima de 200 m/min para diâmetros acima de 100 mm.

### Espessura do cavaco e largura de corte

A linha de corte da trajetória da serra de fita não é perfeitamente perpendicular à direção de deslocamento da madeira. Existe uma diferença entre o deslocamento da lâmina e a linha de corte. Esta diferença resulta em uma componente angular que depende da velocidade de corte e de avanço. Para velocidade de corte de 30 m/s, esse ângulo varia de um grau a quatro graus ( $1^\circ$  a  $4^\circ$ ) quando a velocidade de avanço vai de 30 a 130 m/min.

Essa defasagem corresponde à diferença entre a espessura de cavaco real e a espessura de cavaco calculada em milímetros. A espessura de cavaco calculada representa o avanço da ferramenta em relação à madeira, e corresponde à distância percorrida pela madeira durante o tempo em que um dente efetua um deslocamento igual ao passo. Com velocidade de corte muito superior à velocidade de avanço da madeira (50 a 200 vezes), o ângulo é pequeno. Nestas condições a espessura de cavaco calculada é aproximadamente igual ao do cavaco real (GONÇALVES, 2000).

### Esforços de corte

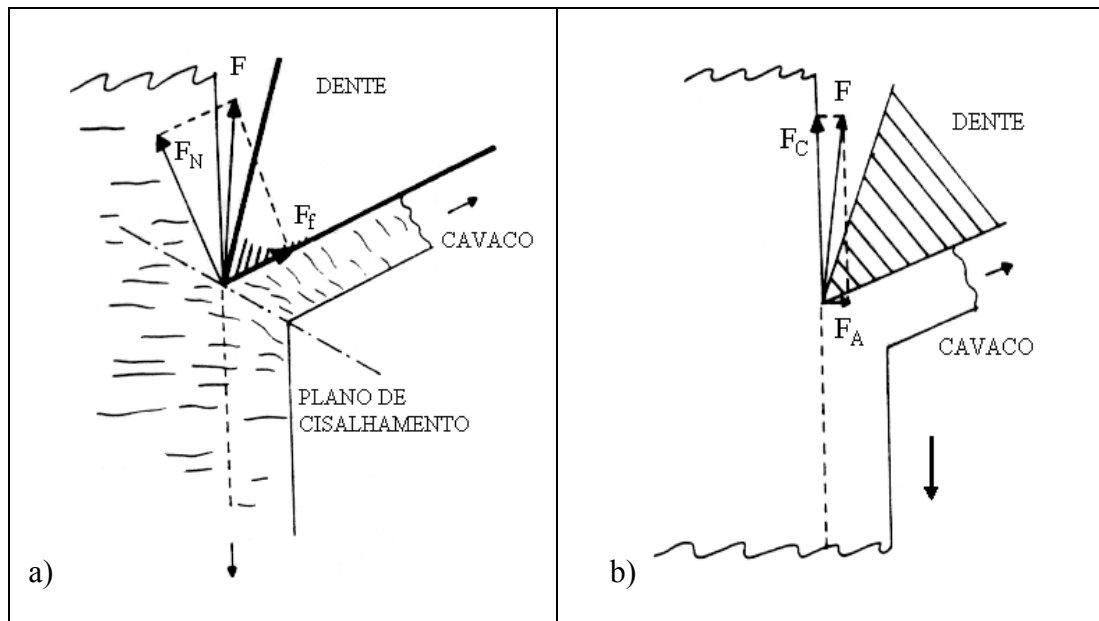
Dalois (1990) cita sete parâmetros responsáveis pelo nível de esforço de corte para o serramento por serra de fita, conforme descritos : dureza da madeira, umidade da madeira, qualidade da afiação, espessura do corte, velocidade de corte, ângulo de saída e espessura do cavaco.

Gonçalves (2000) relata que as forças que agem em um dente de serra durante o serramento contínuo podem ser divididas em dois grupos: forças que atuam no plano de trabalho e forças que atuam lateralmente ao plano de trabalho.

As forças que atuam no plano de trabalho são pressões exercidas pelo dente sobre a madeira que são aplicadas na superfície de saída. Na Figura 5 são demonstradas as forças e os planos presentes no processo de serramento da madeira, decompostas vetorialmente.

A distribuição dessas pressões é particularmente complexa, sendo elevadas na proximidade da aresta de corte e gradativamente menores ao se afastar dessa região, podendo ser simplificada a uma força normal " $F_N$ " em relação à superfície de saída e por uma força paralela " $F_f$ " decorrente dos atritos gerados pelo cavaco sobre a superfície de saída, resultando a força " $F$ " vista na Figura 5a. A força " $F$ " pode ser decomposta em uma força paralela à direção de deslocamento do dente, denominada por força de corte " $F_c$ " e uma força perpendicular a essa direção, chamada força de avanço " $F_a$ " Figura 5b.

Figura 5 - Forças atuantes : (a) esforços na ferramenta e (b) decomposição da resultante



Fonte: (GONÇALVES, 2000).

A componente " $F_a$ " não contribui ao trabalho de corte, pois é caracterizada como uma resistência ao avanço da madeira e aos esforços transversais a que a lâmina está sujeita. Assim, o trabalho necessário para o corte é dado pela Equação 4.

$$T = F_c \cdot H \cdot 1000 \quad (4)$$

Sendo:

- $T$  = trabalho necessário para o corte [Nm]  
 $F_c$  = força de corte [N]  
 $H$  = espessura de corte [m]

Os esforços de corte não atuam em um plano rigorosamente paralelo à lâmina, em razão da heterogeneidade da madeira, irregularidades dos dentes, parâmetros de corte inadequados e má remoção da serragem. Sempre há uma componente perpendicular ao plano de corte que tende a flexionar o dente e a lâmina, ocasionando desvios e irregularidades da superfície cortada. Esses desvios são menores, quanto maior a rigidez da lâmina e as características de resistência mecânica da madeira em função de seu teor de umidade, densidade e o direcionamento do corte em relação às fibras (GONÇALVES, 2000).

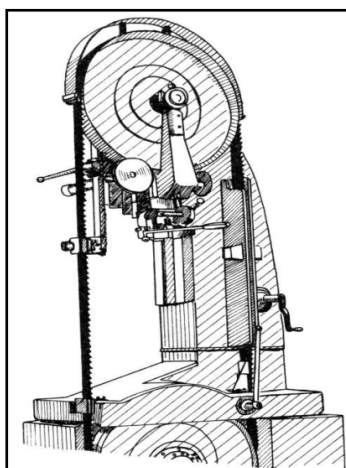
### 2.2.2 Classes e tipos de máquinas de serramento

No Catálogo Brasileiro de Máquinas e Equipamentos para Trabalhar Madeiras (2003) foi proposto um agrupamento de máquinas, equipamentos e ferramentas por ramos de atividade. O Grupo um contém as Máquinas e Equipamentos para Processos de Usinagem, a Classe 1.3 contém em sua definição as máquinas de serramento contínuo com serra de fita, divididas entre as de cabeçote vertical e horizontal, cabeçote único ou corte duplo, entre outras sub-classificações. Sales (1990) apresentou os diferentes modelos de máquinas de serra de fita, citando as características que as diferenciam, quais sejam: disposição dos volantes (vertical, horizontal e inclinada), quantidade de cabeçotes associados (simples, dupla e quádrupla), deslocamento relativo lâmina e madeira, possibilidade de cortar na direção de avanço ou na direção de avanço e retorno (serras monocortes e bicortes), tipo do volante e largura da lâmina (estreita ou larga), como segue :

#### Máquina de Serra de fita vertical

As máquinas de serra de fita vertical correspondem à maior parte das serras de fita encontradas no mundo, usadas desde as primeiras operações de corte da tora (desdobro), até operações de recorte. Neste tipo de serra de fita apresentada na Figura 6, os volantes estão dispostos um sobre o outro, na direção vertical. A lâmina é posicionada de modo que seus dentes cortem a madeira de cima para baixo. Quanto ao tipo de lâmina, há modelos de serras verticais que usam lâminas estreitas e largas.

Figura 6 - Serra de fita vertical

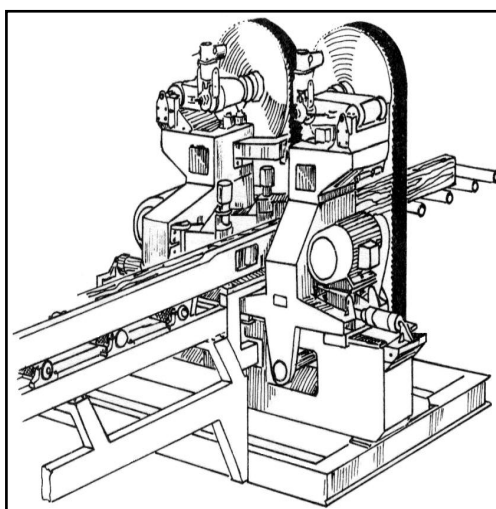


Fonte: (GONÇALVES, 2000).

Existem máquinas verticais duplas (Figura 7) e quádruplas (Figura 8), destinadas à operação de desdobro, possibilitando mais de um corte em um único avanço da madeira.

Nas serras duplas, o ajuste do diâmetro e da espessura da madeira a ser cortada é feito por um cabeçote móvel, sendo o outro fixo, contudo existem máquinas com ambos os cabeçotes móveis. Na Figura 7 pode ser visto um exemplo de máquina de serra vertical dupla que no mercado é comumente chamada de máquina geminada ou serra de fita geminada.

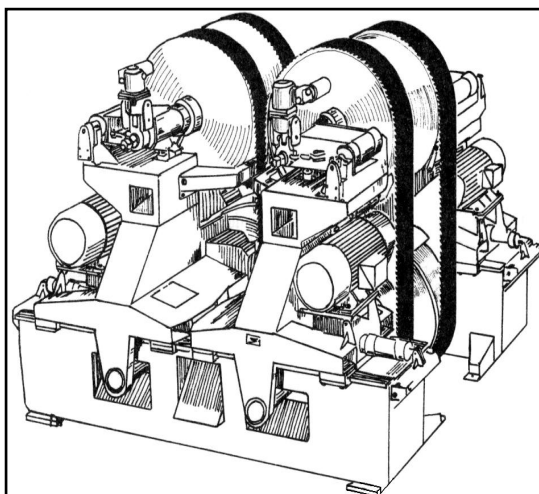
Figura 7 - Serra de fita dupla



Fonte: (GONÇALVES, 2000).

Na Figura 8 é apresentada uma imagem onde contém a serra de fita quádrupla. Trata-se de um conjunto composto por dois pares de serras de fita vertical dupla.

Figura 8 - Serra de fita quádrupla

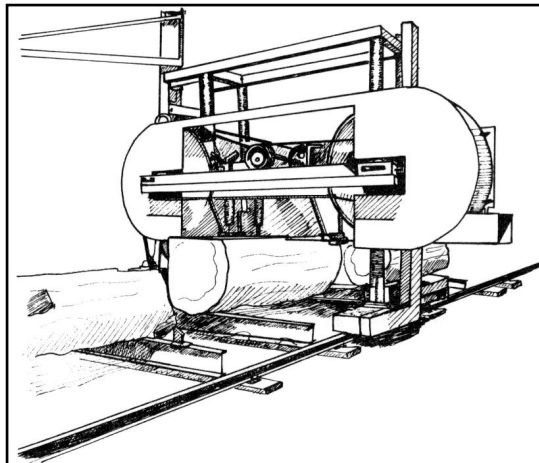


Fonte: (GONÇALVES, 2000).

## Máquina de Serra de Fita Horizontal

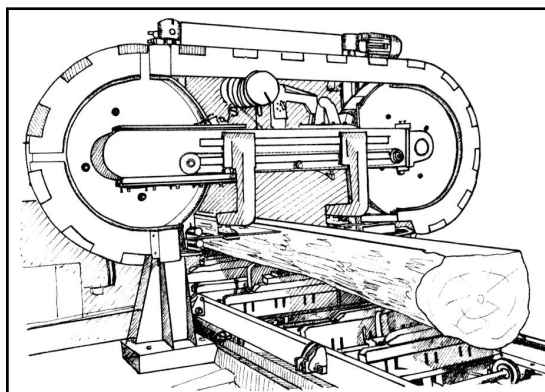
Nas máquinas de serras de fita horizontal, os volantes estão na mesma altura em relação ao piso, e a lâmina corta no plano horizontal. Os elementos principais construtivos dessas máquinas são os mesmos das máquinas de serras de fita verticais. Observa-se na Figura 9 e na Figura 10 os modelos de serra de fita horizontal.

Figura 9 - Serra de fita horizontal de cabeçote móvel



Fonte: (GONÇALVES, 2000)

Figura 10 - Serra de fita horizontal de cabeçote fixo



Fonte: (GONÇALVES, 2000).

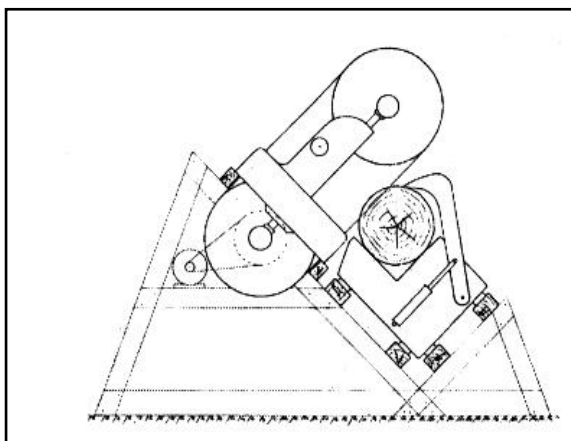
## Máquina de Serra de Fita Inclinada

São máquinas destinadas ao processamento primário da usinagem da madeira (desdobro) são vertical ou horizontal, contudo Chardin (1960 apud GONÇALVES,2000)



apresentou outro tipo quanto à disposição do cabeçote. Essa terceira possibilidade é uma máquina de serra inclinada, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Serra de fita inclinada



Fonte: (GONÇALVES, 2000).

Uma grande vantagem desse tipo de máquina é que tanto o cabeçote como o carrinho porta-tora estão sob o efeito de seus pesos próprios, assegurando maior estabilidade e evitando o movimento relativo das partes móveis ao se deslocar. Além disso, as toras ficam bem estáveis no carro porta-tora, o que possibilita eliminar as garras de fixação, no serramento de grandes toras.

#### Serra Monocorte e Bicorte

As máquinas de serra de fita monocorte usam lâminas com dentes em um só lado, o que possibilita o corte em apenas um sentido, conhecido como sentido de avanço da madeira. As serras de fita bicorte utilizam lâminas dentadas em ambos os lados, e trabalham nos sentidos de avanço e retorno da madeira. Essas serras transformam o tempo de retorno da máquina ou da madeira em tempo de corte. A economia de uma serra bicorte é realizada apenas nos tempos de retorno, reduzindo o tempo total em média de 10 a 12% do tempo total. Apesar do ganho de produtividade, uma serra bicorte possui o inconveniente de reafiações limitadas em relação às lâminas monocorte, que suportam uma maior redução de largura. Além disso, são apenas usadas em serras verticais.

### 2.2.3 Dinâmica do processo de serramento

Os parâmetros de serramento por serra de fita geram vibrações e ressonâncias na lâmina como uma resposta dinâmica do processo de usinagem. O comportamento dinâmico da ferramenta de corte está descrito pelo estudo da influência do tensionsamento da lâmina e da rotação do volante sobre as frequências específicas de oscilação transversal.

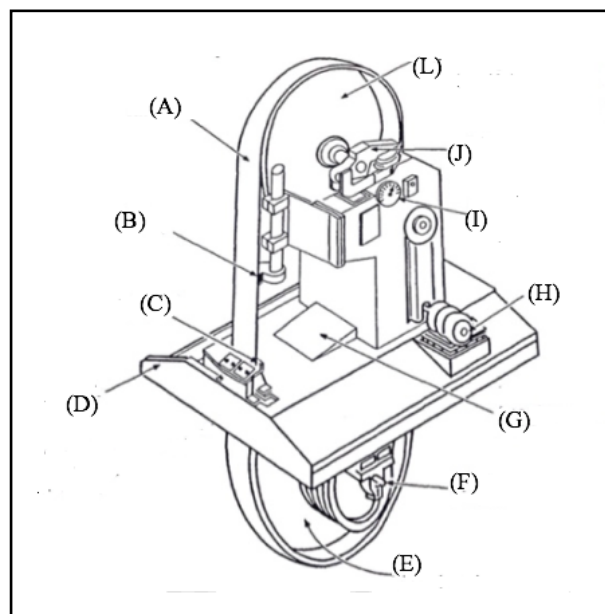
Sales (1990) afirma que essas vibrações são resultantes da influência da tensão de montagem da lâmina e da velocidade de corte, concluindo que as frequências de oscilação da lâmina diminuem em altas velocidades de corte e aumentam com o aumento da tensão de montagem desta sobre o conjunto de volantes. Controlar as vibrações durante o serramento da madeira significa reduzir a espessura de corte, ruído, manutenção e paradas; além de criar uma melhor precisão no corte e melhor acabamento superficial (ULSOY; MOTE; SZIMANI, 1978)

Podem ser usados diferentes tipos de sistemas para transportar a tora para dentro da serra de fita no ponto de corte. Os principais sistemas de transporte são os carros porta-toras e as correntes de alimentação.

#### Estrutura da máquina de serra de fita

Embora existam diversos tipos e configurações de serras de fita, estas possuem muitos componentes em comum. Na Figura 12 é apresentado os componentes básicos de uma serra de fita.

Figura 12 - Componentes de uma serra de fita



Fonte: adaptado de (BCIT, 2002).

A estrutura de base da máquina é usada para suportar choques mecânicos que a mesma recebe do impacto das toras. Também é montado sobre esta as guarnições da máquina (D) e as coberturas de fechamento. A mesa e as tampas protegem o equipamento de sujeiras e evita contatos acidentais do operador com peças em movimento. Sobre a estrutura básica são fixados os demais componentes estruturais e de movimentação axial do equipamento.

As estruturas fundamentais da máquina são as colunas que são fixas na estrutura da máquina e suportam os volantes. As serras de fita são equipadas com duas rodas ou volantes: o volante superior (L) e o volante inferior (E). O volante inferior é o volante motor e está conectado ao motor por meio de polias e correias (F). O volante superior é livre e movido pela serra (A) que gira em torno destes e é fixa devido ao sistema de estiramento, que pode ser observada por meio de um manômetro conforme o exemplo (I). Pode-se afirmar que a serra de fita além de ser a ferramenta de corte, funciona também como uma correia de transmissão de potência mecânica entre o volante motor e o volante superior.

O volante superior deve ser mais leve do que o volante inferior para evitar que o mesmo tracione o inferior devido a sua inércia em caso de alívio da potência motora. Ambos volantes devem ser do mesmo diâmetro e tamanho. O perfil onde é assentado a serra de fita no volante deve ser levemente abalado para manter a lâmina corretamente posicionada durante o corte. Os raspadores limpam a serra durante o funcionamento para evitar entrada de pó de serra entre a fita e o volante (G). A face externa do volante deve ser retificada e os volantes precisam ser dinamicamente balanceados com dada frequência ( 6 meses aproximadamente) e a cada troca de rolamentos.

O volante superior é equipado com um sistema que o permite movimentar no sentido vertical e inclinar de um lado ou de outro (H). A elevação do conjunto do volante superior (H) é importante para tracionar a serra de fita e a inclinação deste tem a função de manter alinhada a serra sobre o ponto correto de corte, ou ainda, orientar para fora da face do volante a garganta da serra e o recalque do dente, evitando perda do aresta de corte ou danificar a pista do volante (BCIT, 2002).

A serra de fita deforma-se ligeiramente à medida que rotaciona em torno dos volantes quando a tensão de estiramento é muito pequena, pode-se compensar essa liberdade de ação da serra por meio de um sistema de guia para assegurar um corte preciso. Utilizam-se duas guias em uma serra de fita, uma guia superior (B) que está acima do limite máximo da altura de corte e outra inferior (C) que está paralela ao sistema de alimentação de toras.

Um importante elemento na dinâmica do equipamento é o rolamento do eixo. Esses rolamentos devem suportar as cargas dinâmicas e as tensões resultantes tanto da força de

estiramento da serra quando dos choques dinâmicos produzidos pela interação da ferramenta de corte com o ponto de corte da madeira. O rolamento de rolo cilíndrico é o mais utilizado. O eixo do volante é montado sobre pressão no anel interno do rolamento e o anel externo é montado na coluna da serra.

Para o movimento de rotação do eixo inferior são usados motores elétricos. A potência instalada deve ser calculada levando-se em consideração o projeto da ferramenta de corte, quais sejam: o diâmetro, peso e velocidade do volante; espessura e largura da serra de fita; espessura de corte; geometria do dente; qualidade da afiação do dente da serra; altura de corte; velocidade de corte; densidade e umidade da madeira (BCIT, 2002). As potências recomendadas dos motores são descritas no Quadro 4 de acordo com os autores citados.

Quadro 4 - Relação entre diâmetro do volante e potência do motor

KOCH (1964)		BCIT (2002)	
Diâmetro do volante		Potência do motor da serra de fita	
[pés]	[m]	[hp]	[hp]
10	3,05	250 - 300	250 - 400
9	2,74	200 - 250	200 - 350
8	2,44	150 - 200	150 - 300
7	2,13	125 - 175	125 - 250
6	1,83	100 - 150	100 - 150
5	1,52	50 - 75	50 - 100
1 hp = 745,7 W			

Fonte: Adaptado de (KOCH, 1964; BCIT, 2002).

### As guias das serras

Existem diversos tipos de guias da serra, podendo ser citadas as guias convencionais e as guias de pressão.

As guias convencionais não aplicam nenhuma ação efetiva sobre a serra de fita e são ajustadas a partir de um plano de alinhamento da face dos volantes tanto internamente como externamente. Por estas não gerarem estiramento da serra, o corte neste tipo de equipamento pode ser mais impreciso, como resultado desta ação da serra não tensionada também no plano horizontal entre as guias.

Na Figura 13 é apresentada uma guia convencional do equipamento utilizado para os experimentos de laboratório no presente trabalho.

Figura 13 - Guia convencional utilizada nos experimentos de laboratório



Fonte: o autor.

Assim as guias de pressão possuem uma ação mais efetiva sobre a serra. Esse tipo de guia aplica uma força de estiramento na ferramenta de corte, empurrando-a para a face contrária a da máquina, em direção a tora ou a costaneira dependendo do tipo de equipamento que está sendo utilizado.

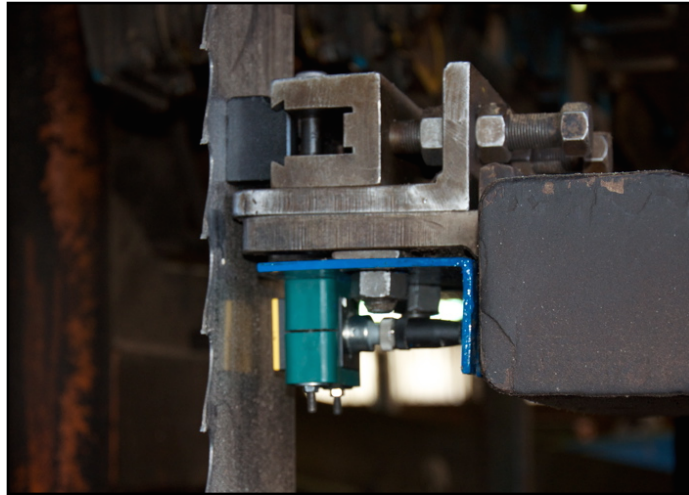
A ação da guia de pressão sobre a serra de fita causa uma força sobre a mesma deslocando-a da tangencia dos volantes nos pontos entre guias e ferramenta. Este deslocamento da lâmina de corte estabiliza a mesma e evita movimentos laterais quando esta se aquece ou se movimenta durante o corte, gerando assim um corte mais preciso.

Normalmente o deslocamento (*off set*) ou compensação da linha de ação da serra deve ser de 3/8" (9,525 mm) podendo variar para mais ou para menos de acordo com a sensibilidade do profissional. BCIT (2002) apresenta uma método prático de regulagem do deslocamento no qual recomenda que seja alinhado o perímetro externo do volante superior exatamente com o mesmo ponto do volante inferior, através de um prumo.

É importante que a experiência do operador estabeleça a exata pressão da guia a ser utilizada. Se esta pressão de corte for baixa, as forças de corte podem puxar a serra longe das guias, aumentando os desvios do corte. Se a pressão das guias for muito alta, o atrito aumenta, as guias irão se desgastar rapidamente e com esse desgaste prematuro a mesma irá perder a função gerando variação do corte semelhante aquela causada pela ausência de pressão.

Na Figura 14 é apresentada a guia de pressão superior da serra de fita utilizada nos experimentos industriais realizados, mostrando em detalhe a mesma exercendo sua pressão sobre a ferramenta de corte.

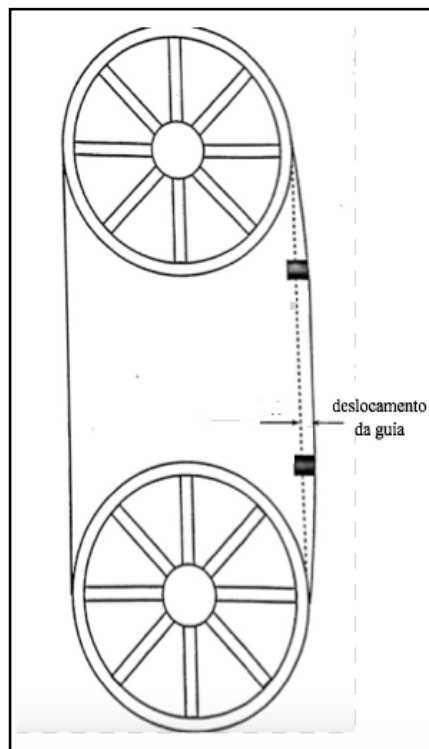
Figura 14 - Guia de pressão utilizada nos experimentos na indústria



Fonte: o autor.

Na Figura 15 é representada de maneira esquemática os dois volantes da serra de fita, a ferramenta de corte, as guias de pressão e o posicionamento destas gerando um deslocamento da serra quando estirada por meio do seu sistema de movimentação do volante superior.

Figura 15 - Deslocamento da serra pela ação da força da guia de pressão



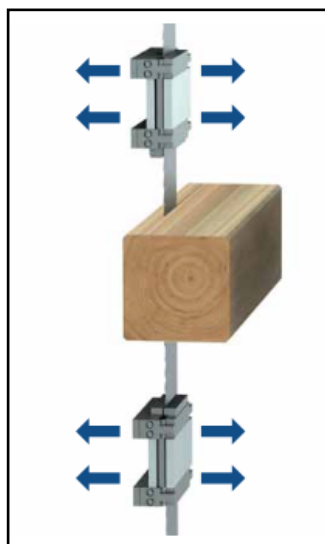
Fonte : adaptado de (BCIT, 2002).

Na literatura são relatados alguns exemplos de materiais para guias de pressão como *Easiglide* (compósito fenólico com adição de carbono), *Duramold* (compósito fenólico com adição de grãos de algodão ondulado), BL 400 (compósito fenólico com adição de fios de algodão), *Hig Ball 35* (compósito fenólico). Esses materiais possuem baixo desgaste e atrito, são auto lubrificantes, resistem à altas temperaturas e à corrosão química provocada por alguns refrigerantes usados como óleo diesel, solventes ou mesmo a resina proveniente da madeiras serradas (BCIT, 2002). Para as guias convencionais são usadas madeiras tropicais brasileiras muitas vezes.

Outro sistema de guia são as guias magnéticas ativas<sup>5</sup>. Esses sistemas detectam o momento que a serra entra em ação de corte e imprime um deslocamento por meio de uma força eletromagnética que desloca a serra a um ponto de compensação ideal. Ulsoy; Mote; Szymani (1978) relatam a possibilidade de uso dessas guias no corte da madeira por serra de fita.

Na Figura 16 está exemplificado o funcionamento dessas guias ativas durante o corte da madeira.

Figura 16 - Guia magnética ativa



Fonte: (EWD, 2015).

Como as guias convencionais e de pressão estão sujeitas ao contato com a serra, a sujeira e conseqüentemente ao desgaste, as mesmas necessitam ser retificadas periodicamente. Desgastes excessivos das guias devem ser investigados, pois podem ser causados por

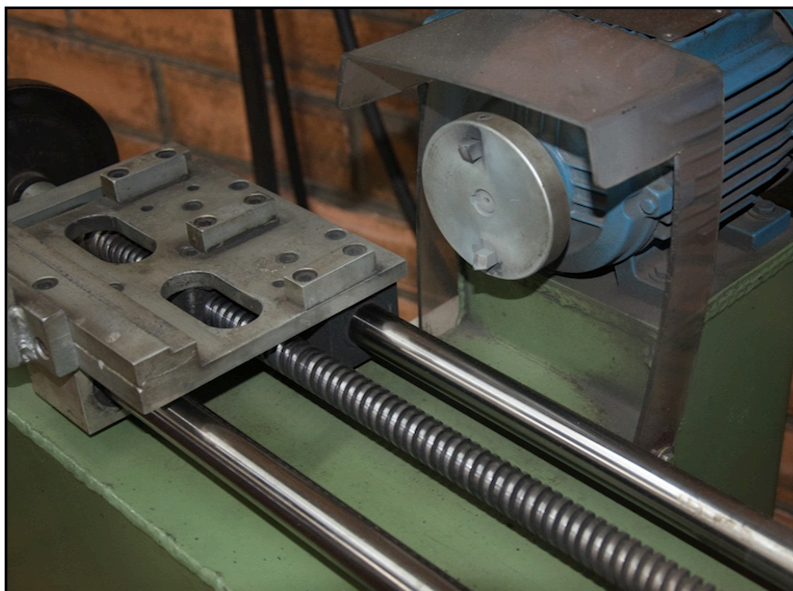
<sup>5</sup> [http://www.ewd.de/fileadmin/user\\_upload/images/Bandsaege-Technologie/Flying\\_Bandsaw/01\\_PDF/Broschuere-FlyingBandSaw\\_EWD\\_EN\\_web.pdf](http://www.ewd.de/fileadmin/user_upload/images/Bandsaege-Technologie/Flying_Bandsaw/01_PDF/Broschuere-FlyingBandSaw_EWD_EN_web.pdf)

elementos do processo que quando tratados de forma conveniente impactam positivamente nos níveis de produção e qualidade dos produtos serrados.

BCIT (2002) cita o uso de uma guia de pressão na parte interna do equipamento, oposto a face de corte dos volantes, estabilizando as vibrações secundárias presentes e, segundo o autor, impactando em melhor estabilidade da mesma pois evita a propagação de vibração para região do plano de corte.

Na Figura 17 pode ser observado o equipamento que é utilizado para fazer a retífica das guias de pressão. Esse equipameto é composto de uma mesa onde é fixa a guia da serra, com movimento longitudinal manual, e esta peça é usinada por meio de duas ferramentas de corte fixas diretamente ao motor elétrico em rotação. Esse equipamento de construção simples garante um paralelismo perfeito e um bom acabamento superficial na face usinada que estará mais em função da experiência do preparador de ferramentas do que de parâmetros técnicos específicos de controle de velocidade de alimentação.

Figura 17 - Equipamento para retificação da guia de pressão da serra



Fonte : o autor



## 2.3 DESEMPENHO DA INDÚSTRIA MADEIREIRA

A medição do desempenho é o processo de quantificação da ação que leva a execução de determinada tarefa. A lógica competitiva das organizações é atingir seus objetivos, satisfazer seus clientes e demais grupos de interesse, de uma forma mais eficiente e eficaz que seus concorrentes. A eficácia refere-se a quanto se atinge dos objetivos dos clientes e outros interessados, enquanto eficiência é a medida de quão economicamente os recursos da organização são utilizados (CORRÊA; CORRÊA, 2012).

Tuset; Duran (1986) descrevem que a forma tradicional para se expressar a produtividade em serrarias é em volume de madeira serrada por hora ou volume de madeira serrada por hora/homem.

A eficiência expressa a relação entre o volume de toras desdobradas por período de tempo e o número de operários envolvidos em todas as operações de desdobro. Essa relação é dada por volume/num. op./turno, por exemplo (ROCHA, 2002).

Gonçalves (2000) define conversão como uma maneira de medir o desempenho de um processo usando por base unidades distintas e diferentes. Por exemplo, metro estéreo de toras por m<sup>3</sup> de madeira serrada. Esse fator é muito utilizado em serrarias no Brasil.

O coeficiente de transformação ou fator de rendimento, é a relação entre volume de madeira serrada (m<sup>3</sup>) que se obtém pelo volume de toras utilizadas para essa produção, medido também em metros cúbicos (m<sup>3</sup>). Esta unidade é dada em porcentagem por terem a mesma dimensão. Faz-se a medida do rendimento por meio do volume das toras sem casca e o somatório dos volumes de madeira serrada obtida, ambos medidos linearmente em milímetros (mm) para se obter o volume métrico (ROCHA, 2002).

Em se tratando da indústria da madeira, um importante parâmetro de produtividade é o acerto. O acerto se refere à porcentagem obtida do produto principal desejado comparado com a produção no mesmo período, ou, a diferença percentual entre os produtos que foram planejados e os efetivamente produzidos<sup>6</sup>.

O cálculo do fator de rendimento ou rendimento do processo de desdobro de toras pode ser feito com mais exatidão por meio da digitalização das toras utilizadas<sup>7</sup>. A partir

---

<sup>6</sup> O conceito de acerto é amplamente utilizado por empresas internacionais de fabricação de equipamentos para indústrias madeireiras. Esse termo não possui referências ou citações publicadas nas fontes consultadas.

<sup>7</sup> Informação citada no congresso internacional SAWTEC promovido pela empresa Inderfor em Curitiba no ano de 2015.

dessa quantificação diamétrica e de comprimento, tem-se o somatório do volume total de toras serradas em determinado tempo.

Diferente da medida de rendimento que possui um número preciso na casa centesimal, o cálculo da conversão utilizando como referência de cálculo a medida do volume de toras utilizado chamado volume estéreo, perde precisão devido a uma série de parâmetros não comuns em todas as fases de tomada de medida, pois esta se baseia na medida da madeira empilhada. Alguns aspectos relativos à acuracidade do estéreo são citados por Batista e Do Couto (2002). Os fatores que influem na forma e na leitura do volume empilhado são: espécie, região, DAP e altura total (para uma mesma espécie e região), conicidade ou forma do tronco, tortuosidade e defeitos do tronco, toras com casca ou sem casca, presença de tocos nos ramos das toras, diâmetro das toras, comprimento das toras, tempo de colheita, e método de empilhamento (mecânico ou manual).

Barros (2006) afirma que a madeira após o corte perde uma quantidade considerável de água levando a redução de seu peso. Se essa madeira permanecer empilhada, por um período grande de tempo, pode ocorrer essa secagem e a mesma sofre uma variação dimensional, ocorrendo uma redução no volume aparente da pilha de toras sob efeito do tempo. Diante dessa imprecisão, o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normas e Qualidade Industrial), e a SBS (Sociedade Brasileira de Silvicultura) insatisfeitos com a forma utilizada para cubagem de pilhas e sua conversão em madeira macica e, vice-versa, vem realizando estudos sobre a utilização da unidade de medida estéreo (mst), com o objetivo de normalizar a utilização do método e estabelecer uma estratégia de mudança e melhoria do sistema de medição no País. Cita o autor que no ano de 2009 houve uma proposta de portaria do INMETRO visando abolir gradualmente a utilização do estéreo.

Pequenos impactos de ganho ou perda de produtividade não são percebidos por decorrência das imprecisões de leitura da variável volume consumido no cálculo do fator de conversão em consequência da não acuracidade do estéreo.

O uso de digitalizador de imagens no pátio de toras e na mesa de entrada da serraria, é uma maneira de quantificar o volume exato de toras que são processadas ao longo de um determinado período, fornecendo informações de rastreabilidade e quantificação para controle do fornecimento na origem, do consumo de matéria prima e para o planejamento da produção.

O perfil digitalizado da tora também é utilizado para orientar o corte otimizado nos processos de desdobro. Os sistemas usam tais referências cartesianas, obtidas pelo digitalizador e processado por um *software* dedicado, para que um microprocessador gere sinais referenciais de posição para que, por meio de um CLP sejam comandados atuadores

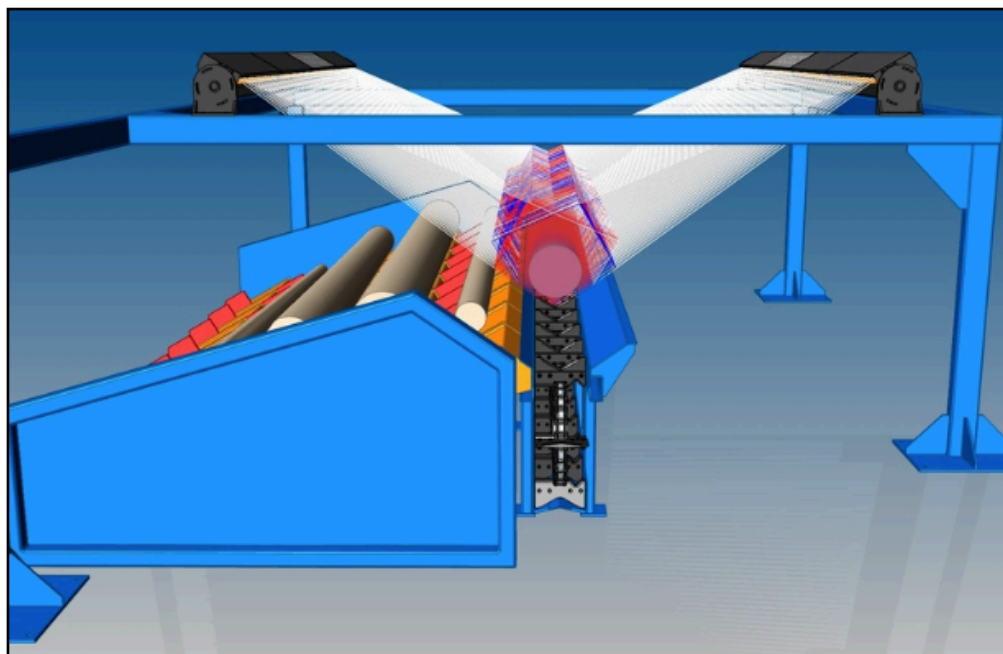
que posicionem os equipamentos durante o processo de serramento da tora. Essas operações são efetuadas em tempos inferiores a décimos de segundos.

A tecnologia de digitalização é utilizada com maior frequência por serrarias que monitoram seu desempenho e quantificam com exatidão o volume diário de consumo de toras. Assim são obtidos dados para seus setores de planejamento e controle da produção, porém a tecnologia 2d que inicia a ser conhecida no Brasil, já é uma tecnologia ultrapassada nos países com maior cultura no uso da madeira.

Maleta (2014) cita em seu artigo que a tecnologia de digitalização de imagens deve crescer nos EUA nos próximos anos pois após a crise de 2007 a 2011, o país iniciou um novo ciclo de investimento com crescimento da construção civil e que isso puxará as indústrias madeireiras do país, trazendo ao setor novas tecnologias. Destaca entre as novas tecnologias a digitalização 3D, em paralelo ao uso do raio X e ultrassom. Assim o processamento de corte por meio desses parâmetros consegue eleger o melhor plano de corte e essa decisão repercute em excelentes índices de conversão.

Na Figura 18 está representado um sistema 3D de medição de toras conforme citado por Maleta (2014).

Figura 18 - Sistema 3D para medir toras



Fonte: (AUTOLOG, 2016).

Lehmann (2010) cita que a maneira tradicional de se aumentar a produtividade em serrarias é incorporar tecnologias investindo em novos equipamentos e sistemas de

computação. Essas opções além de demandar investimentos financeiros altos, geram problemas durante a integração dos diversos subsistemas do processo existente, demandando tempo em treinamentos para que os operadores se adaptem. Afirma o autor, que o primeiro passo na busca da eficácia é ser bom para depois ser rápido e que embora a estratégia mais comum para ganho de eficiência seja o aumento da velocidade de alimentação, algumas empresas tem tido benefícios ao produzir mais lentamente, mas com maior qualidade e precisão no corte, pois assim, o processo todo de desdobro pode ser otimizado e sistemicamente introduzir benefícios e resultados.

Para contextualizar a eficiência de indústrias madeireiras, Rocha (2002) traz alguns exemplos de eficiência<sup>8</sup> em serrarias de diversos países e regiões madeireiras, entre as quais:

- Serrarias automatizadas no Brasil: 20 a 50 m<sup>3</sup>/op./turno;
- Serrarias comuns: 5 a 10 m<sup>3</sup>/op./turno;
- América do Norte e Europa: acima de 50 m<sup>3</sup>/op./turno;
- Amazonas: 0,3 m<sup>3</sup>/op./turno.

---

<sup>8</sup> A eficiência expressa a relação entre o volume de toras desdobradas por período de tempo e o número de operários envolvidos em todas as operações de desdobro (ROCHA,2002).

## 2.4 FERRAMENTAS DE CORTE

### 2.4.1 O projeto da ferramenta

A seleção da ferramenta de corte é determinada em função das espécies de madeira que serão usinadas. Não se refere apenas à geometria do dente, mas também a largura e a espessura da serra e em função de uma consideração cuidadosa de outros fatores, tais como: direção de corte, material da ferramenta, dureza da ferramenta, dimensões do equipamento (diâmetro do volante, largura e comprimento da serra), número de dentes, geometria da garganta do dente, folga lateral (espessura do dente em relação à alma da serra), material da ponta do dente e as tolerâncias dimensionais admissíveis do produto. Segundo Santini (2000), a seleção de uma serra é uma decisão muito importante. Ainda após a escolha, a serra deve ser ajustada e operada com certas especificações para um desempenho adequado.

BCIT (2000) afirma que as serras são projetadas para operar sobre uma máquina em particular e para cortar um específico tipo de material com acabamento e acuracidade desejados. Os fatores fundamentais para escolher o perfil de dente são:

- Condições da matéria prima: se dura, menos densa, seca, congelada, e em função do desenho da garganta do dente pode retirar mais pó de serra.
- Direção de corte em relação a orientação das fibras: os dentes para o corte transversal de determinada madeira estão sujeitos a esforços maiores quando comparado a um dente para serrar longitudinalmente.
- Velocidade de corte: velocidades de corte alta exigem um perfil de dente robusto com grande área de garganta. Velocidades baixas de corte podem ter menor área da garganta do dente.
- Velocidade de alimentação: semelhante à velocidade de corte, maiores velocidades necessitam de maior robustez no perfil do dente e maior área da garganta.
- Espessura da lâmina: uma lâmina fina requer um perfil de dente mais robusto.
- Altura do corte: Grande altura de corte requer grande área da garganta do dente. Algumas vezes se compensa durante o corte de grande altura reduzindo-se a velocidade de alimentação.

Do ponto de vista das forças de corte, é desejável reduzi-las tanto quanto possível, aumentando o ângulo de saída da ferramenta. No entanto, isso resulta em um dente com um

ângulo de cunha pequeno que pode ter sido enfraquecido o suficiente que o dente dobre ou quebre. Ao aumentar o ângulo de saída, diminui-se o ângulo de cunha, fragilizando a ferramenta. O ângulo de folga deve ser o mínimo possível para que esteja no limite entre o não queimar a madeira, mas mantendo o maior ângulo de cunha possível dando rigidez a ferramenta (BCIT , 2002). O formato e as dimensões dos dentes da serra têm influência direta sobre o resultado do corte. De modo geral, considera-se que a geometria ideal é aquela que possibilita ganhos de qualidade e produtividade na madeira serrada. A escolha do dente deve considerar os seguintes fatores: capacidade de garganta, estabilidade lateral adequada e geometria cortante (SANDVIK, 1999). A geometria do dente afeta a variação do corte (instabilidade), o acabamento superficial, a espessura do corte e o consumo energético (BCIT, 2002).

O formato e o acabamento superficial do dente é feito por meio da retificação por rebolo abrasivo que está fixo na afiadora de serra. O rebolo vai usinando o perfil do dente por meio de diversas passagens subsequentes ao longo de toda a ferramenta. O perfil do dente é resultante do desenho do came seguidor que por um mecanismo complexo translada o conjunto do rebolo em rotação e copia o desenho e o passo da ferramenta para cada rotação completa do came seguidor. O passo, os ângulos de ataque e de folga bem como o perfil do dente podem ser ajustado na afiadora de serra de fita. Na Figura 19 é apresentada uma afiadora de serra de fita.

Figura 19 - Afiadora dos dentes da serra de fita

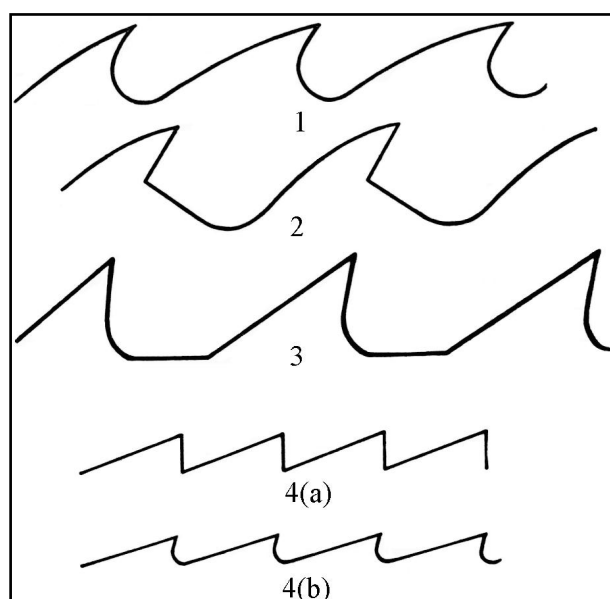


Fonte: o autor.

A correta escolha do passo do dente, dos ângulos da ferramenta, da área da garganta e dos ângulos de folga radial e tangencial irão gerar o melhor resultado na performance do corte, pois em função destes poderá se ter resultados positivos ou negativos nos aspectos de variações no corte, acabamento superficial, espessura de corte e consumo de energia.

Tuset; Duran (1986) apresentam alguns tipos de dentes os quais são os mais utilizados. Os perfis demonstrados na Figura 20 podem ser usados em diversas aplicações. No caso de lâminas de serra de fita larga, usam-se os perfis de 1 a 3. Para lâminas de serra de fita estreita, recomendam-se os perfis 4a e 4b.

Figura 20 - Perfis de dentes utilizados em serras de fita



Fonte: adaptado de (TUSET; DURAN, 1986).

O perfil 1 possui garganta ampla e boa rigidez, usado para desdobro para qualquer madeira; o perfil 2 permite fracionar o cavaco mais facilmente e é usado para todo o tipo de madeira e o perfil 3 possui ângulo de saída e espaço da garganta muito amplo, devido a estas características é usado no serramento de madeiras macias (baixa densidade).

Os perfis 4a e 4b são utilizados no processamento por lâmina de fita estreita.

Loehnertz; Cooz; Guerrero (1994) apresentam um estudo onde descrevem os perfis de dentes mais utilizados no Brasil.

No Quadro 5 é apresentada uma correlação entre autores, perfis de dentes e denominação encontrados na literatura e não padronizados para a língua portuguesa.

Quadro 5 - Correlações entre nome e perfis de dentes utilizados

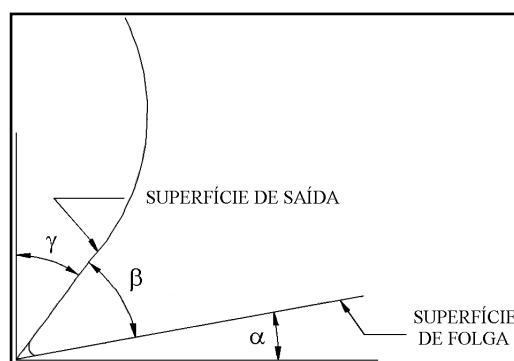
DALOIS 1990	Perfis de dentes e denominações por autor / ano			
	SANDVIK 1999	TUSET; DURAN 1986	FORÉZIENNE 2010	VIDAURRE 2006
<i>Perroquet</i>	S	1 ou C	PV	NS
<i>Gencives</i>		3 ou especial	GD	O
<i>Couchée</i>	LS	4 ( b )	NV	N
<i>Copeaux projetés</i>	SB	2 ou P	CP	SB

Fonte: adaptado pelo autor.

A ABNT NBR ISO 3002 (2013) define a nomenclatura para os ângulos que compõem a geometria do dente de uma serra, sendo essa nomenclatura composta por letras gregas da seguinte forma: alfa ( $\alpha$ ) para ângulo de folga, beta ( $\beta$ ) para ângulo de cunha e gama ( $\gamma$ ) para o ângulo de saída do cavaco.

Na Figura 21 é representada esquematicamente a nomenclatura dos ângulos do dente de uma lâmina de serra e as superfícies de folga e de saída

Figura 21 - Geometria de um dente de serra



Fonte : adaptado de (KILLMANN; FINK, 1996).

**Ângulo de saída ( $\gamma$ ):** o ângulo de saída (do cavaco) ou ângulo de ataque permite a penetração da aresta cortante na madeira. Para o serramento longitudinal interessa-se a escolha de um dente reforçado que permita grande resistência em sua ponta, assim como confira rigidez na lâmina da serra fita. Altas velocidades de avanço requerem maiores ângulos de saída que velocidades de avanço menores (DALOIS, 1990).

**Ângulo de folga ( $\alpha$ ):** o ângulo de folga deve ser suficiente para que as costas do dente não entrem em contato com a madeira após o corte, evitando atrito e geração de calor. Grandes ângulos de folga diminuem a força de avanço da madeira (menos contato da madeira com partes não cortantes da lâmina), contudo aumentam a tendência de deterioração do dente, por estarem vinculados a pequenos ângulos de cunha. Inversamente, pequenos ângulos de



folga permitem grandes ângulos de cunha e dentes mais robustos, mas podem perder estabilidade no corte devido a um possível contato das costas do dente com a madeira.

**Ângulo de cunha ( $\beta$ ):** representa o ângulo do aresta cortante, formado pelo material que constitui o dente da serra, por este motivo, determina a resistência mecânica do dente. Se este ângulo for muito pequeno, o dente será frágil, e pode facilmente ser quebrado com aplicação de carga. Com um excessivo ângulo de cunha, a velocidade de avanço é restringida.

No Quadro 6 são recomendados ângulos dos dentes no serramento das madeiras de espécies de coníferas e de folhosas. O somatório dos valores dos ângulos de saída, cunha e folga é  $90^\circ$ .

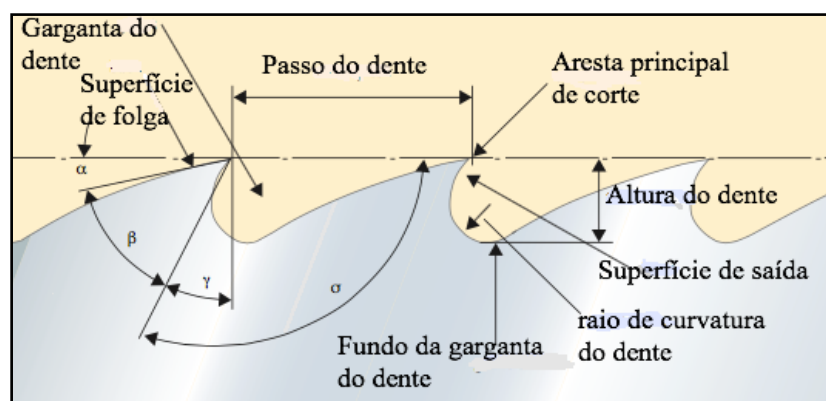
Quadro 6 - Ângulos nas serras de fitas no corte da madeira

Ângulos	Folhosas	Coníferas
Saída ( $\gamma$ )	$20^\circ$	$30^\circ$
Cunha ( $\beta$ )	$62^\circ$	$48^\circ$
Folga ( $\alpha$ )	$8^\circ$	$12^\circ$

Fonte: adaptado de (LEHMANN, 2010).

A terminologia utilizada para o projeto de ferramenta considera o passo da serra, as superfícies de trabalho, os ângulos do dente, a garganta do dente, a altura do dente, as arestas de corte, entre outras. Na Figura 22 é apresentada a terminologia utilizada para os dentes de serra de fita.

Figura 22 - Terminologia usada para os dentes da serra de fita



Fonte: adaptado de (SANDVIK, 1999).

FORÉZIENNE (2010) propõe uma relação para a espessura da lâmina que pode ser observada no Quadro 7.

Quadro 7 - Relações entre diâmetro do volante e espessura da lâmina

D - Diâmetro do volante	[mm]	500	700	1000	1300	1800	2200
e - espessura da serra	[mm]	0,4	0,6	0,9	1,2	1,80	2,4
relação e/D	-	1250	1167	1111	1040	984	913

Fonte: adaptado de (FOREZIÉNE, 2010).

SANDVIK (1999) define a espessura da lâmina de serra com uma relação direta com o diâmetro do volante. As serras de padrão de espessura inferior a 1,47 mm não devem ter uma espessura maior que 1/1000 do diâmetro do volante da serra fita. As serras mais espessas que 1,47 mm não devem ter uma espessura superior a 1/1200 do diâmetro do volante. A empresa recomenda o uso de serras sempre mais finas possível, pois estas durarão mais, devido a menores esforços de fadiga no movimento dinâmico da serra de fita.

Gonçalves (2000) relata que a largura da lâmina está relacionada com a largura dos volantes, sendo que o fundo da garganta dos dentes, deve estar pelo menos 5 mm para fora do volante.

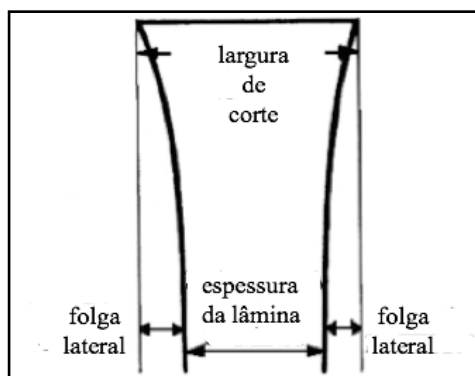
De acordo com Gonçalves (2000), a medida que a lâmina é reafiada, sua largura diminui, sendo necessário o descarte da mesma a partir da redução de um terço da largura original. Essas lâminas, empregadas nas operações de desdobro, estão limitadas ao corte reto, sob pena da colisão da lateral da serra com a madeira.

A folga lateral entre a lâmina de serra e a madeira deve ser suficiente para evitar atrito excessivo. O tamanho da folga lateral é estabelecido pelos parâmetros de corte, tipo e geometria do dente, pelo equipamento (tipo de guia da lâmina e alinhamento) e o tipo de madeira (espécie e umidade).

Em empresas que utilizam serras com aplicação de *Stellite*<sup>9</sup>, é necessário após a deposição do material na aresta principal de corte, retificar o dente para obter o ângulo desejado. Para isso são definidos dois ângulos principais de folga possíveis de serem aplicados, sendo eles o ângulo de folga tangencial e o ângulo de folga axial. Na Figura 23 é ilustrada a folga lateral de um dente recalçado manualmente.

<sup>9</sup> *Stellite* trata-se de um material utilizado na aresta de corte para ferramentas da usinagem da madeira a ser descrito no presente trabalho.

Figura 23 - Folga lateral em um dente de serra de fita comum



Fonte : adaptado de (Gonçalves, 2000).

Ângulo de folga tangencial: É o ângulo de folga visto pela superfície de saída. Tem a função de permitir com que ao longo do comprimento de corte a ferramenta fique livre em seu percurso na madeira no sentido do movimento da serra.

Ângulo de folga axial: É o ângulo de folga visto pela superfície de folga do dente. Esse ângulo faz com que o início do dente seja maior do que o final do dente. Assim, a função desse ângulo é permitir que haja espaço para o dente correr livre no movimento relativo originado pelo avanço da madeira sobre a serra.

O equipamento apresentado na Figura 24 mostra em detalhe os dois cabeçotes para retificação do dente da serra quando se utiliza serras com aplicação de *Stellite* na aresta principal de corte. Na parte inferior do eixo dos cabeçotes se encontra o nônio de referência para a regulagem do ângulo de folga axial descrito. Usualmente as serras recalcadas não permitem que os ângulos acima citados sejam precisamente definidos, sendo que tais ângulos só são efetivos por meio do uso de um equipamento como esse.

Figura 24 - Equipamento para retificação do ângulo de folga tangencial e axial



Fonte: o autor.

A distância da ponta de um dente ao outro adjacente é conhecida como passo da serra, que pode ser visto na Figura 22. Esse parâmetro determina o número de dentes que estará atuando ao mesmo tempo em uma peça de madeira com uma determinada altura de corte.

Conforme Tuset; Duran (1986) os seguintes fatores devem ser considerados para selecionar o passo adequado:

- Velocidade de Corte: para aumentar a velocidade de corte, aumenta-se o passo;
- Velocidade de Avanço: passo maior significa diminuir o avanço sem diminuir o rendimento. Porém esta solução requer afiações mais freqüentes dos dentes;
- Perfil dos Dentes: a garganta de um dente deve possuir forma e profundidade adequadas para assegurar uma boa remoção da serragem; e os ângulos do dente devem garantir um bom corte e rigidez;
- Tipo da Madeira: madeiras duras precisam ser cortadas com passos menores que as macias; assim como madeiras secas necessitam passos menores que as do estado verde; já madeiras abrasivas são melhores cortadas com passos maiores;
- Altura de Corte: recomenda-se manter pelo menos de 3 a 5 dentes trabalhando durante o corte, para dividir os esforços de remover a serragem sem problemas;
- Largura e espessura: com maiores larguras e espessuras, o passo pode ser aumentado mantendo a rigidez da serra. Quanto maior a largura das serras maior o passo. Isto é explicado por Koch (1964), devido as lâminas largas trabalharem a altas velocidades de corte, em grandes altura de corte precisam de uma passo maior para conter uma grande garganta, para alojar a serragem produzida.

A altura do dente é a distância entre a aresta de corte e o fundo da garganta. Algumas recomendações para a altura dos dentes de uma lâmina de serra de fita são listadas por autores como Tuset; Duran (1986) e Gonçalves (2000). Os principais pontos que definem essa aplicação são:

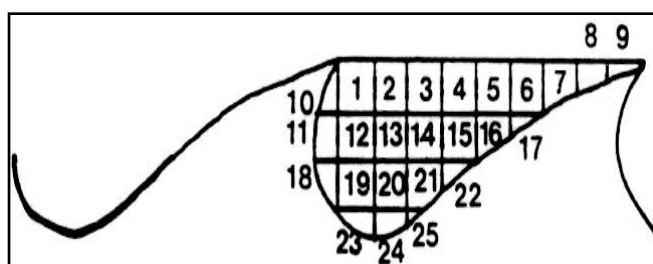
- Para madeiras macias - Lâminas com dentes recalçados, a altura igual a um terço do passo.
- Para madeiras duras - Lâminas com dentes recalçados, altura três vezes e meia a quatro vezes menor que o passo.

Sales (1990) afirma que a área da garganta do dente possui as funções de alojar a serragem produzida no serramento e removê-la para fora da região do corte. Para uma boa

performance da lâmina, as partículas de serragem devem permanecer na garganta enquanto se corta a madeira. Para isso, a garganta deve possuir uma capacidade adequada ao trabalho, pois o volume de material acima de sua capacidade, resulta no excesso de serragem saindo pelas laterais da lâmina, que são comprimidas entre a madeira e a lâmina provocando atrito, aquecimento e dificultando o trabalho da serra. Nesta situação, é comum o aumento de força exigida para o corte, irregularidades e variação de medida da peça serrada, e em casos extremos, o travamento da serra.

Conhecendo o volume de serragem, o cálculo da capacidade da garganta pode ser simplificado por um problema de geometria. Para calcular a superfície da garganta do dente, é necessário decompô-la em elementos de forma geométrica simples. Como pode ser observado na Figura 25, o número de quadrados iguais somando os elementos restantes o que resulta no total de quadrados. Assim, o cálculo da capacidade da garganta é feito multiplicando o valor da superfície desses quadros encontrados, pela espessura de corte (SALES, 1990).

Figura 25 - Cálculo do volume da garganta de um dente de serra



Fonte: (SALES, 1990)

Sales (1990) propõe fórmulas matemáticas para o cálculo da área do dente em função de seu passo e altura. Atualmente técnicas de digitalização de imagens permitem que se faça esse cálculo com maior precisão.

SANDVIK (1999) propõe uma metodologia para se calcular a capacidade da garganta do dente em função do tamanho do cavaco multiplicado pela altura do corte, pois, segundo estes a capacidade da área da garganta deveria coincidir com a velocidade de alimentação para se obter o melhor resultado do processo. Através do uso da Equação 5 é possível calcular a taxa de alimentação por dente:

$$t = (p * v_f) / v_c \quad (5)$$

Onde:

t	=	alimentação por dente [mm];
p	=	passo do dente [mm];
v <sub>f</sub>	=	velocidade de alimentação [m/s];
v <sub>c</sub>	=	velocidade de corte [m/s];

Pela Equação 6 é possível calcular a área “arrancada” de material pelo dente da serra durante o processo de serramento. Para isso deve ser conhecido o diâmetro da tora ou a altura de corte do material usinado.

$$A = t * h \quad (6)$$

Onde:

A	=	“área” arrancada pelo dente [mm <sup>2</sup> ]
t	=	Alimentação por dente [mm]
h	=	Altura do corte [mm]

Uma forma de quantificar a capacidade da garganta é o Índice de Ocupação da Garganta (IOG). O IOG é um índice adimensional, definido como a razão do volume de madeira convertida em serragem que pode ocupar o volume da garganta (GONÇALVES, 2000).

Segundo Gonçalves (2000) aproximadamente 3/5 do volume total da garganta é preenchido por serragem. Volumes de serragem acima de 70% do volume da garganta podem impactar em desvios da serra durante o corte.

Uma interpretação direta é que quanto maior o volume da garganta do dente, melhor o desempenho da serra, porém, aumentar o tamanho da garganta não é uma boa saída pois, em muitos casos, pode acontecer um efeito inverso como o aumento da quantidade de serragem saindo pela lateral do dente e desestabilizando a serra. A solução para esses problemas seria o usuário da serra de fita conhecer todos os parâmetros envolvidos e adequá-los à capacidade da lâmina.

## 2.4.2 Materiais para ferramentas de corte

Ao planejar uma operação de usinagem e para que esta seja bem-sucedida, a seleção correta do material e da classe da ferramenta de corte são fatores fundamentais. Assim, conhecer cada material e seu desempenho é muito importante para a seleção correta para dada aplicação. As considerações incluem o produto a ser usinado, as condições de usinagem e o nível de qualidade superficial para cada operação.

Gonçalves (2000) cita que após análise dos fatores inerentes ao processo de usinagem deve-se atender as propriedades requeridas à ferramenta, quais sejam: dureza a quente, resistência ao desgaste abrasivo, tenacidade e estabilidade química. Portanto, é de extrema importância efetuar um estudo de adequação do processo de usinagem entre máquina, ferramenta e a peça. Os fatores “grandezas de corte” e “condições de usinagem” são tidos como determinantes na escolha da ferramenta apropriada. Os parâmetros área de seção do cavaco e velocidade de corte são responsáveis diretos pela produtividade e vida da ferramenta, respectivamente. A condição acima será responsável pelo consumo energético no processo e a consequente transmissão de potência na forma do rompimento das fibras da madeira e o desprendimento de calor no ponto de contato.

Até meados de 1980, os materiais mais empregados foram os aços rápidos e o metal duro, cabendo às ligas fundidas algumas aplicações onde se deseja um material mais duro que o aço rápido e menos frágil ou mais tenaz que o metal duro. Outros materiais a serem considerados são: o diamante e o cermet, estes últimos um misto de metal e material cerâmico. Com o avanço científico e tecnológico obtido pelos fabricantes de ferramentas, chegaram-se às ferramentas de metal duro revestida com elementos de liga através de tratamento térmico superficial, conferindo à ferramenta uma maior dureza e melhor resistência ao desgaste.

Dalois (1990) apresenta as classes de materiais empregados em ferramentas para usinagem da madeira como: aço carbono; aço liga (níquel, cromo, cobalto, vanádio etc.); aço rápido (tungstênio-cobalto); *Stellite* (liga sem ferro contendo cobalto, cromo e tungstênio) e carbeto de tungstênio (metal duro).

Santini (2000) cita que em vista dos materiais empregados como ferramentas e com base nas suas características químicas, esses materiais, de maneira genérica, podem ser agrupados como: aços carbono para ferramentas; aços rápidos; aços semi-rápidos; ligas fundidas; metal duro; metal duro revestido; materiais cerâmicos e outros materiais (Cermet, Diamante, CBN).

BCIT (2002) relata que os aços ligados para serra fita estão sujeitos a muitas sollicitações de esforços. Seu dente golpeia a madeira a grandes velocidades e a serra de fita está tensionada sobre as polias, girando sobre elas quando em funcionamento. Durante o desdobro o aço da ferramenta absorve o calor gerado, particularmente nas pontas dos dentes, parte desse calor deve ser absorvido pelo material sem empenar. Os aços para serra devem apresentar características de resistência quanto a esforços de tensionamento e tensões provenientes ao dobramento sobre os volantes e ao choque quando um dente individual inicia o arrancamento do cavaco.

Segundo Lehmann (2010), a estrutura do material do aresta de corte é diretamente proporcional a sua resistência ao desgaste. A alta resistência pode ser uma característica desejável para um material de aresta cortante porque torna o dente mais resistente ao desgaste, porém isso também resulta em um dente mais frágil. Isto significa que a ponta vai trincar ou quebrar com mais facilidade a partir de qualquer manipulação descuidada da serra ou se bater em nós, ou em pedras e sílicas presente na madeira. Por esta razão, serras que fazem os primeiros cortes ainda usam os dentes de aço, porque eles são mais tenazes e mais fáceis de reparar.

Gonçalves (2000) afirma que dos materiais usados como ferramenta de corte para a madeira em serras de fita, podemos citar os principais como aço ao carbono, metal duro e Stellite.

#### Aço ao carbono

O Aço é uma liga de Ferro com Carbono. O carbono é o elemento mais importante no controle das propriedades do aço. A lâminas de aço ao carbono de serras de fita, possuem dureza variando entre 446 a 513 Vickers<sup>10</sup> (HV) e porcentagem de carbono de 0,6 a 0,8%. Nessas porcentagens de Carbono no aço, os seguintes efeitos dos elementos de liga no aço ferramenta são citados por Gonçalves (2000):

- 0,60% C - muito tenaz; com características adequadas para têmpera e revenido; resistente ao choque;
- 0,70% C - tenacidade excelente e apresentando ainda aresta de corte resistente ao choque;

---

<sup>10</sup> Dureza é definida como a resistência que um metal oferece a penetração de um corpo mais duro. O método Vickers (HV) de dureza correlaciona a carga aplicada sobre a área deformada na peça pela impressão de uma pirâmide de base quadrada com ângulo de vértice de 136°. Utiliza-se para isso cargas de 50 a 980 N sobre o material ensaiado.



- 0,80% C - tenaz e resistente ao choque;

Efeito de outros elementos de liga:

- Silício (Si): até 0,5% atua como elemento desoxidante;
- Manganês (Mn): presente em baixos teores influi na temperabilidade do aço;
- Enxofre (S) e Fósforo (P): aparecem com teores geralmente inferiores a 0,03%, nestes teores pouco influem nas propriedades do material;
- Vanádio (V): presente em teores até o máximo de 0,50% atua para impedir o crescimento de grãos do aço formando o carbeto de vanádio que deve ser dissolvido para garantir melhor temperabilidade do aço;
- Cromo (Cr): melhora a temperabilidade do aço e impede a formação de pontos moles em peças de quaisquer dimensões.

Em ferramentas de aço ao Carbono com teores de Carbono de 1 a 1,2% observa-se que a dureza a frio se aproxima da dureza dos aços rápidos e *Stellite*, contudo perdem rapidamente resistência quando a temperatura ultrapassa 250°C (SANTINI, 2000).

Sales (2000) e Lehmann (2010) citam que a temperatura de contato da aresta principal de corte da ferramenta com a madeira durante o corte está sujeito a temperaturas superiores a 400°C.

### Aço Rápido (HSS)

Os aços rápido são ligas Fe–C altamente ligadas. Os elementos de liga produzem um ou vários dos seguintes efeitos: maior resistência mecânica em seções maiores, menor empenamento na têmpera, maior resistência a abrasão na mesma dureza, maior tenacidade na mesma dureza e maior dureza e resistência mecânica às temperaturas mais elevadas.

No caso particular dos aços para ferramentas, os requisitos desejados principais são: resistência ao desgaste, dureza a quente e tenacidade.

É difícil ter-se um tipo de aço rápido que possa satisfazer todas as exigências de uma ferramenta de corte, para isso existem características que podem ser desejadas de uma ou outra liga as quais deverá ser levada em conta para a aplicação desta ou daquela liga a ser trabalhada. Lembra o autor que resistência ao desgaste e dureza a quente são inversamente proporcionais a tenacidade (GONÇALVES, 2000).

Nos aços rápidos, o carbono varia de 0,7% a 1,60%. Quanto menor o teor de carbono, menor a dureza no estado temperado, aumentando-se a quantidade de carbeto complexo melhora, em consequência, a resistência ao desgaste. Cada elemento de liga atribui ao aço uma propriedade distinta, quais sejam, cita Gonçalves (2000):

- Tungstênio (W): é considerado o principal elemento de liga nos aços rápido. Sua principal ação é conferir a dureza a quente. O tungstênio forma um carbeto complexo com o ferro e o carbono, responsável pela alta resistência ao desgaste do aço rápido.
- Molibdênio (Mo): é utilizado como substituto parcial do tungstênio. Forma com o Fe e C, o mesmo tipo de carbeto que o Tungstênio.
- Vanádio (V): adicionado inicialmente para remover impurezas da escória e reduzir a quantidade de nitrogênio durante a fusão do aço, resulta também num aumento da eficiência de corte dos aços rápidos.
- Cromo (Cr): está sempre presente nos aços rápido entre 3,0 e 5,0%, normalmente 4,0%, o que aparentemente, se justifica por representar o melhor compromisso entre dureza e tenacidade. Juntamente com o carbono, o cromo é principal responsável pela alta temperabilidade dos aços rápido, tornando possível seu endurecimento completo, em seções relativamente grandes, mesmo com resfriamento ao ar. Outro efeito do cromo é o de reduzir a oxidação e a formação de casca de óxido durante o seu tratamento térmico.
- Cobalto (Co): tem como principal efeito aumentar a dureza a quente. São os aços rápidos ao cobalto recomendados para cortes de desbaste profundos.
- Enxofre (S): é adicionado em alguns tipos de aços rápido em teores de 0,07 e 0,17% para melhorar a usinabilidade.
- Nióbio (Nb): tem sido testado até 1,0% para diminuir a tendência à decarbonetação durante o tratamento térmico.
- Titânio (Ti): forma um carbeto mais duro que o VC, além de contribuir para uma granulação mais fina.
- Boro (B): pode substituir o carbono nos aços rápido e contribui para manter a dureza a quente, entretanto, teores maiores que 0,25% afetam a forjabilidade do aço e aumenta a sua fragilidade
- Os aços de alto C e alto V são chamados de aços super-rápido, e são os aços que apresentam a maior resistência ao desgaste para qualquer material da peça. O vanádio

umenta acentuadamente a dureza a quente dos aços rápidos, fator que, aliado à alta resistência ao desgaste, contribui para melhorar a capacidade de corte.

### Aços Semi-Rápido (HS)

Os aços semi-rápidos têm sido aplicados com algum êxito, em substituição ao aço rápido, em aplicações onde se exige maior resistência ao desgaste que os aços ao carbono para ferramentas, porém menor dureza a quente que os aços rápidos. Os aços semi-rápidos caracterizam-se por conter 4% de cromo médio. Os elementos fortes formadores de carbeto (W e Mo) estão presentes em teores relativamente baixos, o que é, de certo modo compensado pelos maiores teores de carbono e vanádio.

### Metal Duro “*cemented carbide*”

O metal duro é um produto da metalurgia do pó, designado também como carbetto de tungstênio sinterizado ou ainda chamado de *widia* (adaptado do alemão *wie Diamant* – como diamante).

Os seus constituintes fundamentais são misturados na forma de pós e submetidos a um processamento que compreende compressão, sinterização e retificação.

Essencialmente o metal duro é formado por dois constituintes, que são um carbetto extremamente duro e de alta resistência ao desgaste e um elemento aglomerante ou ligante, podendo ser um metal do grupo do ferro, usualmente o cobalto, que tem a função de aglomerante e é responsável pela tenacidade do material.

Ceratizit (2009) Fabricante de pastilhas de metal duro para o suprimento de fabricantes de serras circulares e serras de fita, apresenta em seu catálogo geral algumas especificações e recomendações de ligas para o processamento da madeira maciça.

No Quadro 8 observa-se o desempenho do metal duro de acordo com a aplicação desejada e a classe de materiais constituintes da liga. As ligas citadas são padronizadas pela série de normas ISO 513/2004 e nessa é referenciado internacionalmente o nome da liga, seus constituintes e porcentagens destes.

Observa-se assim que para cada aplicação deve ser escolhida uma classe de liga diferente, tendo em vista as propriedades mecânicas não apenas da madeira, mas também da relação da madeira e o elemento constituinte da pastilha aplicada na aresta principal de corte da serra.

Quadro 8 : Metal duro, sua aplicação e desempenho

Material	Nomenclatura Metal Duro ( ISO 513/2004 )			
madeira maciça dura	K10; K20			
madeira maciça macia	K20	K10	K01; K20	> K40
desdobro de toras	K20	K30; K10	< K40	> K40
nível de desempenho	aceitável	bom	muito bom	ótimo

Fonte : adaptado de Ceratizit (2009).

A presença de ataque químico sofrido pela madeira, ataque térmico, desgaste mecânico e fraturas são citados pelo fabricante como fatores que podem ser minimizados por meio da escolha da correta liga e sua microestrutura cristalina/dureza.

No Quadro 9 é apresentado uma relação dos elementos constituintes de cada liga de metal duro para o processamento da madeira bruta. Assim, a constituição química para cada elemento e para o balanço final do carbeto de tungstênio (WC), o tamanho de grão e a dureza das diversas ligas de metal duro utilizadas são demonstradas. A correta escolha da liga está relacionada não apenas aos aspectos do desempenho, fragilidade e duração da ferramenta, mas também a fatores relacionados com custos e condições de usinagem para cada caso em si.

Quadro 9 : Constituição química e metalográfica do metal duro conforme ISO 513/2004

classe	elementos de liga %				WC	tamanho grão	dureza HV 10 (Vickers)
	Co	Co + Ni	Co+Ni+Fe	outros			
K01	0,00%	3,00%	0,00%	0,34%	balanço	microgrão	1950
K10	5,60%	0,00%	0,00%	0,28%	balanço	grão fino	1760
K20	10,00%	0,00%	0,00%	0,70%	balanço	microgrão	1680
K30	8,50%	0,00%	0,00%	0,05%	balanço	grão médio	1420
K40	0,00%	0,00%	20,00%	0,00%	balanço	ultrafino	1240

Fonte : adaptado de Ceratizit (2009).

Como o processo de obtenção do metal duro é feito por meio de sinterização e para esta são preparadas ligas com peso em massa dos diversos elementos, bem como a preparação mecânica dos pós que serão compactados, existem muitas variações possíveis de dureza e tenacidade do material metal duro. Estas propriedades mecânicas fazem com que o MD possa ter semelhantes propriedades mecânicas de aços para ferramentas e até características de

desgaste de pastilhas cerâmicas, no mesmo produto. Assim, o range possível nas pastilhas de metal duro é muito superior ao dos outros materiais para ferramentas (CERATIZIT, 2009).

### Metal Duro Revestido

Como grande contribuição do desenvolvimento científico e tecnológico do emprego do metal duro, surgiu às ferramentas (pastilhas) de metal duro revestido. Estas apresentam componentes ainda mais resistentes ao desgaste, este fato colocou, nos dias de hoje, as pastilhas revestidas como o segmento de maior crescimento no campo dos materiais cortantes. Sua utilização tem permitido ganhos significativos nas taxas de remoção de cavaco e velocidades de usinagem, chegando a níveis até cinco vezes maiores do que os alcançados pelas pastilhas não revestidas.

A primeira pastilha revestida consistia de uma fina camada de Carbetto de Titânio (TiC) sobre um substrato convencional de Carbetto de Tungstênio (WC). Ambos, revestimentos e substratos evoluíram, apresentando-se os revestimentos simples ou múltiplos com camadas de materiais variados tais como Carbonitreto de Titânio (TiCN), Carbetto de Háfio e de Zircônio (TiC, TiN, HfC, ZrC) e também camadas de óxidos de Alumínio e de Zircônio, enquanto que os substratos, cada vez mais se tornam adequados ao recebimento de revestimentos.

Os revestimentos podem ser simples ou compostos, e constituem-se de camadas de fina granulometria e espessura, combinando propriedades de dureza e resistência ao desgaste (GONÇALVES, 2000).

### *Stellite*

O *Stellite* é um liga criada em 1922, por Ellwood Haynes, e desenvolvido principalmente para a usinagem de metais, sendo posteriormente suplantado por materiais de resistência mecânica mais elevada.

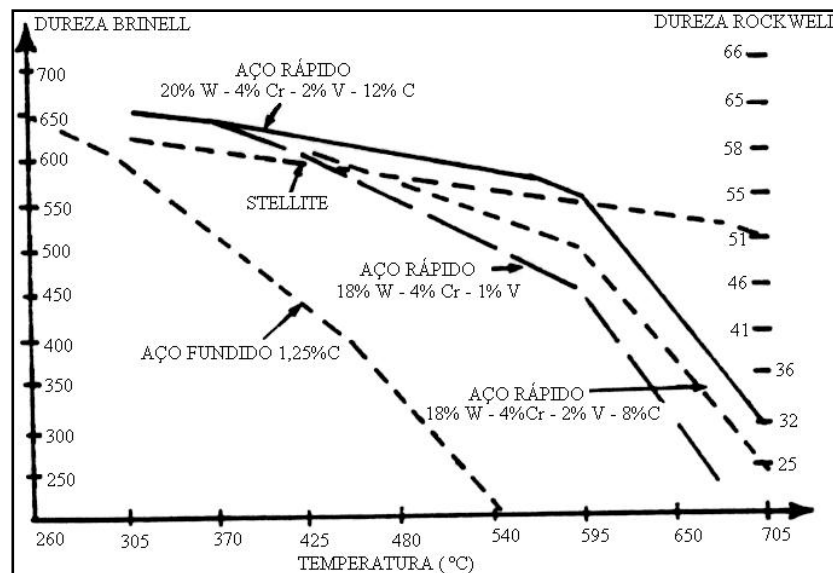
Salles (1990) afirma que esta liga possui a vantagem de apresentar a dureza a frio um pouco inferior, que a dos aços rápidos de alta liga, mas conservam em contrapartida, esta dureza a temperaturas mais elevadas, a mais de 700°C. Uma outra vantagem do *Stellite* é possuir ponto de fusão baixo, comparado a outros aço ligados, de em média 1300°C.

O *Stellite* é adicionado na forma de pastilhas soldadas ou fundido e depositado na forma de gotas sobre a ponta do dente. Após a fixação, o procedimento é retificar o perfil do dente a fim de dar-lhe a forma adequada e posterior afiação.

Sales (1985) citado por Gottlob (1996) afirma que o metal duro mostrou-se mais vantajoso, porém, a manutenção de *Stellite* é mais fácil do que a do metal duro, que não necessita de uma afiadora especial e é menos frágil que o metal duro. Se uma pequena parte de uma pastilha de metal duro lascou durante a operação, toda a ferramenta está perdida, diferente do *Stellite*, onde não existe problema em se reparar este tipo de ferramenta se for usado um equipamento para deposição por plasma ou houver conhecimento de operadores para aplicação manual de *Stellite*.

Na figura 26 pode-se observar o fenômeno da perda das propriedades mecânicas dos diversos materiais de ferramenta em função do aumento da temperatura do aresta de corte. Verifica-se que o *Stellite* quando comparado ao aço rápido de diversas ligas e ao aço liga, mantém sua dureza mais estável a altas temperaturas do que os outros materiais citados.

Figura 26 - Influência da temperatura na dureza dos materiais



Fonte : adaptado de Gonçalves (2000).

Existem quatro principais variações de *Stellite*, com pontos de fusão diferentes, no caso da nomenclatura francesa dividem-se em grau 1, 6, 8 e 12, com temperatura de fusão de 1250 °C, para os graus 1 e 12 e de 1310 °C e 1380 °C, para os graus 6 e 8, respectivamente. Os graus 12 e 1 são os mais usados por possuir menor ponto de fusão e desta forma maior facilidade para aplicações industriais.

No Quadro 10 é apresentada a composição do *Stellite* de grau 1 e 12 segundo a nomenclatura francesa e comparado com a nomenclatura americana.

Quadro 10 - Composição do *Stellite* de grau 1 e 12

nomenclatura		elementos de liga %				
Francesa	Americana	C	Cr	W	Co	outros
Grau 1	<i>Stellite 20</i>	2,50%	33,00%	13,00%	50,00%	balanço
Grau 12	<i>Stellite 12</i>	1,80%	30,00%	9,00%	58,00%	balanço

Fonte : Gonçalves (2000) .

Aspectos relativos a saúde ocupacional do trabalhador durante o uso do *Stellite* também são descritos. Kennedy *et al.* (1995) estudaram a exposição dos trabalhadores aos elementos químicos presentes nas ligas de *Stellite*, como o cobalto e o cromo, em oficinas de afiação e manutenção de serras. Os autores afirmam que os efeitos da exposição aos elementos químicos acima foi muito menor nos afiadores que utilizavam processos de afiação com fluidos refrigerantes, como óleo solúvel na afiação.

## 2.5 ESTABILIDADE DO CORTE POR SERRA DE FITA

O serramento da madeira tem sido investigado por diversos autores. A busca da estabilidade da ferramenta e o consequente corte, está relacionada ao desgaste do aresta de corte, muitas vezes não apenas em função do desgaste abrasivo, mas também a um desgaste químico. A partir desta perda da precisão do corte ou da necessidade de uma nova afiação no aresta de corte, fenômenos como vibração, ondulação do corte e corrugações na madeira são encontrados.

Pahlitzsch e Dziobek (1959 apud ULSOY, 1978) notam uma força de corte tangencial mínima para a velocidade de corte da serra de fita de aproximadamente 30 m/s.

Ulsoy; Mote; Szymani (1978) afirmam que controle da resposta da vibração pelo monitoramento do aquecimento e pelo uso de guias eletromagnéticas ativas foram evidenciadas para serras circulares e que esses conceitos parecem ser aplicáveis para o controle da vibração de serras de fita também, gerando teoricamente melhor estabilidade no corte. Do ponto de vista da estabilidade, os parâmetros importantes são a tensão axial da fita, o comprimento livre entre as guias e os tipos de guias, as componentes das forças de corte (normal, tangencial e transversal) a espessura e largura da fita, assim como as forças laterais devido às interações entre a fita e a madeira, irregularidades do volante, irregularidades da fita e o estado de tensão durante a operação.

Thunell (1971 apud ULSOY *et al*, 1978) observou que o efeito da velocidade de alimentação sobre a precisão dimensional é relativamente pequeno até que certa velocidade crítica é alcançada acima da qual a precisão deteriora rapidamente.

Taylor (1993 apud EKLUND, 2000) mostrou como a influência sobre a estabilidade depende da forma como é aplicada a tração na fita e como esta, juntamente com a tensão da fita podem reduzir o desvio da serra de fita da ordem de 30 – 40%.

Okai *et al* (2000) estabeleceram que a fita se move para frente na direção de alimentação quando o pó de serra é colocado entre a fita e o volante no lado do dente.

Pahlitzsch e Puttkammer citado por Eklund (2000) investigaram como a fita se dobra lateralmente a partir de sua posição normal e quais fatores influenciam a estabilidade estática quando forças diferentes agem sobre ela.

Lehman (2010) comenta que a mudança na geometria do dente é a solução mais comum para as corrugações e que variar o passo do dente é, normalmente, eficaz para melhorar o fenômeno da ondulação, pois a frequência de impacto varia e as forças de corte no



flanco não regeneram. No estudo apresentado pelo autor houve uma redução da intensidade da ondulação aumentando o ângulo de saída lateral tangencial de 1 grau para 3 graus.

Orlowski; Wasilewski (2005) afirmam que uma possibilidade para evitar o fenômeno das corrugações é a imposição contínua de vibrações de colisão tal como pulsações da velocidade rotacional do volante da serra de fita. Outra maneira citada foi o uso de serras de fita remodeladas com dentes recalcados de passo aleatório.

### **2.5.1 Desgaste da aresta de corte**

Denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzindo os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido (FERRARESI, 1970).

Atingindo esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. A perda da capacidade de corte é avaliada geralmente através de um determinado grau de desgaste ou por ocorrência de algum tipo de avaria. O grau e tipo de deterioração da ferramenta são devido a vários fatores, dentre eles: material da ferramenta, material da peça de trabalho, tipo de operação, rigidez da máquina, rigidez na interface peça-ferramenta, velocidade de corte e velocidade de avanço (GONÇALVES, 2010).

Ferraresi (1970) descreve diferenças entre o conceito de avaria e desgaste de ferramenta. Segundo o autor, durante a usinagem ocorre o desgaste nas superfícies de saída e de folga da ferramenta. As avarias das ferramentas são consideradas as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas que ocorrem no aresta de corte durante a usinagem. Os desgastes convencionais são medidos no plano ortogonal da ferramenta, distinguindo-se os desgastes originados na superfície de saída, na superfície de folga ou incidência e o deslocamento da aresta cortante. Na superfície de saída, tem-se o desgaste da profundidade da garganta do dente, largura e distância do centro da garganta a aresta de corte. Na superfície de incidência convencionam-se o desgaste como largura de desgaste. O deslocamento da aresta cortante deve ser medido segundo a intersecção da superfície de saída com o plano de medida e o desgaste medido sobre a bissetriz do ângulo de cunha.

Chardin (1971 apud GOTTLÖB, 1996) apresenta os principais fatores que influenciam o desgaste dos dentes de serras para usinagem de madeira, como a seguir:

- Influência da espécie de madeira: o autor afirma que se o desgaste for expresso em

termos de perda unitária de massa de metal por unidade de comprimento de corte, dependendo da espécie, esta razão pode chegar ao valor de 1:120.000. Para espécies que contém sílica, esta razão pode aumentar de 10 a 20 vezes;

- Influência do material da ferramenta: considerando o corte de madeiras com sílica, a resistência do aço rápido é 5 vezes superior ao aço carbono, a do *Stellite* chega a 20 vezes do aço carbono, e o metal duro possui resistência superior 50 vezes a do aço carbono;
- Influência do nível de umidade: nas madeiras que contém sílica, a umidade influencia somente nas espécies de média e baixa densidade. Nestas espécies, a madeira seca chega a ser 10 vezes mais abrasiva que as madeiras verdes devido aos cristais de sílica. Para as madeiras que não contém sílica, o corte de madeiras verdes é 5 vezes mais abrasivo que o corte de madeira seca devido ao efeito eletroquímico;
- Influência da espessura do cavaco: em geral, o aumento da espessura do cavaco leva a um aumento do percurso de corte de madeira com um nível de desgaste uniforme, pois o desgaste de unidade por percurso serrado é menor. Somente para serras de aço comum cortando madeira de alta densidade, este aumento da espessura do cavaco não é benéfica, porque para este aço ocorre deformação plástica da aresta de corte.

Uma extensa revisão bibliográfica apresentada a respeito do desgaste de ferramentas foi feita por Klamecki (1979), destacando os seguintes trabalhos:

- Antoine (1963) mediu a potência requerida na ponta da serra e monitorou o desgaste da mesma. Nestes ensaios, o desgaste diminuiu reduzindo velocidade de corte e uma relação linear entre o desgaste e a mudança de velocidade é relatado;
- Chardin e Froidure (1969), esse trabalho apresenta dados de vida da ferramenta e geometria da aresta gasta para a serragem de um grande número de espécies tropicais. A conclusão de que a máquina impõe condições que, em muitos casos, pode estar relacionada ao desgaste da ferramenta e talvez mais importante, estes parâmetros geralmente podem ser facilmente alterados em operações, por exemplo, mudanças na velocidade de corte;
- Timonen (1970) indica que a perda da ponta da ferramenta aumenta o raio linearmente com a velocidade de corte (para um determinado comprimento de corte) até cerca de 50 m/s. Em altas velocidades de corte o desgaste aumenta rapidamente em uma relação não linear;

- Nanasawa (1973) afirma que o número de dentes da serra e a velocidade de alimentação têm um efeito muito pequeno no desgaste;
- Decena *et al.* (1974) comparam o desgaste de aço rápido e *Stellite* na ponta dos dentes da serra. Foram utilizados: aço rápido, *Stellite*, alternadamente aço rápido e *Stellite*. No corte mais difícil para máquinas, o *Stellite* durou mais do que a do aço rápido; o mesmo artigo afirma que a natureza química da madeira pode desempenhar um papel importante na determinação da redução das taxas de desgaste da ferramenta;
- Klamecki (1979) cita que Atack e Tabor (1958), Mackenzie e Karpovich (1968) desenvolveram pesquisas e afirmam que o contato dos extrativos da madeira com lubrificantes eficazes diminuem o coeficiente de atrito da madeira no deslizamento do aço.

Sales (1990) afirma que o desgaste do dente de serra durante o processo de serragem é um fenômeno complexo e que o teor de sílica e a densidade da madeira são características determinantes da abrasividade, mas outros aspectos da interação dependente devem ser abordados, tais como:

- A natureza da madeira (propriedades físicas e mecânicas);
- A ferramenta (forma geométrica e material constituinte);
- As condições de trabalho (velocidade de corte e de alimentação, altura do corte).

Os fenômenos físicos que propiciam um maior ou menor grau de desgaste também são divididos por sub-classes, como: a temperatura do dente em trabalho e a abrasividade da espécie. O desgaste resultante do atrito entre madeira e ferramenta tem por origem fenômenos mecânicos e físico-químicos.

A importância destes últimos depende muito da natureza da madeira processada e dos parâmetros de corte. Dentro das condições mais comuns de processamento da madeira tropical, e particularmente para as madeiras densas, os fenômenos de origem mecânica são preponderantes. As fibras comprimidas no comprimento do corte relaxam-se após seu corte e produzem atrito sobre a superfície de folga principal e as laterais. A ação do cavaco manifesta-se sobre a superfície de saída, sendo que a intensidade de atrito criado depende diretamente da resistência mecânica do cavaco, a qual aumenta com a espessura e densidade da madeira e diminui com o teor de umidade.

Um dente que inicia o corte em temperatura ambiente pode atingir uma temperatura de aresta bastante elevada no final do corte. A temperatura aumenta com a espessura do cavaco e com a altura de corte a serrar e pode ultrapassar 400°C. A perda de dureza da ferramenta por elevação da temperatura é um dos fatores que se agravam com o grau de abrasividade da

madeira.

O principal elemento causador de desgaste dos dentes é o óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) chamado de sílica. Esta se encontra na madeira sob forma de cristais que são mais duros que o aço, qualquer que seja a sua composição, e acarreta um micro-desgaste, toda vez que um grão de sílica entra em contato com o dente.

Gottlob e Ruffino (1995 apud SANTINI, 2000) compararam o desempenho dos materiais de ferramenta ABNT-01, AISI D6, AISI M4 e do metal duro. Para os testes foram usadas madeiras de *Pinus elliottii* e de *Eucalyptus grandis*. Os desgastes das ferramentas foram medidos com um projetor de perfis com ampliação de 50x, sendo levantadas as suas correspondentes curvas de desgaste em função do percurso de corte. Os resultados mostram que a usinagem de Eucalipto verde teve um maior desgaste das ferramentas. O aço ABNT-01 sempre apresentou um maior desgaste, mesmo temperado com a mesma dureza dos demais aços-ferramenta (58 a 59 Rc). Estima-se que este material de baixa liga tenha sido mais afetado pela corrosão do que pela abrasão. Todos os materiais obtiveram melhor desempenho no corte de *Pinus* seco. A ferramenta que mais se destacou foi o aço AISI D6, pois obteve desempenho equivalente ao AISI M4, mas possui a vantagem de ser mais barato. O metal duro (94% WC e 6% Co) é um material que apresentou melhor desempenho quanto ao desgaste, porém por ser extremamente duro, ele fragmenta com facilidade ao sofrer impacto com grãos de areia ou algum objeto metálico, além de possuir um custo mais alto. Neste estudo também pode-se concluir que é perfeitamente possível avaliar os desgastes das ferramentas considerando-se apenas os desgastes inerentes a cunha de corte ou o desgaste da aresta principal de ferramenta.

Gottlob (1996) contribui para o tema do desgaste com as citações relatadas na revisão bibliográfica abaixo, focando a vida útil das ferramentas de corte, como segue:

- Farmer (1962), tratando da corrosão dos metais em associação com a madeira, afirmou que a corrosão se dá de uma maneira intermediária entre a exposta à atmosfera e a imersão total num líquido. Para fins práticos, o valor do pH de aproximadamente 4,0 a 4,3 representa um limite, abaixo do qual a velocidade de corrosão do aço aumenta rapidamente em presença da umidade;
- McKenzie (1975) analisou o desgaste de uma ferramenta de corte de aço com 2% de C e 12% de Cr, simplesmente afiado e posteriormente polida, com velocidade de corte de 3,3m/s. Observou-se que o ângulo de folga é fundamental no controle do desgaste da ferramenta, sendo que quanto maior o ângulo de folga, maior o desgaste. O autor conclui que os ângulos de folga e saída não podem ser aumentados sem levar em consideração a

perda mais rápida da afiação da aresta de corte. Concluiu também que o polimento da superfície da ferramenta diminui bastante a velocidade do desgaste, especialmente da ponta da ferramenta;

- Hayashi (1983), investigou a relação entre a velocidade de corte e o desgaste da cunha de corte durante o processo de usinagem periférica de madeira seca. Usando o aço liga SKS-2 (1,1% C, 0,8% Mn, 1% Cr, 0,25% Ni, 1,5% W, 0,2% V, 0,25% Cu, 0,03% P, 0,035% Si), verificou que a dureza da cunha de corte diminui à medida que se aumenta a velocidade. As temperaturas estimadas de corte foram de 310°C a 45,2m/s e 200°C para 22,6m/s, mostrando que existe uma correlação entre a velocidade de corte e o aumento da temperatura. Foram realizadas micrografias nos aços utilizados através do uso de um microscópio de varredura, onde foi possível observar a superfície da ferramenta e o mecanismo de desgaste;
- Bayoumi, Bailey e Stewart (1983) compararam a resistência ao desgaste de varias classes de metais duro. Os ensaios demonstraram que a adição de cromo ao cobalto aumentou a resistência ao desgaste pelo aumento da resistência ao ataque químico.
- Sales (1985) realizou ensaios de desgastes de quatro materiais de ferramentas diferentes numa operação de aplainamento da madeira tropical com 5% de umidade e com 0,3% de conteúdo médio de sílica. Os materiais de ferramenta utilizados foram: aço comum (12-14% Cr, 0,6-0,8% C e com porcentagem de Ni, Mo, V, Co inferior a 1%), o aço rápido (0,8% C, 18,2% W, 1,2% V, 0,4% Mn, 0,3% Si, 0,7% Mo, 4,2% Cr), o *Stellite-1* (32-33% Cr, 12-14% W, 48-54% Co, 2,5% C, e menos que 2,5% de Fe) e o metal duro (90% WC, 10% Co), realizando a usinagem a uma velocidade de corte de 25 a 26m/s, velocidade de avanço de 30 m/min. e espessura de cavaco de 0,2mm;
- Stewart *et. al.* (1992) realizaram ensaios de desgastes em sete classes de aços rápidos, temperados em dois níveis de durezas diferentes para usinagem de chapa de fibra de alta densidade. Os resultados mostraram que os aços rápidos tipo M2, M42 e T15 obtiveram melhores condições de usinagem, sendo que o tipo M2 é a escolha mais econômica se for submetido ao tratamento térmico apropriado, além de resistir ao desgaste de forma igual ou um pouco superior na usinagem de madeira, do que os outros aços rápidos testados. Ele também tem resiliência relativamente elevada, para resistir aos impactos sucessivos durante o corte.

Tansel (2000) afirma que é possível estimar a condição da ferramenta com bastante precisão se as forças de corte e de avanço forem medidas nas mesmas condições de usinagem,

sugerindo que a distinção da relação linear entre força de corte e desgaste depende da dureza do material e das condições de corte.

Andersson; Ståhl; Hellbergh (2001) estudam o desgaste da ferramenta de corte e documentam que existe inicialmente uma combinação de desgaste por abrasão e por avaria do aresta de corte, afirmando que há uma redistribuição das forças de corte enquanto o desgaste prossegue, tendendo a equalizar os efeitos sobre as forças de corte.

A temperatura é um fator importante no controle do desgaste da aresta do dente, já que as propriedades do aço da ferramenta mudam radicalmente a elevadas temperaturas (NORDSTRÖM; BERGSTRÖM, 2001).

Sheikh-Ahmad; Bailey (1999 apud NORDSTRÖM; BERGSTRÖM, 2001) usam um torno de alta velocidade para estudar o desgaste de ferramentas de carbeto de tungstênio no corte de placas particuladas com velocidade de corte entre 26 – 49 m/s.

Nordström; Bergström (2001) citam que outro fator importante para o desgaste do dente da serra é a profundidade de ataque deste, já que as tensões na aresta de corte aumentam com o aumento da penetração.

A natureza química da madeira pode desempenhar um papel importante na determinação da redução das taxas de desgaste da ferramenta, afirma Lehmann (2010). Para descrever adequadamente os mecanismos de desgaste, todas as interações da ferramenta de trabalho devem ser consideradas. O trabalho de um dente de serra é severo, os tipos de impacto da madeira a velocidade de cerca de 50m/s e a temperatura na superfície de uma ponta foram medidos a 700 °C. O mecanismo de desgaste para cada material utilizado no aresta de corte é diferente.

Segundo Lehmann (2010) existem dois mecanismos de desgaste o abrasivo e o químico. O desgaste abrasivo é resultante do cavaco (pó de serra) que flui através do ângulo de saída e sai pela parte posterior do dente. O desgaste químico resulta da reação de água e outras substâncias químicas na madeira.

Trugilho (2002) avalia o desgaste químico provocado pela madeira sobre as lâminas de aço comumente usadas na fabricação de serras e/ou ferramentas de corte. Para o estudo foram utilizados dois tipos de aço (1070 e 6170) e 27 espécies diferentes de Eucalpto. Existe grande variação no desgaste químico devido ao efeito da espécie. O aço 1070 foi mais susceptível à corrosão que o aço 6170. A corrosão foi mais evidente à medida que aumentou o tempo de reação para todas as espécies pesquisadas, tendo sido mais intensa no início do ensaio. As substâncias fenólicas (taninos), principal fração da madeira solúvel em etanol, é o principal responsável pela corrosão química em metais, diferentemente das gomas, resinas, óleos,

gorduras, ceras, graxas, carboidratos de baixo peso molecular, etc., os quais são solúveis em tolueno e não provocam desgaste químico em metais.

Krilov; Greff (1986 apud GOTTLÖB, 1996) apresentaram um estudo do mecanismo de corrosão de uma serra por compostos polifenólicos. Os ácidos gálico, digálico e egálico são exemplos típicos de polifenóis contidos na madeira e são encontrados em quantidades apreciáveis de muitos Eucaliptos. Esse estudo mostra que o efeito conjugado de corrosão química e abrasão do aço de uma serra é maior do que era considerado até então.

Hillis; McKenzie (1964) pesquisaram o ataque químico nas facas de corte da madeira, mostrando que a corrosão química é um dos fatores de desgaste da ferramenta. Os ácidos orgânicos e polifenóis são os principais agentes corrosivos encontrados na madeira.

### **2.5.2 Aspectos da Vibração da Ferramenta de corte**

Yang; Mote Jr. (1990) afirmam que a vibração transversal excessiva de uma serra de fita causa baixa precisão de corte e perda na qualidade superficial, desperdício de matéria-prima, trinca na garganta, aumento no tempo parado e elevado nível de ruído. A serra de fita é um sistema mecânico flexível com um número infinito de modos de vibração. Concluem os autores que todos os tipos de vibração podem ser estabilizados.

More (1965 apud ULSOY; MOTE; SZYMANI, 1978) citam que as primeiras análises do problema da vibração da serra de fita consideravam a lâmina como uma viga com movimento axial.

Breznjak e Moen (1972 apud ULSOY; MOTE; SZYMANI, 1978) observaram durante experimentos de serramento que a variação da espessura da madeira, o consumo de energia e a perda no corte aumentavam com o aumento da amplitude da vibração; a vibração lateral aumenta com o aumento na folga entre as lâminas e as guias e com o aumento da velocidade de alimentação e que a qualidade da superfície melhora com o aumento da vibração de alta frequência devido a um efeito de polimento.

Ulsoy; Mote; Szymani (1978) comentam que se o objetivo da produção é espessura mínima de corte e alta precisão de serramento, a dinâmica do sistema de serramento deve ser considerada, pois segundo estes, as perdas no corte podem ser reduzidas com o emprego de lâminas mais finas contanto que a vibração desta seja controlada e sua estabilidade mantida. Os autores relatam também que a técnica mais antiga e mais utilizada para a redução e controle de vibração é a modificação da tensão na lâmina por tração.

Gendraud; Roux; Bergheau (2003) relatam que as frequências naturais da ferramenta de corte sempre aumentam com a tração desta, o que é facilmente explicado pelo ganho de rigidez quando a deformação é mais alta.

Lehmann (2005) conclui que a frequência natural é um pouco menor do que os múltiplos da frequência de impacto do dente. Essa derivação foi consistente com o resultado de seus experimentos quando a ondulação ocorreu sobre a madeira.

Sinn *et. al* (2005) estudaram a aplicação de vibrações ultrassônicas em ferramentas de corte em dois casos básicos: vibração longitudinal (vibração na direção de corte) e vibração lateral (vibração normal à direção de corte). O corte com ultrassom resultou em forças de corte mais baixas e melhor qualidade das superfícies serradas em comparação com o corte convencional. Concluem os autores que o uso de vibrações ultrassônicas na ferramenta de corte reduzem significativamente as forças de corte.

### **2.5.3 Ondulação do corte e corrugações na madeira**

O termo *washboarding* (corrugações) é usado para descrever um padrão regular de formato senoidal que, às vezes, ocorre na superfície serrada da madeira (ZHU *et. al*, 2001).

Zhu *et. al* (2001) ensinam que a corrugação é um problema comum na indústria madeireira e é indesejável porque a madeira serrada deve ser mais espessa do que o normal para permitir que a plaina produza superfícies mais limpas, sem faltas de madeira devido a estas imperfeições do desdobro primário. Os autores afirmam que a maioria dos estudos investiga as causas e os efeitos das ondulações considerando as frequências de passagem dos dentes, frequências naturais e as forças de corte laterais.

Hutton; Luo (2003) demonstraram com uma serra de fita larga que grandes mudanças na profundidade do corte por dente, velocidade da lâmina e deformação da serra tiveram pequeno efeito sobre a ondulação da serra.

Lehman (2005) discorre que nas serras de fita, as ondulações avançam para baixo na direção do movimento da lâmina conforme a madeira avança na serra e que o processo de cortar num flanco e depois noutro gera a força de oscilação lateral que causa as corrugações. A frequência destas oscilações é menor do que 20 Hz. Cita ainda o autor que esse fenômeno inicia-se a uma polegada do início do corte e cobre toda a profundidade do corte e que as zonas de ondulação começam quando a frequência natural e a frequência de impacto do dente são iguais e continuam para uma faixa estreita da velocidade do volante. Esse fenômeno está



relacionado a frequência de impacto do aresta de corte no serramento e que o corte pelo flanco do dente aparentemente está envolvido na formação das corrugações.

A discussão acerca das teorias sobre tais corrugações e suas causas trouxe provas inegáveis de que a variação obtida no corte em serras de fita verticais é consequência de vibrações laterais forçadas da serra e da regeneração retardada de ondas (ORLOWSKI; WASIELEWSKI, 2005).

Thaler; Krese; Gokevar (2015) analisaram a estabilidade do processo pelos parâmetros definidos pela velocidade de corte, velocidade de alimentação e a altura de corte. Os resultados mostram que a velocidade de corte é o parâmetro de processo que mais influencia e afeta a qualidade do produto serrado.

Sinn (2005) cita que uma técnica promissora para melhorar os processos de corte é o corte assistido por ultra-som. Com esta técnica, a ferramenta de corte é estimulada com vibrações de frequências de 20 Hz com influências benéficas sobre o processo de corte. Um efeito do ultrassom é a redução das forças de corte em comparação com os processos convencionais afirma o autor.

#### **2.5.4 Modelagens e controle da operação de serramento**

Ulsoy; Mote Jr.; Szymani (1978) citam que diversos métodos aproximados de análise das frequências naturais das serras de fita e resposta destas foram desenvolvidos. Os autores incluem em sua revisão bibliográfica o método de Galerkin (1965), de elementos finitos de Anderson (1974) e as séries de Fourier trabalhadas por Chubachi (1958).

Ulsoy; Mote (1978 apud GENDRAUD; ROUX; BERGHEAU, 2003) demonstraram que uma distribuição parabólica da tensão axial com seu mínimo no centro da fita aumenta a frequência de torção primária e diminui um pouco a frequência transversal primária.

Butkovskiy (1983 apud YANG; MOTE Jr., 1990) apresenta uma lei de controle da resposta e a dinâmica dos dispositivos de atuação e sensoriamento elaborando para isso uma função de transferência de um sistema em ciclo fechado representando uma serra de fita. O objetivo de controle é formulado no domínio da frequência usando a transformada de Laplace<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> O método da Transformada de Laplace é uma ferramenta que proporciona a solução de equações diferenciais lineares com coeficientes constantes, de maneira sistemática e relativamente simples. Fonte: [http://www.professores.deq.ufscar.br/ronaldo/cp1/pdf/aula\\_laplace.pdf](http://www.professores.deq.ufscar.br/ronaldo/cp1/pdf/aula_laplace.pdf)

Mote Jr.; Wu (1985) utilizaram da teoria de vigas de Euler-Bernoulli<sup>12</sup> aplicando-a a serra de fita. Assumindo como hipótese inicial um leve contato desta com os volantes, eliminam a carga de tração da fita, excitando-a. Concluem que para se entender e modelar as vibrações da fita na face primária (plano de corte) deve-se levar em consideração as vibrações secundárias (plano oposto ao ponto de corte) e que o modelo não pode ser dissociado de todo o conjunto, incluindo a resposta do volante. O aparato experimental usado para examinar o fenômeno de empregou uma serra de fita comercial e o estímulo aplicado à fita foi fornecido por um eletroímã durante os testes de ressonância e por um martelo de impacto durante as análises modais. O movimento transversal de cada extensão da fita foi monitorado por um transdutor e as frequências de vibração das duas extensões foram essencialmente idênticas.

Yang; Mote Jr. (1990) constatam que todas as vibrações podem ser observadas e controladas e que a estabilidade do sistema é determinada a partir da plotagem da frequência do controlador aplicando-a ao sistema de corte. Os autores afirmam que a controlabilidade e observabilidade da serra de fita são propriedades essenciais para qualquer projeto de controle ativo/passivo de vibração. A controlabilidade da serra de fita requer que haja uma distribuição da força de controle pelos atuadores para suprimir ou gerar os modos de vibração de interesse da forma desejada. A observabilidade requer que quaisquer perturbações iniciais nos modos de vibração analisados sejam identificados pelos sensores em um tempo finito. Estas vibrações da serra podem ser controladas e observadas por apenas um atuador e um sensor.

Ko; Kim (1998) trabalharam no desenvolvimento de um modelo mecanicista de força de corte com serra de fita, utilizando para isso o perfil de cada dente de serra de determinado jogo de ferramentas. Usaram as forças de corte em uma ferramenta de uma aresta para desenvolver esse modelo de pressão de corte.

Meltzer; Ivanov (1998) utilizaram um método para monitorar a distribuição de frequência das vibrações transientes não estacionárias que aparecem no processamento da madeira ou derivados destas (painéis particulados) presentes na ferramenta de corte. Os autores desenvolveram dois algoritmos que reconhecem o estado momentâneo do desgaste da ferramenta. Esse estudo foi feito em serras circulares, onde cada ferramenta pode ser monitorada independentemente, descrevendo seu nível de desgaste de forma independente.

---

<sup>12</sup> A teoria de vigas de Euler Bernoulli apresenta as seguintes hipóteses : A) Os deslocamentos verticais de todos os pontos de uma mesma seção transversal são pequenos e iguais ao eixo da viga; B) O deslocamento lateral (segundo o eixoy) é nulo; C) As seções transversais normais ao eixo da viga antes da deformação, permanecem planas e ortogonais ao eixo após a deformação ( NASCIMENTO, 2004).

Tansel *et. al* (1999) citam o uso de redes neurais de retropropagação para a estimativa do desgaste da ferramenta. Os autores afirmam que a retropropagação é a rede neural mais conhecida e comumente usada e que estas foram desenvolvidas para desempenhar tarefas de classificação eficientemente depois de uma sessão de auto conhecimento da rede sem programação. Dois métodos diferentes de codificação foram usados de forma a estimar o desgaste da ferramenta a partir das forças de corte com o emprego de redes neurais retroalimentadas. O primeiro foi a codificação baseada na variação da força e o segundo a codificação baseada na média segmentar.

Le-Ngoc; McCallion (1999) geraram em laboratório o fenômeno das corrugações no corte da madeira aplicando uma carga tangencial uniformemente distribuída à lâmina da serra, juntamente com as tensões axiais e de cisalhamento decorrentes dos esforços de corte. Verificou-se que todo o ciclo de corte associado ao giro da ferramenta deve ser utilizado para determinar as características de vibração. Ensaios anteriores focavam em utilizar a secção entre as guias e o volante superior.

Tansel *et. al* (2000) afirmam que sinais da força de corte têm mais informação do que os sinais de emissão acústica, entretanto, a estimativa do desgaste é mais difícil se as condições de corte variam nesse processo de captação de dados. Os autores desenvolvem técnicas de monitoramento do desgaste para codificar e interpretar os sinais de força de corte, vibrações, som, emissão acústica e outros sinais diversos. Na maioria das vezes, a força de corte é a fonte de informação mais confiável para estimar o desgaste da ferramenta de corte.

Nordström; Bergström (2001) afirmam que é vital compreender que cada sistema tribológico<sup>13</sup> é único e que uma pequena mudança nos parâmetros do sistema pode levar a mudanças radicais tanto na taxa de desgaste quanto no mecanismo deste.

Zhu *et. al* (2001) concluem que para se fazer uma detecção automática das ondulações após uma mudança de parâmetros de corte e de produção se torna complicado, pois a mudança da espécie de madeira e da tração na lâmina da serra de fita afetam a aparência da ondulação. Para essa detecção amplifica-se os sinais das células de carga e transfere para dois canais de um analisador de espectros (análise por transformada rápida de Fourier<sup>14</sup>) e um computador pessoal.

---

<sup>13</sup> Tribologia é a ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo entre si e assuntos e práticas a ela relacionadas. Fonte : <http://disciplinas.stoa.usp.br>

<sup>14</sup> As Séries de Fourier permitem representar muitas funções periódicas como um somatório infinito de exponenciais complexas. Fonte : [www.dm.ufscar.br/dm/attachments/article/6/Josiana.pdf](http://www.dm.ufscar.br/dm/attachments/article/6/Josiana.pdf)

Hutton (2003) desenvolve um modelo numérico que leva em consideração o contato entre a serra de fita e as superfícies serradas e a representação das forças em termos de funções de movimento browniano<sup>15</sup>. Este modelo do sistema de serramento consiste do modelo da lâmina, das forças laterais que agem na ponta do dente e das forças que ocorrem quando o corpo da lâmina entra em contato com a superfície serrada.

Gendraud; Roux; Bergheau (2003) modelaram a fita como uma placa rígida em vez de uma viga, de forma a se aproximar das condições reais de trabalho das máquinas, pois as serras de fita na indústria madeireira são na maioria largas.

Os autores apresentaram em seu estudo do modelo de fitas largas a equação do movimento destas. O conhecimento do estado de tensão da fita é importante tanto para estudar a durabilidade desta quanto para se considerar esse parâmetro na simulação do comportamento dinâmico da mesma.

Lehmann (2005) discorre que sabendo-se como a madeira e a lâmina interagem e as variáveis que capturam o comportamento de uma serra de fita é possível entender como o projeto da lâmina e as propriedades da madeira afetam a precisão de corte. Apresenta uma equação que relaciona a frequência da lâmina da serra de fita, a frequência de passagem do dente e a frequência da ondulação que gera o fenômeno da corrugação na madeira serrada.

Teti *et al* (2010) descrevem que as técnicas de monitoramento e medições para o controle das operações de usinagem têm sido tradicionalmente classificadas em duas abordagens: diretas e indiretas.

Na abordagem direta a quantidade real da variável, por exemplo, desgaste da ferramenta, é medido. Exemplos de medição direta neste caso são o uso de câmeras para inspeção visual, isótopos radioativos, raios laser e resistência elétrica. Muitos métodos directos só podem ser usado como técnicas de laboratório. Isto é principalmente devido às limitações de funcionamento causadas por problemas de acesso durante a usinagem, a iluminação e ao uso de fluido de corte. No entanto, a medição direta tem um alto grau de precisão e tem sido utilizada amplamente em laboratórios de pesquisa para apoiar as investigações de fenômenos fundamentais durante os processos de usinagem.

Através de abordagens de medição indiretos, quantidades auxiliares, tais como os componentes da força de corte podem ser medidos. A quantidade real é posteriormente deduzida através de correlações empiricamente determinadas. Métodos indiretos são menos

---

<sup>15</sup> O movimento browniano pode ser definido como um movimento aleatório de partículas microscópicas imersas em fluido. Fonte : <http://web.if.usp.br/>

precisos do que os diretos, mas também são menos complexos e mais adequados para aplicações práticas (TETI *et al*, 2010).

Gehring Junior et al (2014) apresentam uma série de dados de tendência de deflexão de ferramenta de corte obtidos durante um processo real de produção. Tais dados foram obtidos em uma serraria fazendo uso de sensores conectados a um microcontrolador. No mesmo artigo os autores propõem a investigação do significado dos dados captados por meio de ensaios em laboratório.

Lehmann (2016) cita haver pesquisas que usam o monitoramento do desvio das serras como forma de controle do processo. Relativo as pesquisas, cita o autor que existem fatores que ocasionam a deflexão da serra e são conhecidas e estes fatores impactam na vibração e na deflexão da serra. Os fatores que impactam a estabilidade do corte no serramento por serra de fita e influem nesta são:

- As forças de corte agindo na serra ( tangencial, lateral e de alimentação);
- A força de reação da serra ao tocar a superfície serrada;
- As forças ocasionadas pelo pó de serra escoando pelos dentes da serra;
- Os efeitos da rigidez da serra ao resistir às forças agindo na serra;
- Os efeitos do aquecimento na rigidez da serra;
- Os efeitos da guia na serra;
- Os efeitos da anisotropia da madeira e a presença de silicas na constituição desta;
- Os efeitos da presença de nós;
- Os efeitos das falhas da afiação na serra, avarias e desgastes;
- Os efeitos do desalinhamento entre a serra e o sistema de alimentação de toras;
- Os efeitos da não estabilização da tora na alimentação do processo.

Cita o autor que cada serraria tem sua própria característica a qual pode ou não produzir defeitos. O importante é conhecer dentre as causas acima qual destas pode estar inferindo em perdas de qualidade, conversão e produtividade. Os benefícios do monitoramento da serra que serão desenvolvidos terão tanta contribuição como monitorar vibração dos rolamentos, incluindo tendências, limites de aceitação e manutenção preditiva, além da diagnose de problemas. Afirma Lehmann (2016) que muito trabalho tem que ser feito no campo do monitoramento de serras de fita, mas que a tecnologia do sensoriamento e a metodologia de captação dos dados já existe.

## 2.6 ARDUINO

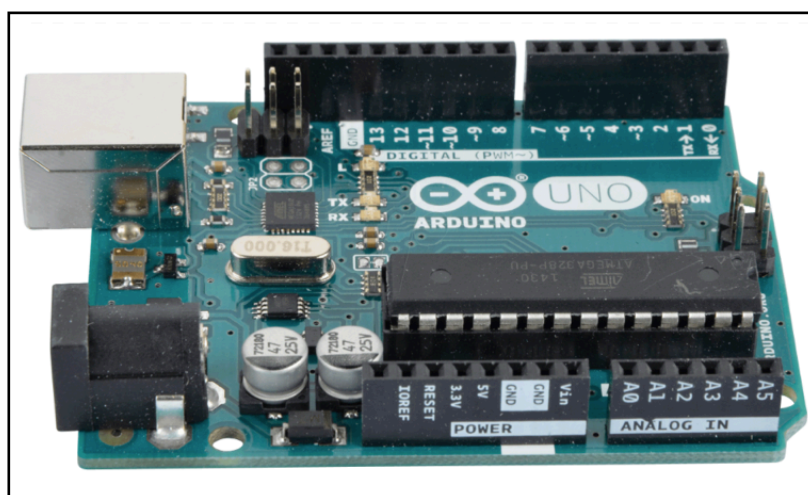
Banzi; Shiloh (2015) definem o Arduino como uma plataforma de computação física de fonte aberta para a criação de objetos interativos independentes ou em colaboração com computador.

Tanto o *hardware* como o *software* do arduino são de fonte aberta. Isso significa que em seu conceito o compartilhamento do conhecimento é feito generosamente. Assim, o software do Arduino, conhecido como *Integrated Development Enviroment* (IDE) é gratuito e está disponível no site: [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc).

O Arduino é um microcontrolador de placa única projetado para tornar mais acessível o processo de utilização da eletrônica em projetos multidisciplinares, ou seja, Arduino é um computador minúsculo que você pode programar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos que conectar a ele (McROBERTS, 2015).

Na figura 27 é apresentado a estrutura do microcontrolador Arduino Uno.

Figura 27 - Arduino Uno



Fonte : [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

Kolcenti et al (2014) sugerem em seu artigo que o desenvolvimento sustentável se faz pelo uso de tecnologias de acesso aberto e pelo desenvolvimento de soluções por meio do uso de sensores e automação nesse contexto. O Arduino enquanto plataforma de projeto e sistemas dedicados, pelo seu conceito, se apresenta como a melhor ferramenta para soluções sustentáveis que envolvam captação de dados, afirmam os autores.

Destacam outras aplicações sustentáveis com o Arduino, os artigos apresentados por Souza et al (2011) e Teruel (2010). Dentre os inúmeros projetos que se pode conceber utilizando o Arduino, McRoberts (2015) apresenta alguns como gerar efeitos com LEDs, atuar sonorizadores e captar dados de sensores simples, controlar um motor de corrente contínua, fazer uso de controladores de entradas/saídas e displays de cristal líquido como de LED. Cita ainda a possibilidade de trabalhar com servomecanismos e motores de passo, sensores de pressão, telas de toque, sensores de temperatura e telômetros ultrassônicos. Afirma o autor que a escrita em um cartão SD é simples assim como a comunicação via Ethernet, o que abre a possibilidade de numerosas aplicações com o sistema de fonte aberta.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

Um protótipo foi feito em laboratório para captação de dados de deflexão de serras de fita contínua. Utilizou-se para a captação de dados um microcontrolador Arduino. No Anexo A está apresentado o *software* desenvolvido e utilizado para a captação dos dados.

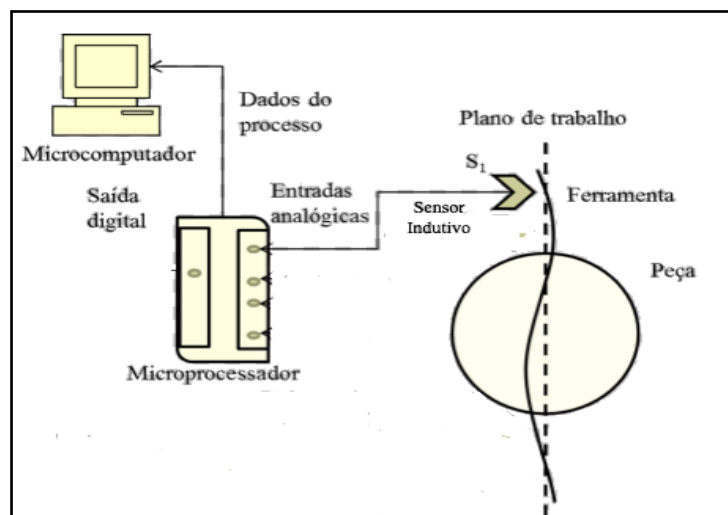
O *software* foi validado em ambiente de laboratório inicialmente. Na segunda etapa, toda a instrumentação desenvolvida foi montada nos equipamentos de uma indústria madeireira e tomado dados durante dois dias completos de produção, após isso foram efetuados novos ensaios em laboratórios.

#### 3.1 INSTRUMENTAÇÃO

O desenvolvimento do *hardware* ocorreu em etapas, como segue : após a fase experimental de teste de funcionamento do *software* e validação deste iniciou-se a fabricação e integração funcional de todos os demais dispositivos para captação dos dados.

Os dados captados nos testes foram registrados em um cartão de memória e transferidos para um computador pessoal. Foi possível ter acesso a esses dados em formato de texto (.txt) gravado no cartão de memória. Utilizou-se um cartão de memória do tipo micro SD para todos os experimentos realizados. Um controlador foi construído em escala real e adaptado ao uso em uma serraria de grande porte. O sistema de controle utilizado pode ser exemplificado por meio da modelagem dinâmica demonstrada na Figura 28.

Figura 28 - Modelagem dinâmica e controle de manipuladores para deflexão elástica da serra de fitas em relação ao plano de corte no processo de serragem





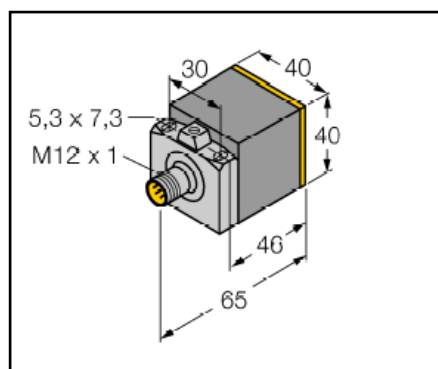
Fonte : o autor.

O processador utilizado no microcomputador foi Intel® Core™ 2 Duo de 3,5 MHz com 4 GB de memória RAM DDR3 e 320 GB de disco rígido.

No Anexo A está descrito os algoritmos que foram gravados diretamente na EEPROM<sup>16</sup> do microprocessador, de forma que o microcomputador foi utilizado somente para tornar as interfaces mais amigáveis e facilitar a análise dos dados. A transmissão de dados entre os sistemas foi realizada através de uma placa de acesso *ethernet*<sup>17</sup> conectada ao microprocessador. O microcontrolador usado foi o Arduino UNO, o qual recebeu os sinais dos sensores conforme a modelagem apresentada na Figura 33.

Foi utilizado um sensor de distância do tipo indutivo<sup>18</sup>. O modelo utilizado foi Turck® Ni25-CK40-LIU-H114. Estes sensores operam em 15-30V e amplitude de medida na faixa de 5 a 25 mm, com as dimensões mostradas na Figura 29.

Figura 29 - Sensor Indutivo - dimensões básicas [mm]



Fonte: TURCK (2016).

Para a montagem do sensor foi desenvolvido um suporte que foi adaptado ao chassi da serra de fita. Antes do início do uso do sistema, houve uma etapa de pré montagem onde foi acoplado o sensor ao suporte o qual recebeu também o sistema de guias de pressão utilizado na serraria. Na Figura 30 é apresentado o conjunto suporte da guia de pressão e a chapa furada que recebeu o sensor.

<sup>16</sup> EEPROM - É um tipo de memória que contém instruções imutáveis, nela estão localizadas rotinas que inicializam o computador quando este é ligado; É não-volátil, ou seja, os dados não são perdidos com a ausência de energia; É também de acesso aleatório (<http://www.ime.usp.br/~wesley/memoria.htm>).

<sup>17</sup> *Ethernet* é uma arquitetura de interconexão de placas locais, ou simplesmente uma rede local.

<sup>18</sup> Sensores indutivos são sensores que executam uma comutação eletrônica quando um objeto metálico invade seu campo eletromagnético, causando a mudança de seu estado lógico ([www.weg.net](http://www.weg.net)).

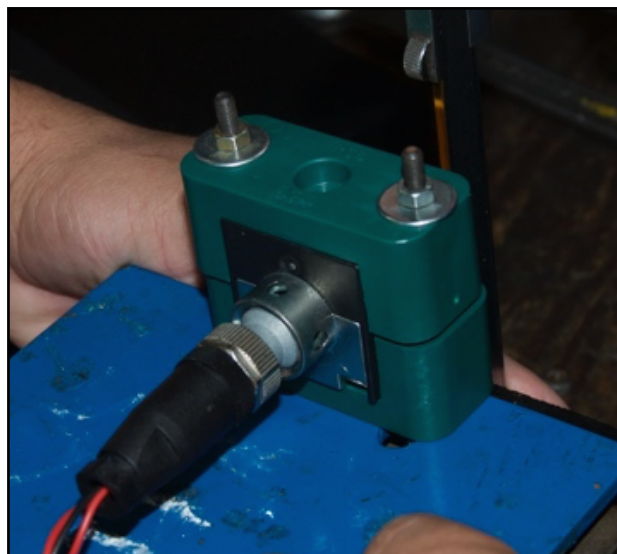
Figura 30 - Conjunto da guia de pressão completo e o suporte para o sensor adaptado



Fonte : o autor

Após essa pré montagem, foi instalado o sensor indutivo sobre o conjunto da guia pressão. Observa-se que o furo oblongo permite a regulagem da distância entre o sensor e a serra de fita. Na Figura 31 é possível observar a montagem do sensor sobre o conjunto de fixação da guia de pressão na máquina de serra de fita.

Figura 31 - Sensor indutivo montado no suporte da guia de pressão



Fonte : O autor.

No Quadro 11 é apresentado especificações técnicas do sensor utilizado para a captação das informações de referência do posicionamento da serra.

Quadro 11 - Especificações técnicas do sensor indutivo

distância de medição	5 a 25 mm
condições de montagem	a seco
repetibilidade	$\leq 1\%$ da distância de medição
reprodutibilidade	$\leq 200\ \mu$
temperatura de trabalho	- 25 a + 70 °C
tensão de operação	15 a 30 V CC
tensão de saída analógica	0 a 10 V CC

Fonte : adaptado de TURCK (2016).

### 3.2 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Ao todo foram executados seis ensaios entre ambiente industrial e laboratório. Os experimentos realizados no decorrer do presente trabalho, o tipo de teste, a data, o local, a quantidade de dados obtida, duração e produtos resultantes do experimento são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos testes realizados e dados obtidos

ambiente	ensaio	data	local	freq. [ms]	dados	equipamento
industrial	1A	30 set. 2013	Produção	20	705000	G1
industrial	1B	30 set. 2013	Produção	20	699000	G1
industrial	2A	13 nov. 2013	Produção	20	726000	G3
industrial	2B	13 nov. 2013	Produção	20	639000	G3
laboratório	3	3 nov. 2014	UNESP	20	81000	resserra
laboratório	4	4 nov. 2014	UNESP	20	84000	resserra
laboratório	5	13 nov. 2014	UNESP	20	90000	resserra
laboratório	6	20 fev. 2015	UNESP	20	90000	resserra

Fonte: o autor.

A frequência de captação de dados foi de 20 ms. No momento da captura uma distância fixa foi registrada como a real posição de flexão lateral da serra.

A quantidade de dados captados variou de 81.000 a 726.000 dados por ensaio. O número ordinário descrito na segunda coluna da Tabela 1 apresenta a ordem do teste e a letra A e B o período da produção, manhã e tarde respectivamente.

G1 e G3 significa o nome do equipamento seguindo um código adotado pela empresa. A letra G significa geminada pois trata-se de uma serra de fita geminada. O número 1 e 3 significam a ordem da operação de serramento efetuada por tal máquina. Assim, G1 é o primeiro conjunto de serra de fita vertical geminada que realiza o desdobro primário da tora, por exemplo.

Após cada sequência de teste executado, conforme descrito na Tabela 1, os registros captados no formato texto foram transferidos para um microcomputador e transformados em arquivos em formato de planilha eletrônica. Os arquivos texto gravados nos cartões em 8 horas de produção foram de no máximo 500 KB.

Na Figura 32 é possível ser vista a saída de um conjunto de serras de fita geminada serrando a segunda constaneira, transformado a tora descascada em um semi-bloco retangular.

Figura 32 - Equipamento Serra de Fita Geminada do ambiente industrial



Fonte : o autor.

Em ambos ambientes de ensaio a marca e as características da lâmina de serra utilizada foram as mesmas, embora tais serras possuam dimensões (largura) e aresta principal de corte diferentes entre si. Essa lâmina de serra é produzida com aço de alto carbono, relaminado temperado e revenido.

#### Ensaio em ambiente industrial

A primeira etapa de ensaios em ambiente industrial ocorreu em dois dias distintos de produção, em uma indústria madeireira de grande porte.

A indústria em questão fica situada no Sudoeste do Estado de São Paulo e processa aproximadamente 10.000 m<sup>3</sup> de toras de *Pinus spp* ao mês.

As informações captadas e utilizadas neste trabalho representam o histórico completo do fenômeno de oscilação de quatro serras ao longo de dois dias de trabalho no ambiente industrial. Tais registros estão disponíveis na Tabela 2 onde também foi descrita a quantidade de serras utilizadas no citado período de produção.

Tabela 2 - Dados referentes a produção para o experimento realizado na indústria

Parâmetro	unidade	ensaios na indústria / turno			
		1A	1B	2A	2B
duração dos testes	[horas]	3h55	3h53	4h02	3h33
tempo total de paradas	[horas]	0h42	0h53	0h30	1h47
comprimento médio das toras	[mm]	3080	3080	3090	3080
diâmetro médio toras	[mm]	215	211	217	206
toras processadas < 210 mm	unidade	469	668	507	716
toras processadas de 210 a 250 mm	unidade	802	576	941	582
toras processadas > 250 mm	unidade	24	21	37	24
total de toras processadas	unidade	1295	1265	1485	1322
volume físico serrado	[m <sup>3</sup> ]	165	123	130	118
serras utilizadas	unidade	1	1	1	1
comprimento efetivo de corte	[m]	3988	3896	4588	4071

Fonte : o autor.

Na Tabela 2 estão as informações do ensaio como tempo de duração, parada (*down time*), diâmetro médio das toras utilizadas, comprimento das toras, total de toras processadas por classe diamétrica, volume físico serrado e comprimento total de corte efetivo para cada serra. Essas informações foram coletados durante o processo de serramento da madeira por sistemas automatizados existentes na empresa como por exemplo, o *software* que controla o digitalizador de imagens e gera registros de produção. Esses registros ficam arquivados e podem ser acessados de acordo com padrões do sistema de gestão de documentos da indústria.

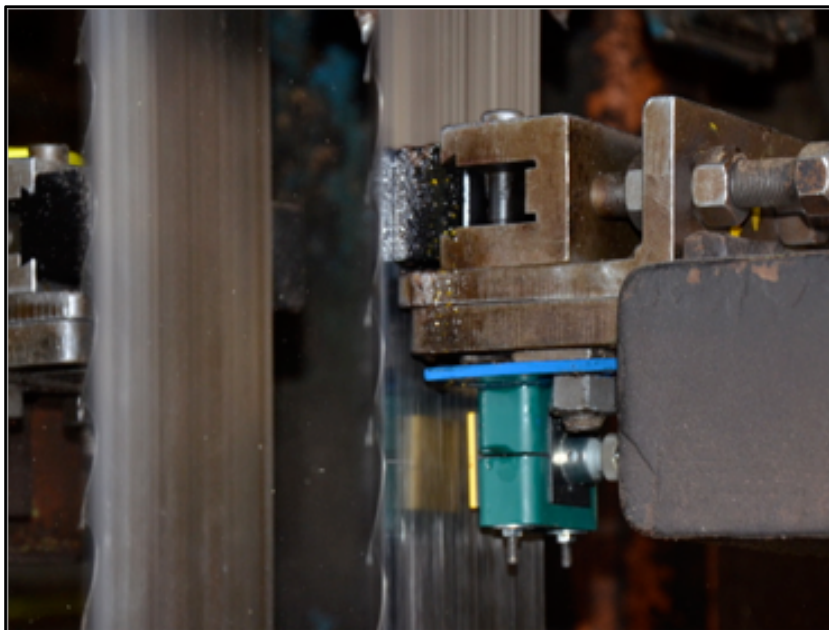
A máquina utilizada para a experimentação foi uma serra de fita geminada vertical marca “Schiffer” de diâmetro de volante igual a 1,35 m. Esse equipamento utiliza motores elétricos de 75 hp em cada máquina (esquerda e direita). A rotação de trabalho é de 1185 rpm. A empresa possui nos equipamentos inversores de frequência que permitem modificar a rotação do motor, conseqüentemente a velocidade de corte.

O sistema de transmissão de potência do motor aos volantes é feito por um conjunto de correias em V.

Na Figura 33 pode ser visto o conjunto de serras montadas e no detalhe a guia de pressão do equipamento e o sensor indutivo acoplado a mesma, na parte inferior para a captação dos dados objetivo do presente ensaio.

Observa-se que existe um contato entre a guia de pressão e a serra em movimento e uma folga entre a serra e o sensor.

Figura 33 - Serra de fita vertical geminada, guia de pressão e sensor montados



fonte : o autor.

As serras de fita utilizadas, tanto nos experimentos um como no experimento dois da indústria, são equipadas com sistemas de guias de pressão, as quais foram reguladas com uma interferência de 10 mm sobre a linha de tangência das faces dos volantes, conforme visto na Figura 15.

As ferramentas utilizadas são com a aplicação do material *Stellite* na aresta principal de corte. Estas foram preparadas conforme os preceitos utilizados na indústria as quais são relatadas em diversos manuais de afiadores.

Toda serra fita que retorna a laminação é limpa e verificada quanto a trincas ou avarias, bem como é feito uma checagem da laminação por meio da colocação de uma régua de luz na parte traseira da serra.

Se constatado a necessidade de laminar, o afiador aplica a tensão de laminação por meio de rolos laminadores e encaminha a serra para o processo de retificação do dente (afiação). Se for constatado perda de algum dente da aresta principal de corte, é feito a fusão de um novo dente de stellite e sua retificação lateral.

Se não for necessário colocar um novo dente e a serra ainda tiver a possibilidade de continuar com o mesmo dente aplicado, será reafiada e colocada no varal para entrar em produção.

Na Figura 34 é mostrada a serra de fita sendo afiada em seus parâmetros de projeto do dente, conforme valores citados no Quadro 15.

Figura 34 - Afiadora de lâminas de serra de fita



Fonte: o autor.

A necessidade de uma nova aplicação de *Stellite* na aresta de corte da ferramenta está relacionada a sua folga lateral. Para o corte de madeiras macias, faz-se a ferramenta com uma folga lateral inicial de 1,1 mm aproximadamente.

Com sequentes afiações, a folga lateral diminui, gerando uma ferramenta com a espessura de corte menor e incapaz de efetuar com exatidão o trabalho. Esse limite varia até próximo a 0,65 mm.

Uma ferramenta com aplicação de *Stellite* permite até um total de 40 afiações. Para isso recomenda-se retirar a cada retificação no máximo 0,05 mm de material. No caso do experimento as ferramentas novas possuem 3,7 mm de espessura e o final da vida útil se dá quando esta atinge 2,8 mm de espessura (*kerf*). Nesse momento a ferramenta deverá ser retificada por inteiro até sair todo o material depositado no aresta de corte, ficando a serra de fita no material base. A partir disso se aplica uma nova ponta de *Stellite* e se inicia um processo de retifica lateral e afiação.

Um jogo de ferramentas permite até 5 trocas completas de *Stellite*, dependendo da qualidade do sistema de afiação (precisão dos equipamentos de afiação) e da capacidade técnica do afiador em trabalhar com conceitos de mecânica fina no ambiente fabril.

Na Figura 35 observa-se o procedimento de controle para verificar se a ferramenta contém material de deposição suficiente para gerar estabilidade no processo e se a mesma ainda pode ser utilizada.



Figura 35 - Dispositivo para medição da altura e simetria do dente



Fonte: o autor.

Esse controle metrológico é feito por meio um dispositivo especial que mede a altura do aresta de corte (folga lateral) em leitura direta do relógio apalpador. Outra função possível com esse equipamento é controlar, além da espessura de corte, a simetria da folga lateral do dente relativo a serra.

Se um flanco do dente estiver maior que outro a ferramenta tenderá a puxar de lado e perder precisão do corte. Para isso é utilizado um calibrador especialmente projetado para esse fim. Os valores encontrados estão registrados no Quadro 15.

Para medir o passo do dente utilizou-se paquímetros universais mecânicos. Os valores encontrados foram registrados no Quadro 15. Para controlar os ângulos da ferramenta de corte utilizou-se um goniômetro calibrado do departamento de controle da qualidade da empresa onde foram feitos os ensaios.

A tensão de tracionamento da lâmina é responsável pela estabilização da serra e a consequente acuracidade no corte. Para isso, as serras de fita possuem sistemas para tracionar as fitas e a manterem estabilizadas sobre o volante.

No procedimento de teste feito na indústria, os equipamentos utilizam um macaco hidráulico que faz a movimentação do eixo superior e imprimem a esta uma força de tração responsável pelo tracionamento da lâmina.

Na Figura 36 é possível ser visto o manômetro que referencia a pressão de estiramento da serra para o processo de produção. A leitura foi constante durante todo o processo. Seguiu-se a tabela do fabricante do equipamento que recomenda a operação da serra de fita com  $82 \text{ kgf/cm}^2$ .

Figura 36 - Manômetro do macaco hidráulico de estiramento da serra



Fonte: o autor.

Para checar a precisão da leitura do manômetro, foi utilizado para cada equipamento um dispositivo de controle disponível no mercado. Trata-se de um tensiômetro digital de serras de fita que permite quantificar a deformação elástica da ferramenta de corte.

Com precisão micrométrica, indica se a tensão da lâmina de serra de fita está correta, bem como se a laminação está adequada para os volantes da máquina. A partir da área da serra de fita (espessura x largura), verifica-se qual foi a tensão necessária para a deformação encontrada, confirmando se a carga aplicada foi responsável por tal deformação com determinada precisão. Se sim, a tensão lida no manômetro está correta em função da dimensão da serra e sua deformação elástica medida.

Os manômetros checados estavam aferidos.

No processo de produção da empresa, as toras utilizadas são descascadas e pré classificadas por classes diamétricas distintas. São utilizadas cinco classes diamétricas no processo de serramento para produção em batelada.

A taxa de alimentação da serraria varia de 8 a 10 toras por minuto, dependendo do diâmetro médio da classe de tora trabalhada. A medição do diâmetro das toras durante o processo é feito por um digitalizador de imagens. O digitalizador tem a função de classificar as toras descascadas, separando-as. Na serraria, o digitalizador referencia a linha de centro inscrita dos diâmetros da tora ao eixo de corte das serras, posicionando o melhor ponto de corte para a otimização destas. A serraria recebe em seu pátio toras de *Pinus spp* de plantio

próprio com certificação FSC (*Forest Stewardship Council*). A maioria (> 90%) da espécie processada é o *Pinus elliottii*. O diâmetro mínimo das toras para o processo de serramento na empresa é de 160 mm e o diâmetro máximo é 350 mm. O comprimento médio das toras utilizadas foi de 3080 mm.

Os parâmetros descritos no Quadro 12 são aqueles que não serão modificados e serão usados como dados de entrada para o projeto da ferramenta.

Quadro 12 - Parâmetros fixos do equipamento utilizado para o desdobro

Parâmetros fixos da serra de fita geminada		
diâmetro do volante	1350	[mm]
potência do motor	75	[hp]
distância entre as guias	450	[mm]
distância entre os eixos	2730	[mm]
comprimento da serra	9700	[mm]
tipo de guia	guia de pressão	

Fonte : o autor.

Na Figura 37 observa-se o processo de serramento da tora de *Pinus spp*, as rodas prensoras que estabilizam a tora descascada sobre a corrente de alimentação, a ferramenta em ação separando por serramento a costaneira da parte da tora e na parte inferior a projeção do pó de serra (cavacos) provenientes do corte. Em detalhe pode ser visto o conjunto de captação de dados montado abaixo da guia de pressão do equipamento.

Figura 37 - Serramento da tora de *Pinus spp* no ambiente industrial



Fonte : o autor.

Os parâmetros variáveis descritos no Quadro 13 são os parâmetros de projeto da ferramenta e da condição de usinagem que podem ser modificados para a busca de uma melhor performance de corte.

Tais parâmetros são resultados de experimentos empíricos e quando necessários modificados pela prática dos profissionais da empresa.

Para os ensaios foram utilizados os padrões de corte, utilizados no dia a dia da empresa.

Quadro 13 - Parâmetros variáveis do projeto de ferramenta e da condição de corte

Parâmetros variáveis da serra de fita geminada		
espessura da serra	1,47	[mm]
espessura do corte	3,60	[mm]
tipo de dente	Type 1	Tuset, Duran
ângulo de saída	24	[grau]
ângulo de folga	18	[grau]
ângulo de cunha	48	[grau]
folga lateral	1,065	[mm]
ângulo folga lateral axial	5,5	[grau]
ângulo folga lateral tangencial	6,0	[grau]
altura da garganta do dente	15,0	[mm]
passo do dente	50,0	[mm]
largura da serra utilizada	177,5*	[mm]
tensão de estiramento da serra	82	[kgf/cm <sup>2</sup> ]
material do aresta de corte	Stellite	type # 1
velocidade de corte	36	[m/s]
velocidade de alimentação média	40	[m/min]

\*7 inch

Fonte : o autor.

### Experimento em Laboratório :

Após a fase de experimentos na indústria, foi desenvolvido um novo suporte e adaptado o sistema às condições do equipamento serra de fita vertical do Laboratório de Processamento da Madeira da UNESP, Câmpus de Itapeva. Uma série de testes foram planejados e executados com o objetivo de se validar os resultados obtidos na fase experimental.

Na Figura 38 é mostrada uma vista geral da Serra de Fita Vertical, conhecida como resserra utilizada para tais ensaios.

Figura 38 - Serra de fita do laboratório de processamento da madeira da Unesp-Itapeva



Fonte : o autor

Os testes executados na fase de experimento de laboratório foram em um total de quatro testes e tiveram sua duração, produção e objetivos conforme demonstrado no Quadro 14.



Quadro 14 - Testes executados em laboratório : duração e objetivos

teste num.	duração [min]	freq. [ms]	dados unid.	serrado total	objetivo do ensaio local : Unesp- Itapeva / lab Usinagem
3	27	20	81000	3	comportamento da serra em vazio
4	28	20	84000	2	variações na tensão de estiramento da serra
5	30	20	90000	20	corte em tábuas serradas
6	30	20	90000	6	corte em tábuas aparelhadas s4s

Fonte: o autor.

Na Figura 39 é possível ser visto o sensor indutivo e sua fixação na guia do equipamento. A serra de fita utilizada para os ensaios de laboratório é equipada com uma guia convencional onde não é aplicada uma pressão transversal no eixo longitudinal da serra de fita, fazendo com que a ferramenta trabalhe livre com 0,05 mm de folga entre o material da guia a lâmina da serra. Essa folga permite que em casos de oscilação da serra de fita a guia entre em ação e gere um bloqueio da tendência de oscilar da serra estabilizando-a. Porém esse tipo de guia é menos eficiente do que a guia de pressão utilizada nos testes fabris por não aplicar uma pré tensão. Observa-se abaixo da guia de pressão o sensor posicionado para a leitura da oscilação da serra.

Na guia convencional da serra de fita do Laboratório de Processamento da Madeira da UNESP de Itapeva é utilizado como material da guia pequenas peças de seção retangular de madeira dura, da espécie Jatobá (*Hymenaea spp., Leguminosae*). Os calços de Jatobá que sofrem o atrito na guia de pressão podem ser vistas na Figura 39.

Figura 39 - Detalhe da guia convencional com o suporte desenvolvido



Fonte: o autor.

A máquina utilizada para a experimentação em laboratório foi uma serra de fita vertical de cabeçote único de fabricação da empresa “FaberNew” de diâmetro de volante igual a 1,10 m. Esse equipamento utiliza uma motorização de 30 hp, com rotação de 1185 rpm no eixo do motor trifásico sem inversores de frequência. As polias possuem o diâmetro de 165 mm e 500 mm (motora e movida respectivamente) sendo que para variar a velocidade de corte é necessário substituir as polias de transmissão de potência. Essa transmissão de potência mecânica do motor para o eixo motor da polia inferior da serra é feita por um conjunto de correias em V montados sobre um jogo de polias. Utilizando-se da Equação 2 a velocidade de corte ( $v_c$ ) calculada é de 22,5 m/s.

Na Figura 40 é apresentada uma vista geral da parte superior do equipamento utilizado, mostrando em detalhes o sistema de alimentação e apoio da madeira a ser serrada, a serra de fita, sua estrutura principal e a guia convencional fixa a esta estrutura, a cremalheira para movimentar a guia do equipamento e assim aproximar o máximo a posição da guia para a altura do corte sendo efetuado. Podem ser vistos também o volante superior, o sistema de contrapeso para alívio da força ao movimentar a guia da serra de fita e o capô da máquina que tem a função de proteger o operador das partes móveis além do risco em ser projetados cavacos no mesmo durante o processo.

Nota-se na Figura 40 que o volante superior é raiado e não maciço como o volante inferior pois assim este tem menos massa e conseqüentemente menos momento de inércia. Isso evita que dinamicamente o mesmo contribua efetivamente para movimentar a serra de fita cuja função é do volante inferior. A serra de fita tem a função de transferir potência entre os dois volantes.

Figura 40 - Volante superior da serra de fita do laboratório de processamento da madeira da Unesp



Fonte : O autor.

Na Figura 41 é apresentada uma vista do outro lado da parte superior do equipamento utilizado, mostrando em detalhes o sistema de alimentação, o volante para movimentar a cremalheira do movimento da guia da serra de fita, a guia e a serra.

Figura 41 - Serra de fita vertical do laboratório de processamento de madeira da Unesp-Itapeva



Fonte: o autor.

Para tracionar a serra de fita sobre os volantes, diferentemente do equipamento utilizado para os experimentos na indústria, este equipamento possui um sistema de braços mecânicos em balanço e pesos que são colocados ou retirados em função do tensionamento desejado.

Na Figura 42 pode ser observado ao fundo o sistema descrito e os pesos removíveis. Cada peso tem 5 kg de massa. A tração do equipamento é calculada utilizando-se de metodologia de cálculo de estática de um corpo por meio das distâncias dos braços de alavanca relacionados ao seu eixo e pontos de apoio. Para os ensaios a tensão de tração utilizada para a serra de fita foi de  $32 \text{ kgf/cm}^2$ .

Figura 42 - Pesos do sistema de braços de tensionamento da serra



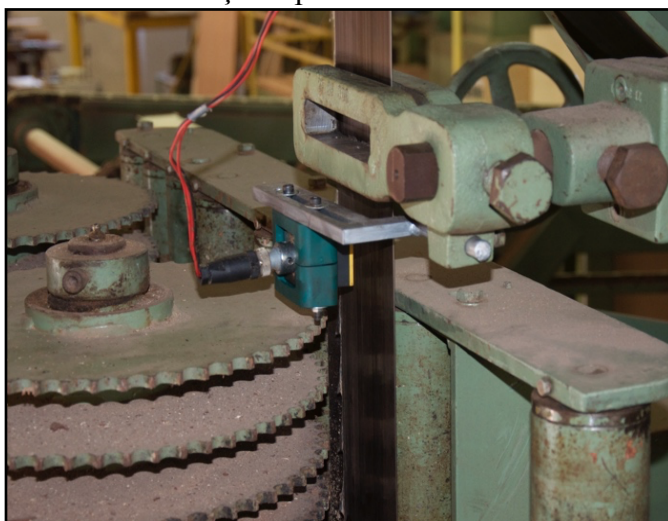
Fonte: o autor.



O sistema de alimentação da máquina de serra fita vertical é feito por meio de rodas dentadas para tracionamento das peças contra a serra de fita. Possuem acionamento elétrico com três velocidades possíveis. As rodas de pressão atuam pneumaticamente para abrir e fechar. Os roletes lisos verticais livres tem a função de gerar o plano de corte paralelo à linha de ação da serra de fita e permitir que haja a passagem referenciada da madeira ao longo deste plano, tracionado pelas rodas dentadas. As rodas dentadas são comprimidas por meio de ação pneumática sobre a costaneira e assim a compressão é constante permitindo que haja rigidez no corte e constância na velocidade de alimentação.

Na Figura 43 são evidenciados os detalhes do sistema de alimentação da serra de fita vertical, conforme descrito, e o posicionamento do sensor no sistema de guia e serra de fita. A alimentação da madeira se dá inicialmente pela primeira roda dentada no fundo da figura que estabiliza a madeira e a segunda roda dentada que se situa posicionada próxima a lâmina de serra permite estabilizar a madeira contra a serra bem como tracioná-la no sentido de avançá-la para fora em direção a saída da serraria. O fundo da Figura 43 está focando a região de alimentação da madeira a ser serrada.

Figura 43 - Sistema de alimentação e posicionamento do sensor

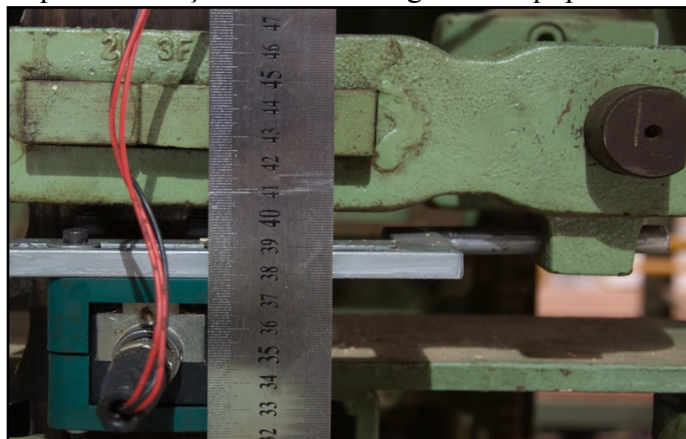


Fonte: o autor

Na Figura 44 é demonstrado o detalhe do suporte para fixar o sensor ao equipamento e instalado abaixo do ponto de trabalho da guia, centralizado ao meio da serra e calibrado a altura da guia por meio de régua de aço. Nota-se que no centro da guia estão fixos os tarugos de madeira dura (pintados) e logo abaixo em cinza o suporte que recebe por meio de parafusos o sensor com sua capa plástica que permite ser fixado e regulado ao longo do comprimento da serra de fita. Buscou-se referenciar o mesmo ao centro da serra de fita.

Utilizou-se um padrão de montagem do centro do sensor a uma distância fixa a linha de centro da serra de fita abaixo da garganta do dente (55 mm das costas da serra). Padronizou-se distância do sensor ao centro das guias (90 mm). A altura do sensor a mesa do equipamento foi calibrada a 350 mm. Na figura 44 é possível observar a parte traseira do sensor indutivo e os cabos de conexão que levam o sinal ao microcontrolador.

Figura 44 - Suporte para colocação do sensor na guia do equipamento



Fonte: o autor.

Foram utilizados para os testes pontaletes de madeira de seção transversal de 60 mm x 170 mm x 1,20 m de comprimento. A madeira estava serrada a algum tempo e a umidade média da mesma estava em torno de 30 %. O acabamento superficial da madeira foi grosseiro com marcas das ferramentas de corte e com imprecisões do desdobro. Na Figura 45 observa-se que os pontaletes estavam com aparência de mofado devido ao tempo que o mesmo ficou exposto ao ar livre para perda da umidade.

Figura 45 - Pontaletes de *Pinus spp* utilizados para ensaios em laboratório



Fonte : o autor

Os parâmetros fixos do equipamento do laboratório de processamento da madeira da UNESP do Câmpus de Itapeva estão descritos no Quadro 15.

Quadro 15 - Parâmetros fixos da Serra de Fita Vertical da UNESP

Parâmetros fixos da serra de fita vertical		
diâmetro do volante	1100	[mm]
potência do motor	30	[hp]
distância entre as guias	600	[mm]
distância entre os eixos	1700	[mm]
comprimento da serra	7020	[mm]
tipo de guia	guias convencionais de garras	

Fonte : o autor.

A aresta principal de corte da serra de fita é recalçada e igualizada. O seu perfil é o dente tipo reto. A espessura da serra utilizada é acima do especificado o que possivelmente é feito para compensar a fragilidade ocasionada pelo ângulo de cunha resultante do tipo de dente. Em condições de alta produção deveria ser revisto esses parâmetros variáveis, pois a grande espessura da serra de fita ocasiona fadiga no aço e trincas que podem gerar até rompimento da serra e colocar em risco os operadores dos equipamentos.

A aresta de corte da serra foi recalçada e afiada no laboratório da UNESP. Para conformar os dentes e padronizar essa deformação plástica foram utilizadas ferramentas manuais e bancada de laminação convencionais. Essas oficinas de afiação tradicionais estão disponíveis a venda com todos os equipamentos manuais pela maioria dos fabricantes de equipamentos de serrarias.

As serras de fita recalçadas manualmente são trocadas com muito mais frequência e reafiadas, consumindo as mesmas mais rapidamente. O motivo é que a dureza superficial do dente recalçado sendo menor, o desgaste da ferramenta é maior sendo necessário com muito mais frequência ser retirada toda a trava do dente. A nova trava (recalque) e afiação são refeitos de cada três a cinco usos da lâmina de serra. Assim a vida de uma serra de fita recalçada é em média quatro a cinco vezes menor do que a vida de uma serra de fita com aplicação de *Stellite* na aresta principal de corte.

Os parâmetros variáveis utilizados para o experimento laboratorial são descritos no Quadro 16.

Quadro 16 - Parâmetros variáveis do projeto de ferramenta e da condição de corte

Parâmetros variáveis da serra de fita vertical de resserra		
espessura da serra	1,47	[mm]
espessura do corte	3,50	[mm]
tipo de dente	Type 3	Tuset, Duran
ângulo de saída	18	[grau]
ângulo de folga	53	[grau]
ângulo de cunha	19	[grau]
folga lateral	1,015	[mm]
ângulo folga lateral axial	nc	recalcado manual
ângulo folga lateral tangencial	nc	recalcado manual
altura da garganta do dente	11	[mm]
passo do dente	45	[mm]
largura da serra utilizada	115*	[mm]
tensão de estiramento da serra	32	[kgf/cm <sup>2</sup> ]
material do aresta de corte	aço recalcado	Liga Cr-V
velocidade de corte	22,5	[m/s]
velocidade de alimentação média	36	[m/min]

\*4 1/2 inch; nc : não controlado.

Fonte : o autor.

O primeiro teste executado em laboratório, referenciado como número três no Quadro 16, foi com o objetivo de monitorar o comportamento da serra após permanecer no volante sem solicitação de corte. Os testes citados como testes número quatro no Quadro 16 foram feitos variando a tensão de estiramento da serra de fita. No final destes testes foram serrados um total de seis produtos e observado o comportamento da deflexão da serra de fita.

A partir do ensaio descrito no Quadro 16, foi adotado um padrão de referência onde foi efetuada uma pequena deflexão manual na serra no sensor para, tanto no início do teste como no final, ficar então registrado os limites máximos de início e fim do ensaio.

Os testes de número cinco evidenciam de uma maneira mais clara o comportamento da ferramenta de corte durante o corte de 20 peças. Nesse ensaio foi aumentada a tensão de estiramento da fita aos dez minutos de funcionamento, passando de 28 kgf/cm<sup>2</sup> para 32 kgf/cm<sup>2</sup> e observada a tendência da serra de fita em flertir quando comparada com a tensão inferior anteriormente aplicada.

As tábuas obtidas nesse ensaio estão apresentadas na Figura 46.

Figura 46 - Tábuas obtidas no ensaio em laboratório



Fonte : o autor

Após os primeiros três experimentos em laboratório evidenciou-se a necessidade de aparelhar a madeira devido às imperfeições presentes na madeira serrada em bruto. Essas peças estavam com um acabamento superficial grosseiro da serraria que as originou com marcas de ferramenta e ondulações no corte as quais copiavam o perfil e impactavam em um plano de corte imperfeito. O processo de aparelhamento das quatro faces das peças foi feito utilizando-se uma plaina moldureira equipada com cabeçotes compostos por quatro facas retas. Na Figura 47 pode ser vista a operação de melhoria do acabamento superficial das peças para os ensaios.

Figura 47 - Plaina moldureira S4S para o aplainamento da madeira



Fonte: o autor



Na Figura 48 as peças a serem utilizadas já foram usinadas e estão prontas para a próxima sequência de testes. Foi evidenciada uma melhoria nas qualidades superficiais da madeira, seu acabamento e limpeza, retirando alguns fungos que estavam presentes devido à secagem ao tempo utilizada para estabilizar a madeira. Como para fazer o aplainamento da madeira descrito utilizou-se uma plaina moldureira todas as quatro faces da madeira foram aparelhadas exatamente na mesma seção transversal e com acabamento superficial fino.

Figura 48 – Madeira aplainada para ensaios de serramento



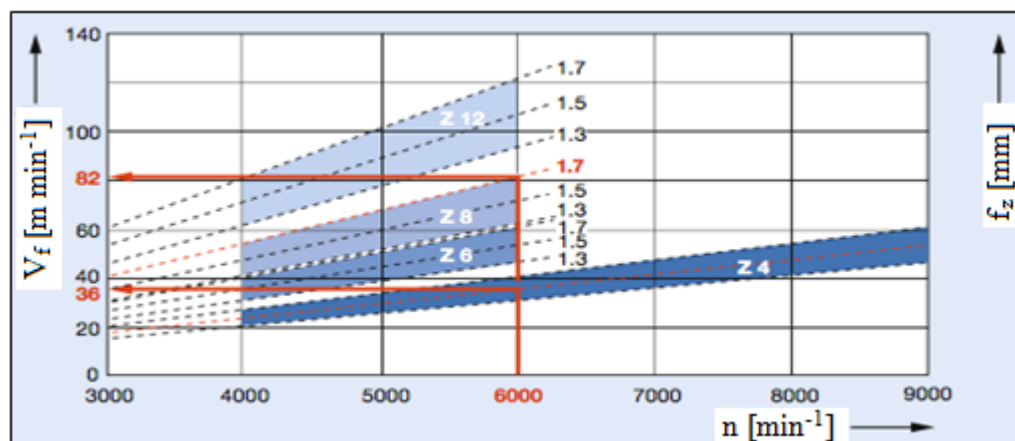
Fonte: o autor

Define-se acabamento superficial fino para plainas moldureiras aquele que possui de 1,3 mm até 1,7 mm de distância entre os sulcos das facas. Esse acabamento pode ser calculado por uma relação matemática que se utiliza dos seguintes parâmetros da usinagem: número de facas utilizados no cabeçote de usinagem (quatro), a rotação da ferramenta de corte (6.000 rpm) e a velocidade de alimentação que foi usinada a madeira (12 m/min). Uma outra forma de obter esse dado é o uso de um ábaco específico fornecido pela empresa WEINIG AG. Fazendo uso desse ábaco, mostrado na Figura 49, aplica-se os seguintes dados: na linha vermelha (6.000 rpm), com uma ferramenta de quatro facas ( $z = 4$ ), e velocidades inferiores a 36 m/s e, encontramos como resultado desse processo, um acabamento superficial menor de 1,3 mm entre sulcos visíveis da ferramenta.

Esse processo de usinagem além de eliminar os sulcos dos dentes na madeira serrada ainda contribui para que as peças de madeira recebessem uma seção retangular mais homogênea tanto geometricamente como dimensionalmente.

Nota-se na Figura 49 que a distância entre as marcas das facas para a usinagem efetuada de melhoria do acabamento da madeira para uso nos ensaios foi inferior a 1,3 mm.

Figura 49 - Cabeçote de usinagem: acabamento superficial ( $f_z$ ) em função do número de facas ( $z$ ), rotação da ferramenta ( $n$ ) e velocidade de alimentação ( $v_f$ )

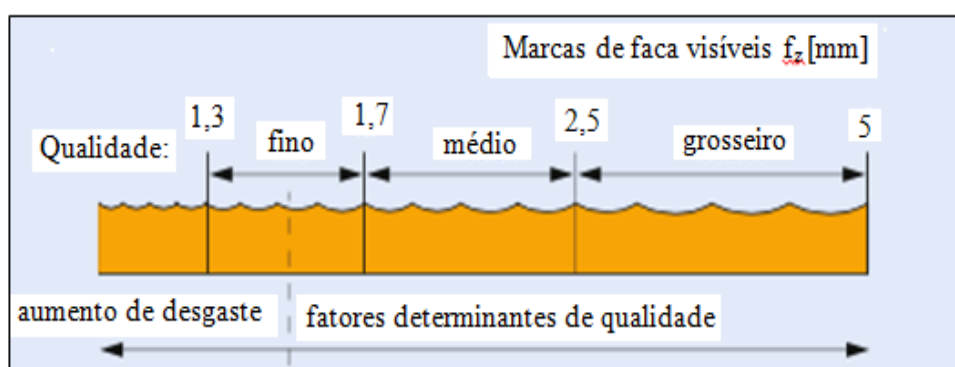


Fonte : adaptado de WEINIG (2011).

Assim, conforme pode ser visto na Figura 50, a qualidade do acabamento superficial pode ser definida como fina, ou a melhor qualidade possível em se tratando de aplainamento da madeira como processo de usinagem de beneficiamento final da madeira serrada.

É demonstrado na Figura 50 a qualidade da superfície da madeira aplainada em função dos sulcos ou marcas da ferramenta deixados na superfície usinada. Quando o acabamento superficial melhora o desgaste da ferramenta aumenta. Ao contrário, quando a qualidade do acabamento superficial diminui, marcas visíveis da ferramenta aparecem e depreciam a qualidade do produto e o desempenho deste nos processos de beneficiamento como colagem por exemplo.

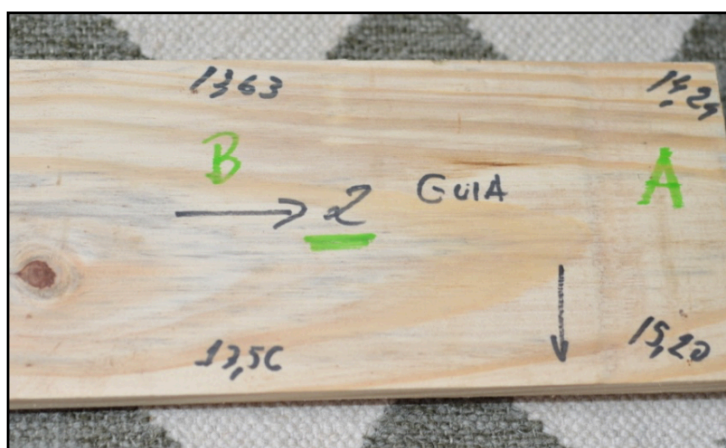
Figura 50 - Qualidade da superfície em função da distância visível entre marcas das facas



Fonte : adaptado de WEINIG (2011).

Após a melhoria do acabamento da madeira, foi feito a série quatro de ensaios de serramento. Nesse ensaio não houve variação na tensão da serra de fita, pois o objetivo do mesmo era verificar a relação entre o perfil da madeira cortada e a deflexão da serra captada pelo sistema de captação eletrônico de dados. Obtida a série de seis tábuas serradas, as mesmas foram medidas ao longo de seu comprimento conforme pode ser visto na Figura 51.

Figura 51 - Sequência de medidas da espessura das tábuas serradas no ensaio seis



Fonte : o autor.

Cada tábua foi identificada na sua sequência de fabricação, na posição de entrada da guia e medida em oito pontos diferentes identificados como A até G e em duas alturas em cada ponto. Essas medidas foram tomadas conforme está representado por meio de paquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

Nota-se na Figura 53 que a tábua dois da sequência serrada teve sua primeira medida realizada na parte superior e na parte inferior da mesma. Essa medida foi chamada de medida A. Na sequência foi tomada mais um par de medidas no mesmo sentido de alimentação da tábua e chamada de medida B cuja média está calculada e disponibilizada na Tabela 3



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

O sensor indutivo e o sistema de fixação suportaram dois ciclos de trabalho de quatro horas no mesmo dia, sem haver perda de dados ou danos químicos devido à sujeira, vibração, ruído, temperatura ou resinas presentes na madeira. Pode-se afirmar que o sistema funcionou bem em uma atmosfera agressiva e ainda estava em condições de continuar em operação. Foi assim confirmado a possibilidade de aplicação prática do equipamento.

Na Figura 52 podem ser observadas as condições finais do sensor e da guia de pressão após um dia de ensaio. Nota-se que existe muita presença de pó de serra bem como a guia de pressão utilizada já se encontra desgastada devido ao atrito com a serra.

Figura 52 - Detalhe do conjunto guia e sensor após 8 horas de uso contínuo



Fonte: o autor.

O volume de dados captados durante os ensaios está resumido na Tabela 1.

Como é possível ser observado na Figura 53, Figura 54, Figura 55 e na Figura 56 o sistema de referência utilizado foi a partir da medida inicial de montagem do sensor, negativo para deflexões no sentido da máquina e positivo para deflexões no sentido da guia ou para fora do plano da guia de pressão da máquina. No canto esquerdo dessas Figuras está um quadrado de bordas arredondadas que representa o semi-bloco de madeira sendo serrado e o sensor indutivo próximo a linha que representa a serra. Os quadrados verdes são os registros

dos fenômenos estáveis do processo, o que pode representar a ferramenta sem ser solicitada transversalmente ou solicitações que não são altamente impactadas pelas forças que atuam perpendicularmente ao plano de corte e vibram a ferramenta fletindo-a. Pode ser observado deflexões médias ao longo do processo, próximo a guia da serra, e interpreta-se que as mesmas são dinâmicas e mudam ao longo do tempo. Os pontos mais distantes (vermelho) são deflexões máximas e fora da média que demonstram a variação no (e do) processo de corte.

Na Figura 53 é possível ser visto o primeiro conjunto de dados referente ao processo. Trata-se do ensaio 1 de produção da serraria durante aproximadamente quatro horas de produção no período da manhã (A).

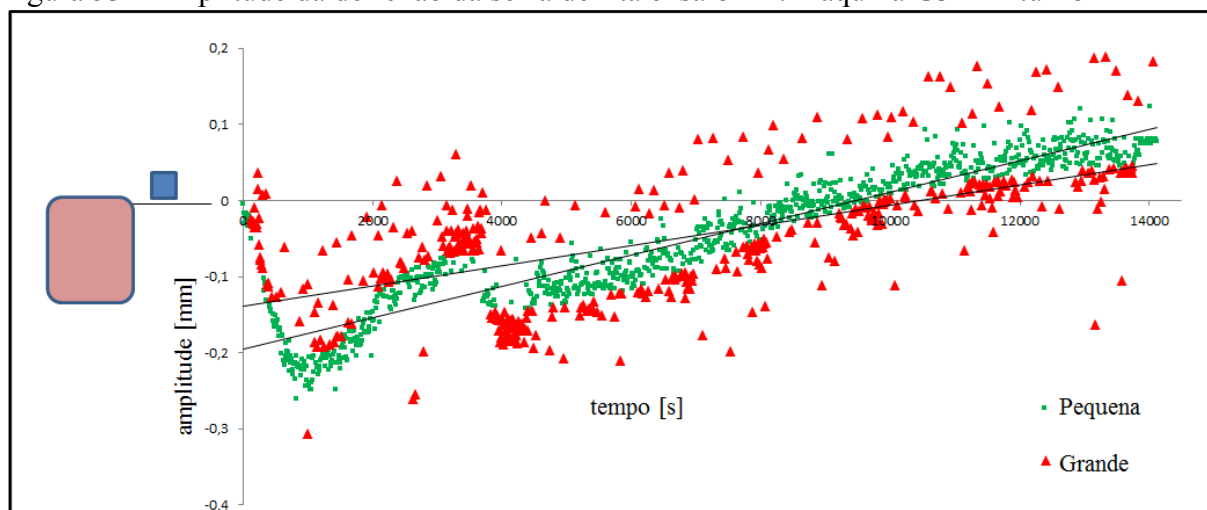
No início do processo pode ser observado uma repentina mudança de tendência da serra aos 1000s. Esse fenômeno é observado pela primeira vez e nos gera uma necessidade de investigação e interesse em saber se é um fenômeno único ou se repete como uma tendência da serra.

Observa-se na Figura 53 aos 4000s, uma mudança repentina da referência da captação dos dados. Isso ocorreu pois houve um travamento de toras no início do processo que demandou alguns minutos para ser retirada do equipamento.

Devido a uma deformação permanente na serra ou guia, a referência do corte mudou de posição, distanciando do sensor em aproximadamente 0,1 mm.

Nota-se que a maior tendência da serra para esse corte é ir ao encontro da tora sendo serrada e que no final do período, próximo aos 4.000s houve as maiores deflexões negativas da serra, momento onde foi parada a máquina e trocado a ferramenta por uma outra serra de fita reafiada.

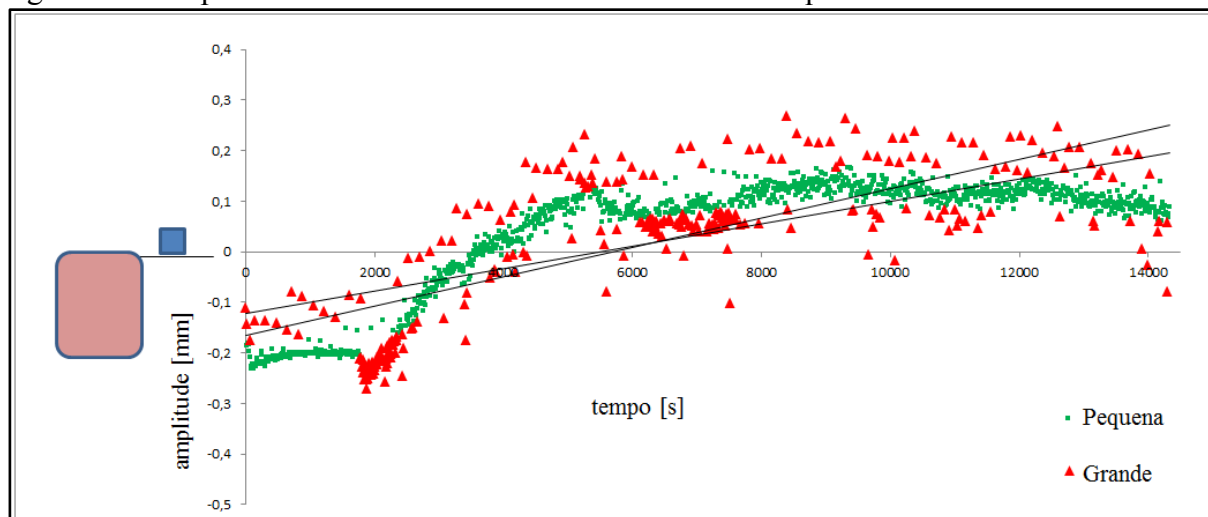
Figura 53 - Amplitude da deflexão da serra de fita ensaio 1A: máquina G3 – 1º turno



Na Figura 54 é apresentada a variação do deslocamento e da deformação da posição da serra de fita em referência ao sensor. Esses dados foram coletados no período da tarde do primeiro dia de testes durante um meio turno de trabalho de aproximadamente quatro horas de produção.

A série de dados começou a ser captada as 12h00 do mesmo dia que o ensaio anterior, período do almoço dos funcionários. Nesse período, o equipamento é aberto manualmente e limpo. As 12h30 foi colocada a serra e pré tensionada. As 13h10 foi dado a partida do equipamento após o tensionamento final da lâmina. Nota-se na Figura 54 que aos 2000s houve novamente a mesma tendência de inflexão da curva e uma tendência de aproximação da serra ao sensor, antes de haver um uso da guia que justificasse a perda de material por atrito. Conclui-se que pode ser uma tendência da serra e/ou do sistema hidráulico e mecânico do equipamento. Observa-se as maiores deflexões no final do ensaio e com tendência na direção da tora sendo usinada.

Figura 54 - Amplitude da deflexão da serra fita ensaio 1B: máquina G3 – 2º turno



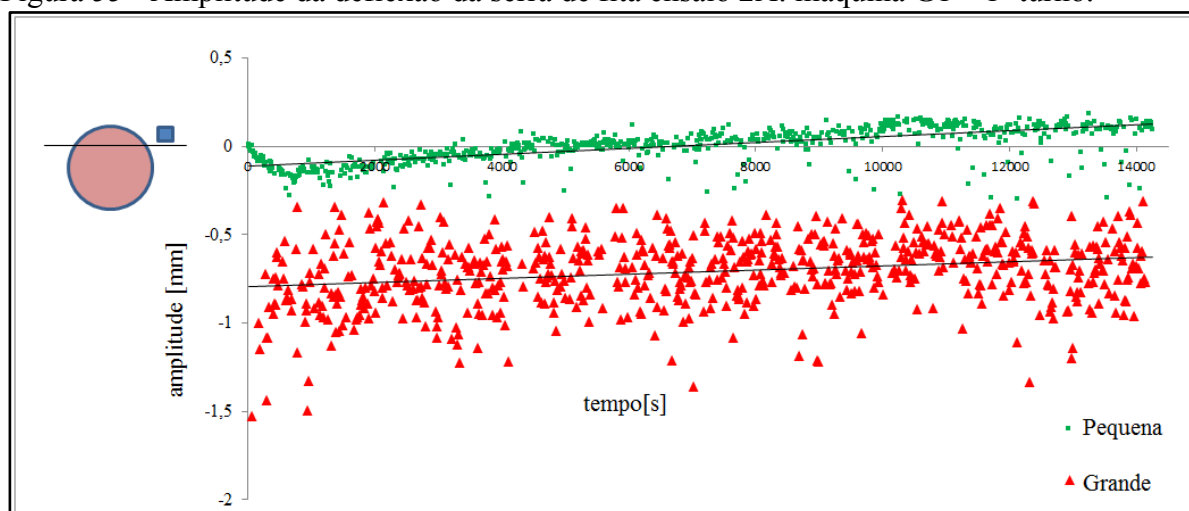
Fonte : o autor

Na Figura 55 é possível ser visto o início de uma outra série de testes feito na mesma indústria. Esses ensaios foram executados em um outro dia, o qual registramos como ensaio 2. O período relativo ao ensaio da Figura 55 foi o período de trabalho da manhã. Assim, o registro se refere ao ensaio 2A.

Nota-se novamente no início do processo, mesmo que com menos intensidade o fenômeno de “dilatação” da serra ocorrendo aos primeiros 1000s de ensaio. Observa-se ainda que o processo foi mais estável e com tendência a puxar a serra de encontro a tora,

diminuindo assim a espessura do bloco serrado. As amplitudes de variação da serra foram inicialmente na casa de 1,2 mm e no fim do período na ordem de 1,5 mm. Pela Figura 55 é possível afirmar que o processo de produção do teste 2A foi mais constante ao longo do período de ensaio e que a produção em número de toras foi maior, fato que pode ser observado na Tabela 2.

Figura 55 - Amplitude da deflexão da serra de fita ensaio 2A: máquina G1 – 1º turno.



Fonte: o autor

Na Figura 56 é representado o processo de serramento no período da tarde do segundo dia de ensaios na indústria. Ensaio 2B.

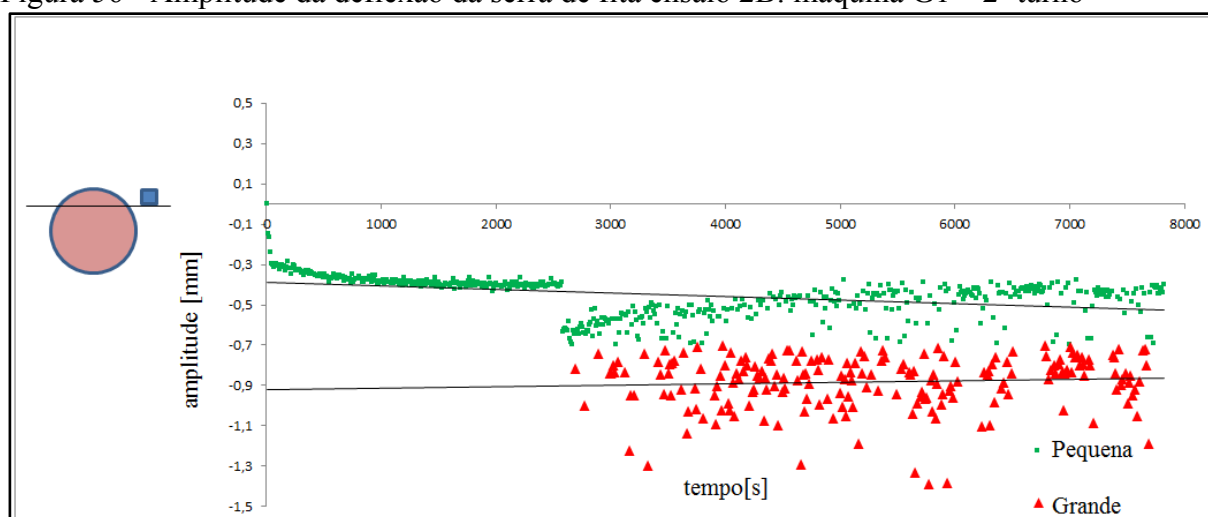
Da mesma maneira que descrito no ensaio 1B foi captado pelo sensor a operação de limpeza da serra e troca de ferramenta. Nota-se que devido a problemas operacionais na partida do equipamento após o almoço, o tempo efetivo de produção foi menor, embora devido ao menor diâmetro médio de toras, o ritmo de produção foi maior.

Observa-se na Figura 56 que a tendência de inflexão da serra relatada no início dos outros ensaios não houve. Aos 3000s evidencia-se uma mudança repentina na referência da captação dos dados. Trata-se de uma aumento do comprimento da serra ou uma avaria na guia devido a ocorrência de um travamento de toras aos 2600s. Esse problema operacional demandou demandou alguns minutos para a retirada da tora do equipamento, onde foi feito uma checagem da integridade da serra e da guia e decidido continuar com a mesma ferramenta e sem intervir na guia.

Não foi possível assim, precisar com exatidão a consequência real desse fenômeno, mas observa-se pela Figura 56 que houve um maior distanciamento na posição relativa entre o sensor e a serra de aproximadamente 0,2 mm.

Ao fim do processo pode-se observar as maiores frequências da oscilação da serra e também que o tempo de produção foi relativamente menor quando comparado com as outras Figuras da mesma série de ensaios.

Figura 56 - Amplitude da deflexão da serra de fita ensaio 2B: máquina G1 – 2º turno



Fonte: o autor

Observa-se na Figura 53, Figura 54, Figura 55 e Figura 56 uma mudança dinâmica na linha média de apoio da serra na guia ao longo do processo. Essas variações são próximas a 0,4 mm durante um período de trabalho da serra (4h aproximadamente).

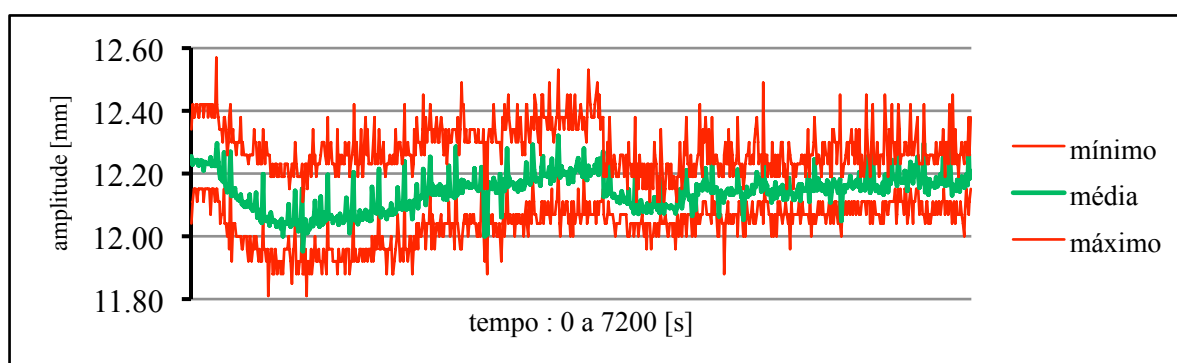
Essa “mudança de posição” da serra pode ser explicada pelo atrito da serra com a guia e o desgaste da mesma ao longo de todo o ciclo de trabalho. Existe também uma tendência da serra em ir ao encontro do sensor, ou seja estirar para fora da linha dos volantes no início do processo.

Na Figura 55 e na Figura 56 é observado uma amplitude de 1,2 a 1,5 mm na oscilação da serra de fita. Isso pode ser interpretado como uma ferramenta com maior perda de capacidade de corte, ou ainda que o processo de produção por alguma variável forçou mais a serra. Essa variável pode ser o diâmetro das toras usinadas que por serem em maior quantidade toras finas, a serra não teve dinamicamente atuação simultânea de pelo menos três dentes, desestabilizando assim o plano de corte e a ferramenta.

Com o objetivo de se ter mais informações visuais para a interpretação dos processos acima e identificar graficamente os resultados alcançados é apresentado na Figura 57 o gráfico que indica as amplitudes registradas. Nessa figura é demonstrada a média das amplitudes, o mínimo e o máximo dos dados obtidos da deflexão da serra nas duas primeiras horas de produção em condições reais de trabalho ( ensaio 2A).

Nota-se na Figura 57 que no início do processo existe uma tendência de acomodação da serra e que a estabilização das amplitudes média se dá após aproximadamente 1800s. Nesse período a ferramenta tende a ir de encontro ao núcleo da madeira a ser serrada.

Figura 57 - Amplitudes da deflexão da serra nas primeiras 2 horas do ensaio 2A



Fonte: o autor

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados no Laboratório de Processamento da Madeira da UNESP, campus de Itapeva, os quais estão descritos na Tabela 3. Para todos os ensaios tomou-se como referência o cálculo da amplitude o valor da distância utilizada entre o sensor e a serra de fita em mm.

Tabela 3 - Testes realizados em laboratório

teste num.	tempo min.	freq. ms	dados unid.	tábuas total	objetivo do ensaio local : Unesp - Itapeva / lab Usinagem
3	27	20	81000	3	comportamento da serra em vazio
4	28	20	84000	6	variações na tensão de estiramento da serra
5	30	20	90000	20	variações na tensão e corte em tábuas diversas
6	30	20	90000	6	corte em tábuas aparelhadas s4s

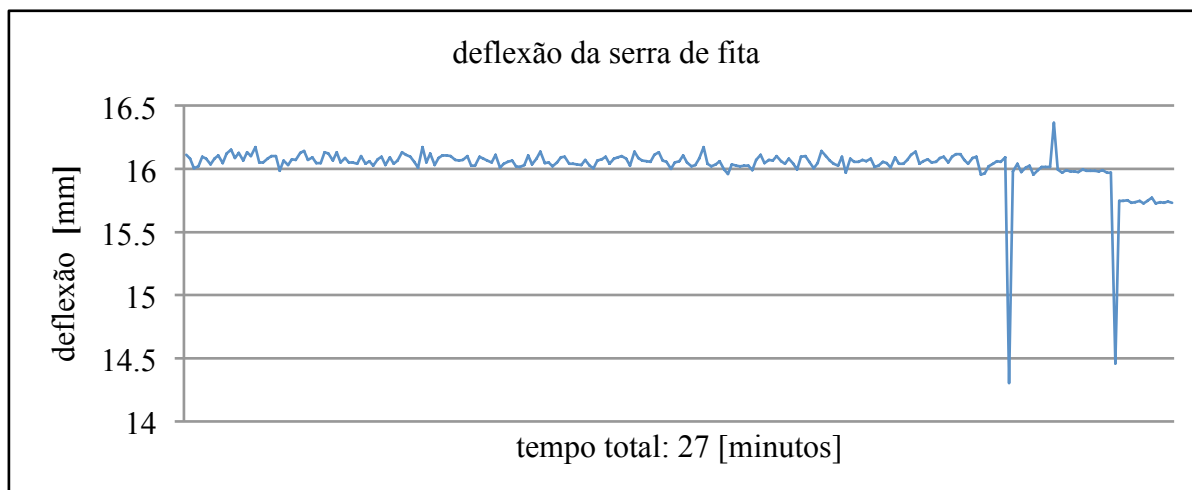
Fonte: o autor.

#### Comportamento da serra em vazio

É possível observar na citada Figura 58 que existem picos da média da amplitude da oscilação da ferramenta. O objetivo do teste foi acompanhar em vazio a tendência observada

da serra durante os testes no ambiente industrial e observar quais fenômenos poderiam ser repetir. Ao final do ensaio, a partir de 20 minutos aproximadamente foi serrada a primeira madeira e houve novamente a tendência da serra ir em direção ao sensor.

Figura 58 - Ensaio 3 no laboratório de Usinagem da Unesp - Itapeva

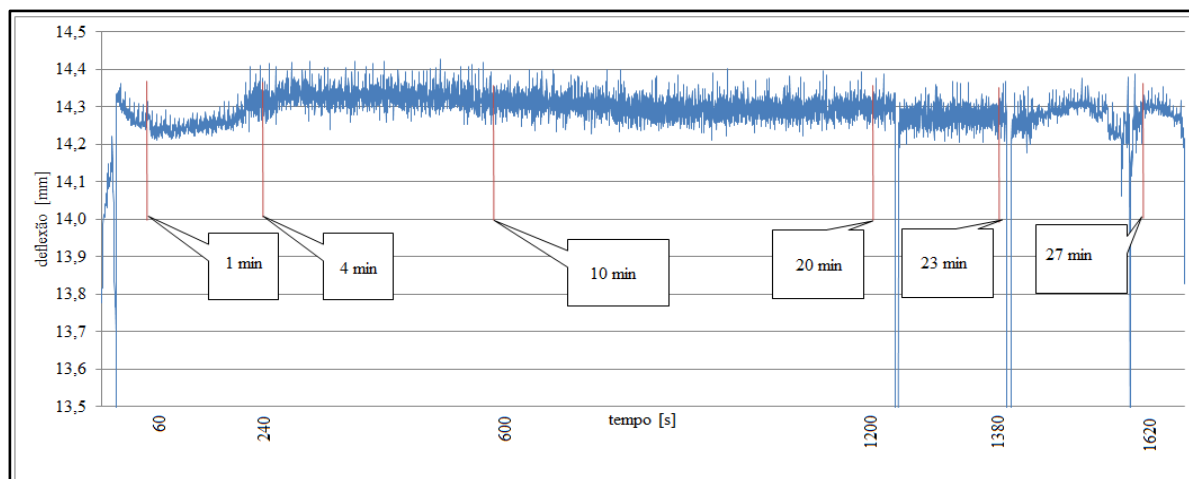


Fonte : o autor.

#### Variações na tensão de estiramento da serra

Observa-se na Figura 59 que no trecho entre 4 min e 10 min a amplitude da oscilação da serra é maior do que no trecho entre 10 min e 20 min. Além da variação da amplitude em função da tensão de estiramento da serra, é verificado o comportamento da serra gerando uma curva de inflexão no início dos ensaios. Outro ponto importante que se pode observar é novamente a tendência da serra ir em direção a guia da serra.

Figura 59 - Deflexão captada da serra de fita ao longo de 28 minutos de ensaios



Fonte : O autor.

Na Tabela 4 estão descritos os resultados encontrados das amplitudes utilizando os valores lidos pelo sensor durante tais ensaios. Sobre os valores máximo e mínimo obtidos nos trechos citados foi também calculada a média dos valores encontrados, confirmando que a amplitude maior está relacionada a menor tensão de estiramento da serra e foi obtida no trecho de 04 a 10 minutos do ensaio.

Tabela 4 - Cálculo da amplitude nos trechos de 4 e 10 min

amplitude média [mm] com variação do tensionamento da serra.				
trecho	mínimo	máximo	amplitude	média
4 - 10 min	14,08	14,61	0,53	14,33
10 - 20 min	14,04	14,54	0,50	14,30

Fonte: o autor

#### Variações da tensão e corte em tábuas diversas

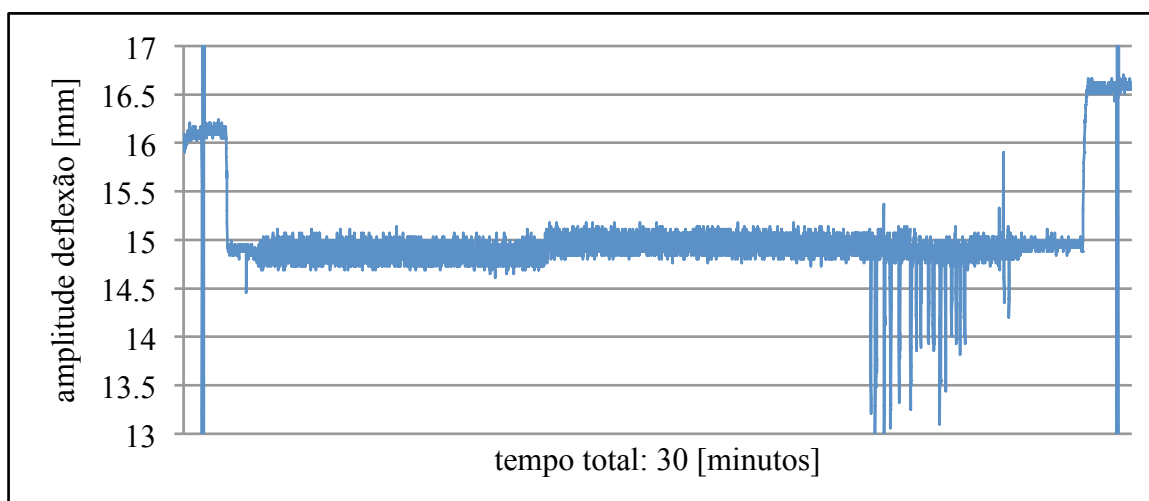
Na Figura 60 pode ser observado um novo ensaio de variação de tensão com corte simultâneo. Essa variação de tensão pode ser evidenciada pela Figura 60 a partir dos 10 minutos do ensaio quando foi aumentado de 28 kg/cm<sup>2</sup> para 32 kg/cm<sup>2</sup>. O aumento da tensão provoca o distanciamento da serra relativo à referência do corte.

O valor da amplitude está relacionado com a madeira serrada apoiada na mesa de roletes verticais. A serra ao se aproximar da guia aumenta a espessura teórica da madeira e no processo de serramento é puxada para dentro da máquina, diminuindo a espessura da peça interna. A serra fletiu no processo na maioria das vezes para o lado interno da máquina em amplitudes de até 2 mm com 32 kg/cm<sup>2</sup> de tensão de estiramento. Aos 23 minutos foi retirado um calço e retomada a tensão de 28 kg/cm<sup>2</sup>.

A serra não retornou a posição de início, mas ocorreram mais variações para fora do corpo da máquina em direção ao sensor, ou seja, propiciando aumento da espessura da peça interna ao corte.



Figura 60 – Amplitude da oscilação com variação de tensão de estiramento

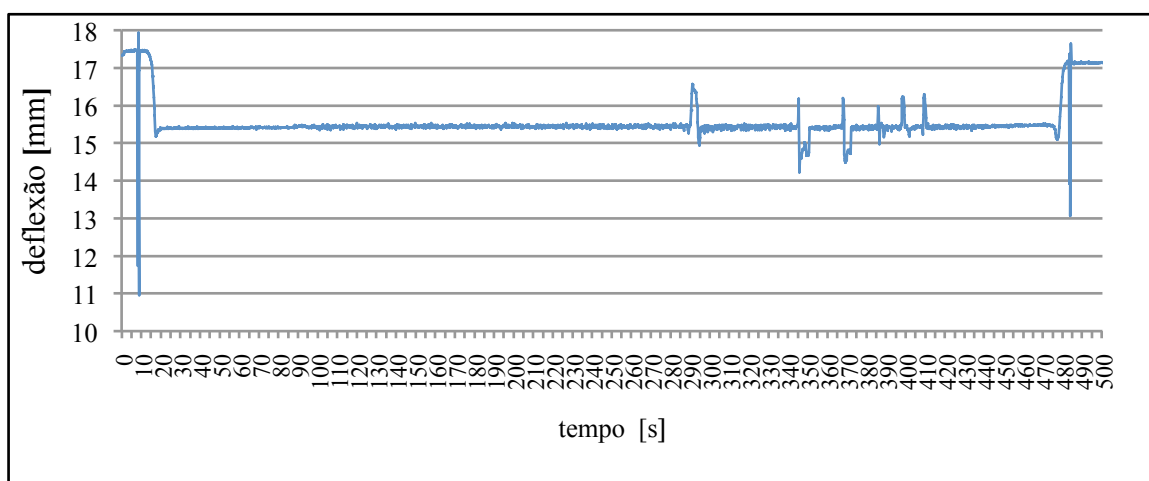


Fonte: o autor

#### Corte em tábuas aparelhadas S4S

O ensaio apresentado na Figura 61 evidencia a deflexão da serra de fita ao serrar seis peças pré aplainadas. Nota-se menores deflexões da serra quando comparada com as observadas na Figura 62. Essa melhor estabilização do corte pode ser explicada pelo fato de que as peças ao serem serradas, por terem sido aplainadas, apoiaram na mesa de rolos lisos e nas rodas de alimentação gerando uma melhor referência ao longo do plano de corte e não influenciaram em forças transversais ao plano de serramento e a consequente tendência de fletir a serra.

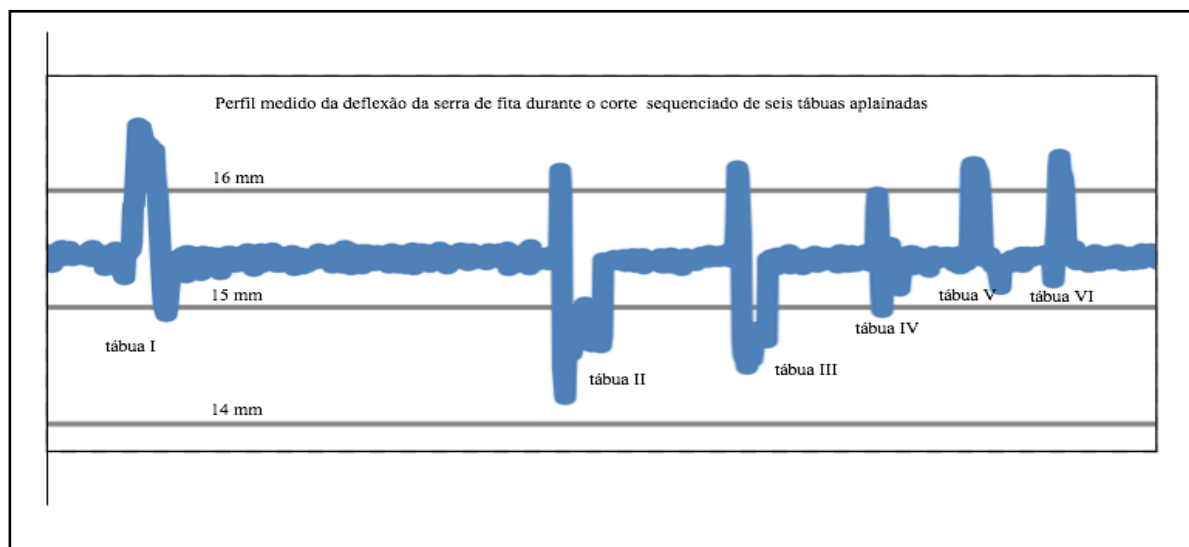
Figura 61 - Deflexão da serra durante o serramento de 6 peças de madeira aplainada



Fonte : o autor.

Como o objetivo de obter detalhes do perfil que a serra executou, a Figura 62 foi obtida da Figura 61 tomando o trecho entre 280s e 420s.

Figura 62 - Detalhe compreendido entre os tempos 280s e 420s da Figura 61



Fonte : O autor

Na Figura 63 é apresentada a imagem da variação da espessura na madeira serrada das seis tábuas obtidas durante esse processo de serramento. Nota-se a grande variação dimensional da espessura ao longo do comprimento da madeira serrada.

Figura 63 - 6 tábuas aplainadas serradas dispostas aleatoriamente



Fonte: o autor

Na Tabela 5 estão registradas as médias reais das medidas lidas nas seis tábuas serradas e descritas na Figura 61 e observada na Figura 63. As medidas de A a G são a média das medidas tomadas em cima e embaixo, ao longo da tábua no sentido crescente da alimentação da mesma durante o corte, conforme pode ser visto na Figura 51. As linhas representam as tábuas serradas de 1 a 6 na sequência de corte.

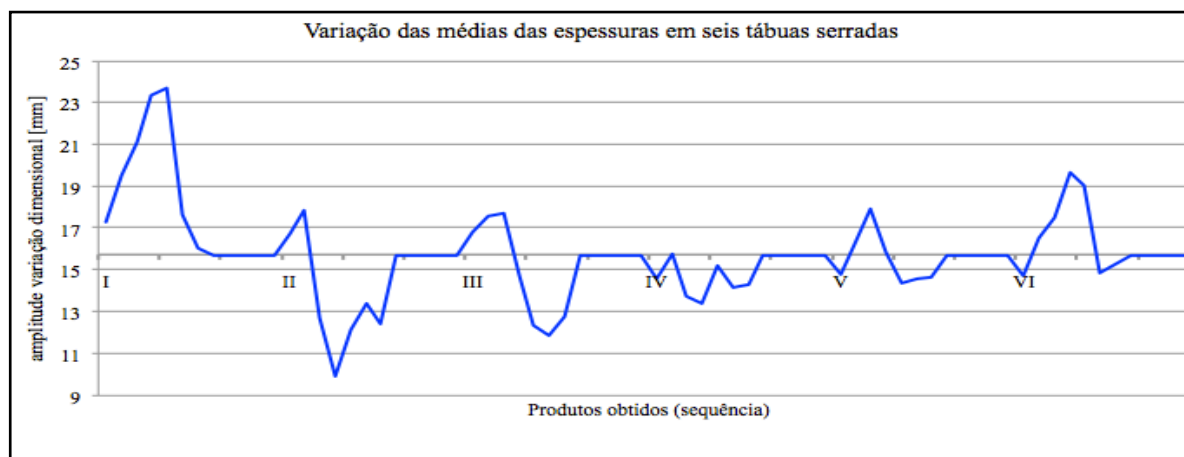
Tabela 5 - Média das medidas reais das seis tábuas serradas

medida na tábua (sequência)	média das espessuras / produto obtido – [mm]					
	1	2	3	4	5	6
A	14,18	14,72	14,64	16,90	16,68	16,74
B	11,94	13,60	13,87	15,71	15,19	14,96
C	10,37	18,79	13,76	17,70	13,55	14,00
D	8,15	21,58	16,73	18,05	15,63	11,83
E	7,78	19,36	19,11	16,27	17,08	12,42
F	13,83	18,05	19,59	17,28	16,89	16,60
G	15,45	19,07	18,71	17,14	16,84	16,18

Fonte : O autor.

Na Figura 64 pode ser observado o trecho plotado decorrente da Tabela 5 e está representando exatamente a mesma sequência de produção dos produtos serrados e medidos de acordo com o descrito na referida tabela e representado pelo perfil real obtido das tábuas serradas mostradas na Figura 63.

Figura 64 - Representação gráfica dos valores reais das espessuras medidos nas seis tábuas



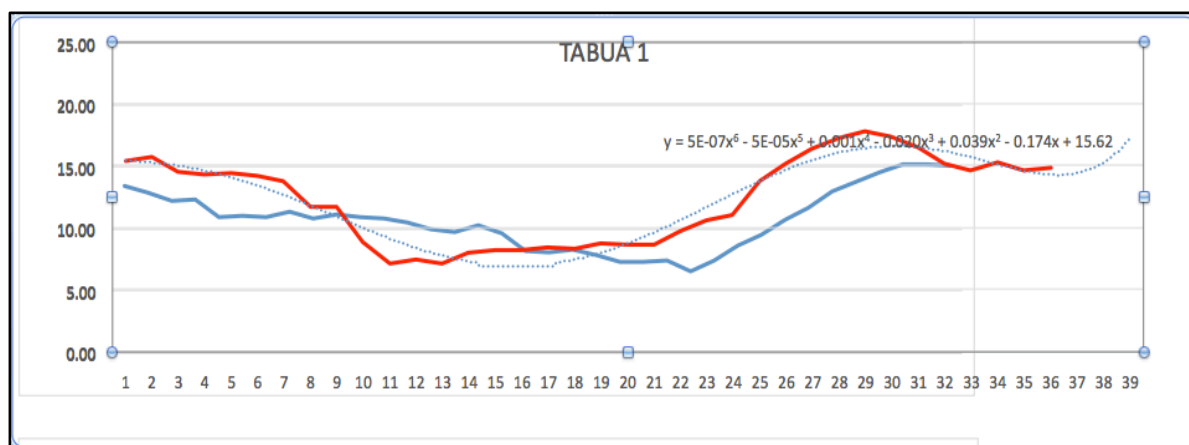
Fonte : o autor.

Nota-se observando a Figura 64 e comparando-a com a Figura 62 que o serramento das seis tábuas são aparentemente semelhantes e que o sistema lê a deflexão da serra próximo a variação da espessura do corte real.

A Figura 65 representa uma sobreposição das leituras. Na mesma é possível ser notado a falta de sincronia no momento de resposta entre a leitura e o real. Diversos fatores podem estar influenciando, entre eles a posição do sensor, a presença de sujeira nos rolos alimentadores, a falta de atrito no alimentador por outros motivos, etc.

Observando a curva, nota-se que existe uma semelhança entre as amplitudes e o comportamento dos dois sistemas de leitura, o que comprova que o sistema deve ser aprimorado, embora haja incerteza nas medições.

Figura 65 - Sobreposição dos perfis encontrados com ajuste matemático das curvas



Fonte : o autor.

## 4.2 CUSTO DO SISTEMA

Na Tabela 6 é apresentada uma estimativa dos custos de aquisição dos materiais utilizados para a fabricação do sistema utilizado. Os componentes estão descritos com suas especificações técnicas e são possíveis de ser adquiridos no mercado brasileiro. A descrição e a quantidade estão com fatores de segurança e não está incluído na cotação o valor de um sistema de computador para a programação do *software*, pois a maioria dos usuários possuem a sua disposição equipamentos para diversos fins que podem ser utilizados. Como fonte também apesar de estar cotado, é possível utilizar para alimentar o sistema uma fonte antiga de celular a qual por ser bivolt é muito interessante em estar disponível, pois na maioria das empresas não existe disponibilidade de tensão 110V. Em maio de 2016 o custo estimado do sistema ficou por volta de R\$ 1.000,00 ou US\$ 250.

Tabela 6 – Custo do sistema de captação de dados

item	produto	descrição	quantidade	valor			IPI
				EU	US\$	R\$	
1	sensor Turck	NI25-CK40-LIU-H1141	1	125,83 €		R\$ 499,55	5% \$ 524,52
1	suporte Turck	BSS-CP40	1	12,00 €		R\$ 47,64	5% \$ 50,02
1	microprocessador	ARDUINO	1		\$ 40,00	R\$ 140,00	5% \$ 147,00
1	shield SD card	<i>shield</i> para arduino	1			R\$ 76,00	5% \$ 79,80
1	cabos diversos	cabos e acessórios	1			R\$ 50,00	\$ 50,00
1	fonte conversora 9V	Fonte usada	1			R\$ 10,00	\$ 10,00
1	chapa para conexão	conforme desenho	1			R\$ 100,00	\$ 100,00
1	software	EDI ( software livre)	1			R\$ -	\$ -
1	caixa para montar	caixa de plastico	1			R\$ 20,00	\$ 20,00
1	SD card	cartão para gravar	1			R\$ 25,00	\$ 25,00
			cotações	1,00 €	R\$ 3,97	custo total	R\$ 1.006,34
			mai.16	US\$ 1	R\$ 3,50		

Fonte : o autor.

## 5. CONCLUSÃO

A pergunta que motivou o presente trabalho foi: “Existe como quantificar a qualidade de um produto madeireiro obtido pelo serramento contínuo por serra de fita por meio do monitoramento da deflexão da serra durante o processo produtivo utilizando um sistema livre?”

Assim :

Foi construído um sensor com capacidade de leitura e armazenamento de dados de deflexão da serra em condições de produção. Para construir esse sensor foi utilizado o Arduino e sua linguagem de programação, ambos de acesso livre.

Foi observado que após o uso o equipamento se demonstrou robusto e operou sob condições reais de calor, vibração, poeira e umidade. Após cada sequência de ensaio no ambiente industrial foi possível captar os dados acumulados e ter acesso ao registro histórico do processo de corte.

Nos ensaios realizados em laboratório comprovou-se que o equipamento lê com precisão as deflexões da serra e que estas são compatíveis e com alguma semelhança ao perfil da madeira serrada fisicamente. Concluímos por meio destes que os ensaios na indústria foram capazes de reproduzir o fenômeno de perda da estabilidade da serra.

Observou-se que as maiores tendências de deflexão estão relacionadas com as madeiras com maior variação em sua bitola, porém não se pode afirmar com precisão o quanto essa variação gerou dimensionalmente na mesma pelo fato de não haver uma sincronia entre a leitura indireta e o fenômeno físico no produto serrado. O sistema aqui apresentado também pode ser útil para a concepção de ferramentas e melhoria de processos através de modificações dos parâmetros de corte e/ou comparação de resultados.

Um possível passo para melhoria do sistema poderia ser a aplicação de um filtro de passa baixa para que, feito um ajuste dos fatores de ganho, o sistema aproxime com melhor sincronismo a leitura indireta da leitura real.

Assim : é possível por meio de sensoriamento quantificar deflexões de serras de fita contínua em processos industriais e essas deflexões permitem tomadas de decisão para o controle do processo industrial relativo à qualidade do produto final.

O presente trabalho deve ser dado continuidade pois pode representar um ganho de produtividade às indústrias madeireiras com um conceito barato e simples.

## REFERÊNCIAS

ABIMCI – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE: **Estudo setorial 2013 - ano base 2012**. Curitiba- PR, p.127, 2013.

ACR - ASSOCIAÇÃO CATARINENSE DE EMPRESAS FLORESTAIS. **Anuário Estatístico de Base Florestal para o Estado de Santa Catarina 2016**, Lages : [s.n], p.105, 2016.

AMATO NETO, J. Gestão Sustentável da Cadeia de Suprimentos (*Green Supply Chain Management*): princípios e aplicações. In : AMATO NETO, J. (org). **Sustentabilidade & Produção: teoria e prática para uma gestão sustentável**, São Paulo: Editora Atlas, p. 245, 2011.

ANDERSSON, C.; STÅHL, J.E.; HELLBERGH, H. *Bandsawing. part II: detecting positional errors, tool dynamics and wear by cutting force measurement*. Lund – Sweden, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 41, p. 237-253, 2001.

ANTOINE, R. *Conjugated influences of Stellite facing and speed reduction on tool life in abrasive wood sawing*. **Bois Voters Tropiques**. v. 09, p. 33-38, 1963.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 3002-1** : Grandezas básicas em usinagem e retificação Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos. ABNT. Rio de Janeiro, 2013.

ATAK, D.; TABOR, D. *The friction of wood*. **Proceedings of Royal Society**: London. v. 246, p. 539-555, 1958.

BANZI, M; SHILOH, M. **Primeiros Passos com Arduino: A plataforma de prototipagem eletrônica opensource**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 236 p. 2015.

BARROS, M.V. **Fator de cubicação para madeira empilhada de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden, com toretes de dois comprimentos, e sua variação com o tempo de exposição ao ambiente**. ”. 2006. 103p. Dissertação – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2006.

BATISTA, JLF; DO COUTO, HTZ; **O "Estéreo"**. ESALQ. 2002. disponível em <http://lmq.esalq.usp.br/METRVN/>; acesso em 20 mar. 2015.

BAYOUMI, A.E.; BAILEY, J.A.; STEWART, J.S. *Comparison of the wear resistance of various grades of cemented carbides that may find applications in wood machining*. **Wear**. v.89, p. 185-200, 1983.

BRITISH COLUMBIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (BCIT). *Saw Trades Apprenticeship Program*: module 1: *saw fitter*. Province of British Columbia: Centre for Curriculum, Transfer & Technology, p. 200, 2000.

BRITISH COLUMBIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (BCIT). *Saw Trades Apprenticeship Program*: module 3: *Bench Person*. Province of British Columbia: Centre for Curriculum, Transfer & Technology, p. 200, 2002.

CATÁLOGO Brasileiro de Máquinas e Equipamentos para trabalhar madeira. Curitiba: Lettech Editora e Gráfica Ltda. p. 135, 2003.

CERATIZIT. *Kataloge: Härtmetal für die Holzbearbeitung*. Disponível em: <[http://www.cerazit.com/4170\\_DEA\\_HTML.php?lc=7&entryId=1000313767\\_BS&expandId=1000313785](http://www.cerazit.com/4170_DEA_HTML.php?lc=7&entryId=1000313767_BS&expandId=1000313785)> Acesso em: 14 jun. 2015.

CHARDIN, A. *Ruban a grumes vertical, horizontal o incliné ?*. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**. v.74, p. 51-55, 1960.

CHARDIN, A.; FROIDURE, I. *The use of samblades with stellicfaced teeth*. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**. v. 85, p. 41-54, 1969.

CORRÊA, H.L., CORRÊA, C.A. **Administração de Produção e Operações: Manufatura e serviços**: Uma abordagem estratégica. 2 ed. São Paulo: Ed. Atlas, p. 690. 2012.

DALOIS, C. *Manuel de sciage et d'affutage*. 2. ed. rev. et corr. Nogent-Sur Marne Cedex: Centre Technique Forestier Tropical. p. 208, 1990.

DECENA, A.S.; de la CRUZ, R.Z.; SIBAYAN, D.V. *Pointers in logging and sawmilling malabayabas for railway ties*. **Forpride Digest** . v. III, p. 72-73, 1974.

EKLUND, U. *Influencing factors on sawing accuracy in a bandsawmill*, Skeria-Sweden: **Holz und Roh und Wekstoff**. v. 58, p. 102-106, 2000.

FARMER, R.H. *Corrosion of metals in association with wood*: Part 2. **Wood**, v. 11, p. 443-446, 1962.



FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 4.º reimpressão São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, p. 751, 1982.

FORÉZIENNE. Catálogo disponível em: <  
[http://www.forezienne.com/images/stories/forezienne/PDF\\_produits/informations-techniques-ruban.pdf](http://www.forezienne.com/images/stories/forezienne/PDF_produits/informations-techniques-ruban.pdf)>. Acesso em 10 nov. 2015.

GENDRAUD, P.; ROUX, C.; BERGHEAU, M. Vibrations and stresses in band saws : A review of literature for applicaion to the case of Aluminium-cutting high-speed band saws. Saint Etienne - France: **Materials Processing Technologie**. v. 135, p. 109-116, 2003.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru: M.T.T. Gonçalves. p. 242 2000.

GOTTLOB, W.J.; RUFFINO, R.T. Uma verificação experimental do desgaste das arestas principal e secundária e das superfícies que formam a cunha de corte das ferramentas na usinagem da madeira “Eucalyptus Grandis”. XIII CONGRESSO BRASILEIRO E II CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA.1995.

GOTTLOB, W. J. **Determinação da vida de ferramentas de aço AISI classe D-6 do stellite-1 na usinagem de madeira de “Eucalyptus grandis”**. 1996. 152p. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

HAYASHI, K.;SUZUKI, T. Effect of Cutting Speed on Tool Wear in the Peripheral milling of Wood. **Mokuzai Gakkaishi**. v.29, p. 36-42, 1983

HILLIS, W.F.; MCKENZIE, W.M. Chemical attack as a factor in the wear of woodworking cutters. **Forest Products Journal**. v.14, p. 310-312, 1964.

HUTTON, S.G.; LUO, Z. Dynamic response of a regenerative system to modulated excitation. Vancouver – Canadá : **Journal of Sound and Vibration**, v.272, p. 425-436, jun. 2003.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2013**. Disp. em: [http://www.iba.org/shared/iba\\_2014\\_pt.pdf](http://www.iba.org/shared/iba_2014_pt.pdf). Acesso em: 24 set 2015.

KENNEDY, S.M.; CHAN-YEUNG M., MARION, S.; LEA, J.; TESCHKE, K. *Maintenance of stellite and tungsten carbide saw tips: respiratory health and exposure-response evaluations*. **Occupational and Environmental Medicine**, London: BMJ, v. 52, n. 3, p. 185-191, march 1995.

KLAMECKI, B.E.; *A Review of Wood Cutting Tool Wear Literature*. **Holz und Roh- und Werkstoff**. Springer Verlag, v. 37, p. 265-276,1979.

KO, T.J., KIM, H.S. *Mechanistic cutting force model in band sawing*. Gyoungsan – South Korea : **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 39, p. 1185-1197, 1998.

KOCH, P. **Wood Machining Processes**. New York: Ronald Press Company, p. 530, 1964.

KRILOV, A.; GREF, R. *Mechanism of sawblade corrosion by polyphenolic compounds*. **Wood Science and Technology**. v.20, p.369-375, 1986.

LEHMANN, B. *Saw tooth design and tipping materials*. Vancouver: **Thin Kerf Technology**. 13 p., 2004. Inc. Disponível em: <http://www.thinkerf.com/Downloads/SawTooth.PDF>. Acesso em: 30 mai 2013.

LEHMANN, B. *Bandsaw Washboarding*. Vancouver: **Thin Kerf Technology**. 10p., 2005. Disponível em : <http://www.thinkerf.com/Downloads/WashBand.PDF>; Acesso em 20 nov. 2014.

LEHMANN, B. *Sawing Options to Improve Profits*. Vancouver: **Thin Kerf Technology**. 5 p., 2010. Inc. Disponível em: <http://www.thinkerf.com/Downloads/sawingoptionsprofits.PDF>; Acesso em: 15 fev. 2016.

LEHMANN, B. *Bandsaw Performance Monitoring*. Vancouver: **Thin Kerf Technology**. 8 p., 2016. Disponível em : <http://www.thinkerf.com/Downloads/monitor.PDF>. Acesso em 20 mai 2016.

Le-Ngoc, L.; McCallion, H. *Wide bandsaw blade under cutting conditions*. Part II: Stability of a plate moving in its plane while subjected to parametric excitation. **J. Sound Vibr**. v.186 p.143-162. 1995.

LOEHNERTZ, S. P.; COOZ, I. V.; GUERRERO, J. *Sawing hardwoods in five tropical countries*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, **Forest Products Laboratory**. v. ?, p.11. 1994.

LUNSTRUM, S.J. *Balanced saw performance*. **Forest Service Journal** v.12, p.17,1986.

McKENZIE, W.M. *Fundamental aspects of the wood cutting process*. **Forest Products Journal** v.12, n.6, p.19-26, 1960.

MALETA, M. *From Super Cycles to Super Mills, 3D Technology Continues to Reshape the Wood Industry*. LMI technologies; Disponível em : <<http://lmi3d.com/blog/super-cycles-super-mills-3d-technology-continues-reshape-wood-industry>>. Acesso em: 25 Julho 2016.

McKENZIE, W.M. *The relationship between the cutting properties of wood and its physical and mechanical properties*. **Forest Products Journal**, v.12, n.6, p. 287-294, 1961.

McKENZIE, W. M. *Fundamental analysis of the wood cutting process*. Dept. Of Wood Technology School of Natural Resources, University of Michigan, Ann Arbor Ed., p.?,1961.

McKENZIE, W.M., KARPOVICH, H. *The frictional behavior of wood*. **Wood Science and Technology**. v.2, p. 138-152. 1968.

McKENZIE, W. M. *Wear and blunting of the tool corner in cutting a wood-based material*. **Wood Science and Technology**. v. 9, p 59-73, 1975.

McROBERTS, M. **Arduino Básico**. 2.ed. São Paulo. Novatec, p. 506, 2015.

MELTZER, G.; IVANOV, Y.Y. *Identification of blunt-process at wood-milling tools by time-frequency analysis*, in: Proc. of IEEE-SP **International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis**. Pittsburgh, PA, USA. October , p 449-452, 1998.

MOTE JR., C.D.; WU, W.Z. *Vibration coupling in continuous belt and band systems*. Berkeley - USA: **Journal of Sound and Vibration**, v. 102, p. 1-9, 1985.

NORDSTRÖM, J.; BERGSTRÖM, J. *Wear testing of saw teeth in timber cutting*. Karlstad – Sweden : **Wear**, v. 250, p. 19-27, 2001.

OKAI, R.; MITCHUAL, S. J.; FRIMPONG-MENSAH, K. *Optimisation techniques for minimising saw teeth deflection and lumber thickness variation*. **Journal of Precision Engineering**, v.30, p. 39-46, 2005.

OKAI, R. et al. *Application of a novel technique for band sawing using a tip-insertede saw regarding surface profiles*. Kumasi – Ghana : **Holz und Roh und Werkstoff**. v. 63, p. 256-265, 2005.

ORLOWSKI, K; WASILEVSKI, R. *Study washboarding phenomenon in frame sawing machines*. Gdansk –Poland: **Holz und Roh und Werkstoff**. v.64, p. 37-44, 2005.

PAHLITZSCH, G.; SANDVOß, E. *Verschleißuntersuchung beim Fräsen von Faserhartplatten*. **Holz und Roh und Werkstoff**. v.28, p. 245-254, 1970.

ROCHA, M.P. **Técnicas e planejamento de serrarias**. Curitiba: FUPEF, p. 121,2002.

SALES, C. **La Scie a ruban: théorie et pratique du sciage des bois em grumes**. Nogent sur Marne, França: Centre Technique Forestier Tropical, p. 152, 1990.

SANDVIK. **El Manual: Produccion, uso y mantenimiento de hojas de sierra cinta para madera**. Sandviken. Sweden: Sandvik Steel AB, (1999?). Disponível em [http://www.sandvik.coromant.com/pt/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/introduction/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/pt/knowledge/materials/cutting_tool_materials/introduction/pages/default.aspx). Acesso em : 01 mai 2016.

SANTINI, A. **Estudo do processo e dos parâmetros de corte no serramento da madeira por serra de fita**. 2000. 175p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SHEIKH-AHMAD, J.Y.; BAILEY, J.A. *The wear characteristics of some cemented tungsten carbides in machining particleboard*. **Wear**. v. 225, p. 256–266, 1999.

SINN, G et al *Ultrasonic-assisted cutting of wood*. Wien – **Österreich: Journal of Materials Processing Technology**. v.170, p. 42-49. 2005.

SOUZA, A. R. de et al. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. *Rev. Bras. Ensino Fís.* v.33, 5p. (2011).

STEWART, H.A.; WITHEFORD, T.J.; BECHERER, B.A. *A comparision of high speed steels for wood machinig*. **Tribology International**. v. 27, p. 342-348, 1992.

TANAKA, C. et al. *Experimental Studies on Band Saw Blade Vibration*. Matsue – Japan : **Wood Science and Technology**. v. 15, p. 145-159, 1981.

TAYLOR, J. *The effect of Bandsaw stresses on blade stiffness and cutting accuracy*. Doctor Thesis at Department of Mechanical Engineering. The University of British Columbia. Canadá. 1993.

TANSEL, I.N. et al. *Tool wear estimation in micro-machining*. Miami: **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 40, p. 599-608, 1999.

TERUEL, B. J. Controle automatizado de casas de vegetação: Variáveis climáticas e fertigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande Mar. v. 14. 2010.

TETI, R.; JEMIELNIAK, K.; O'DONNELL, G.; DORNFELD, D. *Advanced monitoring of machining operations*. Italy. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**. v.59, p.717-739, 2010

THALER, T.;KRESE, B; GOVEKAR, E. *Stability diagrams and chatter avoidance in horizontal band sawings*. Slovenia. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v.64, p. 81-84, 2015.

TIMONEN, S.M. *Effect of cutting speed on the wear and dulling of saw teeth*. **Lesoni Zh**. v.13, p. 85-88, 1970.

TRUGILHO, P. F. et al. Corrosão e desgaste químico das lâminas de aço utilizadas no desdobro da madeira. **Cerne**, Lavras, MG, v.8, n.2, p. 26-41, 2002.

TUSET, R; DURAN, F. **Manual de Maderas Comerciales, Equipos y Procesos de Utilizacion**. Montevideo. ed. Hemisferio Sur. p. 696, 1986.

ULSOY, A.G.; MOTE JR., C.D.; SZYMANI, R. *Principal Developments in Band Saw Vibration and Stability Research*. Berkeley - USA: **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 36, p. 273-280, 1978.

VIDAURRE, G.B. **Efeito dos parametros do dente de serra de fita na qualidade e produtividade da madeira serrada de eucalipto**.2006.71p. Dissertação (Mestrado em ciências Ambientais e Florestais) Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2006.

WANZUITA-HOLZ, M. **Contato Waldemar - UNESP / Itapeva** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por e-mail de Mário Wanzuita da empresa Holtz Consultoria. 04 maio 2016.

WEINIG. **Das Lexikon**. 6 ed. Oberkochen - Deutschland: Weinig Group, p. 856, 2011.

YANG, B., MOTE JR., C.D. *Vibration control of band saws: Theory and experiment*. Berkeley - USA: **Wood Science and Technology**. v. 24, p. 355-373, 1990.

ZHU, N. et al. *Automatic detection of washboarding in bandsaws*. Matsue - Japan: **Japan Wood Sci**, v. 47, p. 102-108, 2001.

## APÊNDICE A

### PROGRAMA UTILIZADO NA PROGRAMAÇÃO DO *SOFTWARE* ARDUINO :

```

void loop() {
  float sensorDef = analogRead(A5);
  float sensorQual= analogRead(A0);
  int ciclo = 1000*10;2
  int i = 0;
  delay(ciclo);
  for(i=1;i<15;i++){
    sensorDef = analogRead(A5);
    Serial.print(sensorDef);
    Serial.print(",");
    delay(20);
  }
  sensorQual= analogRead(A0);
  Serial.println(sensorQual);
}
#include <SD.h>
File myFile;
int cont=0;
void setup()
{
  // Open serial communications and wait for port to open:
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for Leonardo only
  }
  Serial.print("Initializing SD card...");
  pinMode(10, OUTPUT);
  if (!SD.begin(4)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    return;
  }
  Serial.println("initialization done.");
  myFile = SD.open("DB.txt", FILE_WRITE);
  if (myFile) {
    Serial.print("Writing to test.txt...");
    // close the file:
    myFile.close();
    Serial.println("done.");
  } else {
    // if the file didn't open, print an error:
    Serial.println("error opening test.txt");
  }
  // re-open the file for reading:
  myFile = SD.open("DB.txt");
  if (myFile) {
    Serial.println("DB.txt:");
    // read from the file until there's nothing else in it:
    while (myFile.available()) {
      Serial.write(myFile.read());
    }
    // close the file:
    myFile.close();
  } else {
    // if the file didn't open, print an error:

```

**APÊNDICE A (continuação)**

```
        Serial.println("error opening test.txt");
    }
}
void loop()
{
// Open serial communications and wait for port to open
myFile = SD.open("DB.txt", FILE_WRITE);
if (myFile) {
float sensorDef = analogRead(A5);
int ciclo = 2*10;
int i = 0;
delay(ciclo);
cont++;
for(i=1;i<15;i++){
    sensorDef = analogRead(A5);
    myFile.print(sensorDef);
    myFile.print(";");
    delay(20);
}
myFile.println(cont);
    // close the file:
    myFile.close();
}
// re-open the file for reading:
myFile = SD.open("DB.txt");
if (myFile) {
    myFile.close();
}
    // nothing happens after setup
}
```