UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**Estudo do Processo e dos Parâmetros de Corte
no Serramento da Madeira por Serra de Fita.**

Alessandro Santini

Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017144

Dissertação apresentada à Área de
Ciência e Engenharia de Materiais, da
EESC / IFSC / IQSC da Universidade
de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Ciência e Engenharia de
Materiais.

São Carlos
2000

Class.	TESE - EESC
Cutt.	5075
Tombo	T0223/00

st 1134/136

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

S235e Santini, Alessandro
Estudo do processo e dos parâmetros de corte no
serramento da madeira por serra de fita / Alessandro
Santini. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto
de Química de São Carlos-Universidade de São Paulo,
2000.

Área: Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio
Gonçalves.

1. Usinagem da madeira. 2. Serra de fita.
3. Processo de serramento. I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 – CEP 13560-970 - São Carlos-SP – Brasil

Tel: (0xx16) 2739589/ Fax: (0xx16) 2739777

E-mail: erica@ifsc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **ALESSANDRO SANTINI**, APRESENTADA A ÁREA INTERUNIDADES EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA EESC-IFSC-IQSC, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM **30/05/2000**.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. **Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves**-Orientador (UNESP/Bauru)

Prof. Dr. **Ivaldo De Domênico Valarelli** (UNESP/Bauru)

Prof. Dr. **Reginaldo Teixeira Coelho** (EESC/USP)

AGRADECIMENTOS

À minha família, namorada e amigos pelo incentivo e compreensão infundáveis.

Ao professor Doutor Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, pela orientação, amizade, e confiança no trabalho.

Ao professor Doutor Ivaldo De Domenico Valarelli e ao técnico acadêmico Ulisses Frazão de Oliveira Tiburcio, da UNESP - Campus de Bauru, pela amizade e pela colaboração.

Ao professor Doutor Angelo Cagnon por ceder o equipamento de medição necessário para a aquisição dos dados.

Ao diretor geral Sr. Waldemar Ruiz e ao gerente administrativo Sr. Henrique Ruiz da Serraria Santo Antônio de Agudos Ltda, que permitiram a realização do experimento na serraria.

À Sra. Elena Luiza Palloni Gonçalves e Sra. Elenise Maria de Araujo bibliotecárias da Escola de Engenharia de São Carlos, pelo auxílio prestado.

Aos professores e funcionários da USP de São Carlos e da UNESP de Bauru, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	1
1.2 OBJETIVO.....	1
1.3 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIAS DO TRABALHO.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3 USINAGEM DA MADEIRA POR SERRA DE FITA	
3.1 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA RELATIVAS AO CORTE.....	19
3.1.1 Anisotropia da Madeira.....	19
3.1.2 Defeitos da Madeira.....	20
3.1.3 Propriedades da Madeira.....	26
3.2 O PROCESSO DE SERRAMENTO.....	34
3.2.1 Mecanismo de Formação do Cavaco.....	34

3.2.2	Parâmetros de Corte.....	36
3.2.3	Operações de Corte.....	43
3.2.4	Classificação das Máquinas.....	44
3.2.5	Interação entre Lâmina e Máquina.....	51
 4 FERRAMENTA DE CORTE		
4.1	GENERALIDADES.....	61
4.2	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E DIMENSIONAIS.....	61
4.3	PREPARAÇÃO DA LÂMINA.....	69
4.4	DESGASTE, MATERIAIS E TRATAMENTOS DA LÂMINA.....	74
4.4.1	Desgaste.....	74
4.4.2	Materiais da Ferramenta.....	82
4.4.3	Tratamento Superficial e Térmico.....	84
 5 SERRAMENTO EM OPERAÇÃO DE DESDOBRO (ESTUDO DE CASO)		
5.1	Introdução.....	86
5.2	Metodologia e Procedimentos Experimentais.....	87
5.3	Apresentação dos Resultados.....	91
5.4	Análise e Discussão dos Resultados.....	95
6	CONCLUSÃO.....	98
 7 BIBLIOGRAFIA		
7.1	REFERENCIADA.....	101
7.2	CONSULTADA.....	104
8	GLOSSÁRIO.....	107

Figura 3. 13 - Espessura de cavaco real e calculada.....	38
Figura 3. 14 - Grandezas de corte de dentes recalçados e travados.....	38
Figura 3. 15 - Forças atuantes no corte.....	39
Figura 3. 16 - Espessura do cavaco x esforço de corte.....	42
Figura 3. 17 - Serra de fita vertical.....	45
Figura 3. 18 - Serras de fita.....	45
Figura 3. 19 - Serras de fita horizontal.....	46
Figura 3. 20 - Serra de fita inclinada.....	46
Figura 3. 21 - Deslocamentos relativos entre lâmina e madeira.....	48
Figura 3. 22 - Regulagem dos volantes.....	50
Figura 3. 23 - Perfil dos volantes.....	51
Figura 3. 24 - Tensões.....	55
Figura 3. 25 - Deflexão no plano transversal da lâmina.....	59
Figura 3. 26 - Interação entre lâmina e volante.....	60
Figura 4. 1 - Geometria de um dente de serra.....	63
Figura 4. 2 - Tipos de perfil para lâminas de serra larga e estreita.....	65
Figura 4. 3 - Ilustração geométrica para cálculo do volume da garganta.....	67
Figura 4. 4 - Folga lateral em um dente de serra recalçado.....	69
Figura 4. 5 - Campo de tensão e compressão formado na largura da lâmina, após tensionamento.....	73
Figura 4. 6 - Deformação elástico-plástico devido ao tensionamento.....	73
Figura 4. 7 - Evolução do perfil do dente em função do desgaste.....	75
Figura 4. 8 - Medida do desgaste.....	76
Figura 4. 9 - Deformação da cunha em função da temperatura.....	77
Figura 4.10 - Influência da temperatura na dureza dos materiais.....	82
Figura 5. 1 - Carregamento das toras.....	89
Figura 5. 2 - Posicionamento das toras no estaleiro.....	89

Figura 5. 3 - Tora no carro de avanço..... 90

Figura 5. 4 - Momento do serramento..... 90

Figura 5. 5 - Tora sendo virada..... 90

Figura 5. 6 - Rendimento do motor..... 91

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3. 1 - Valores médios de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa do ar.....	27
Tabela 3. 2 - Valores de densidade para algumas espécies de madeira.....	34
Tabela 3. 3 - Valores de f_1 e f_2 para os volantes de perfil "b" e "c".....	51
Tabela 4. 1 - Dimensões de serras de fita comercializadas.....	64
Tabela 4. 2 - Passos recomendados para lâminas.....	68
Tabela 4. 3 - Composição do stellite e sua nomenclatura americana.....	83
Tabela 5. 1 - Resultados da TORA 1.....	92
Tabela 5. 2 - Resultados da TORA 2.....	93
Tabela 5. 3 - Resultados da TORA 3.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS

μm	10^{-6} metros
Ra	Rugosidade média
AM	Estado do Amazonas
C	Carbono
$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$	Glucose
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	Glicose
Co	Cobalto
Cr	Cromo
DF	Distrito Federal
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
HRc	Dureza Rockwell C
IOG	Índice de ocupação da garganta
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K20	Classe de carbeto de tungstênio
Kw	Kilowatt
M	Ponto de máxima tensão de flexão na garganta do dente
Máx.	Máximo
Min.	Mínimo
Mo	Molibidênio
MPa	Mega Pascal
$n(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)$	Unidade básica da celulose
Ni	Níquel
O	Oxigênio
OH	Hidroxila
Rpm	Revoluções por minuto
S4	Classe de aço rápido
SiO_2	Óxido de silício
SP	Estado de São Paulo
TTT	Diagrama de tempo, temperatura e transformação
U.S.	Estados Unidos
V	Vanádio
W	Tungstênio

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Ângulo do plano de cisalhamento na formação de cavaco
β	Ângulo de cunha da aresta de corte
φ	Ângulo de defasagem
α	Ângulo de folga
γ	Ângulo de saída
ρ	Densidade
δ'	Espessura do cavaco calculado
δ	Espessura do cavaco real
τ	Tempo de um ciclo completo da lâmina
τ_1	Tempo de passagem do ponto M sobre um volante
τ_2	Tempo de passagem do ponto M sobre um vão livre
θ	Ângulo de inclinação dos volantes
σ_a	Amplitude
σ_c	Tensão permanente devido à tensão de compressão
σ_F	Tensão de flexão máxima
σ_{max}	Tensão máxima
$\sigma_{média}$	Tensão média
σ_{min}	Tensão mínima
σ_p	Tensão de esticamento
1-Z	Coefficiente adimensional de "KIENZLE"
Dv	Diâmetro do volante
e	Espessura da lâmina
F	Força resultante
F1	Força agindo na direção de corte
F2	Força agindo na direção de avanço
F3	Força agindo perpendicularmente ao plano da lâmina
Fa	Força de avanço
Fc	Força de corte
FE	Esforço de tração aplicado ao vão livre
Ff	Força paralela
Fn	Força normal
H	Altura de corte
K	Largura da aresta de corte
k	Largura de corte
Kc	Coefficiente de concentração de tensão
Ks1	Pressão específica de corte
L	Comprimento do vão livre
Mi	Massa inicial da madeira

Ms	Massa de madeira seca
m	Massa
Nc	Potência de corte
n	Número de moléculas
p	Passo
R	Número de revoluções por minuto do volante motor
rd	Raio da garganta do dente
s	Folga lateral
T	Trabalho necessário para o corte
UBS	Teor de umidade a base seca
UBU	Teor de umidade a base úmida
v	Volume de madeira
V	Volume do material retirado por dente
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço
w	Largura dos volantes

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o processo de serramento por serra de fita, abordando fatores relativos ao desempenho de corte nas diversas operações deste processo. Na seqüência, apresentam-se os seguintes estudos específicos: características da madeira que exercem influência nas operações de serramento por serra de fita; o processo de serramento e; ferramentas de corte. A fim de se verificar os aspectos teóricos especificados na literatura para adequação do processo de serramento, efetuou-se um estudo de caso em uma serraria, usinando-se a espécie de madeira *Pinus oocarpa* em operação de desdobro com serra de fita vertical. Neste estudo, realizou-se a medição da potência consumida durante o corte com aquisição de dados em tempo real, a qual possibilitou calcular a potência de corte média.

Palavras Chaves:

1. Usinagem da Madeira.
2. Serra de Fita.
3. Processo de Serramento.

ABSTRACT

The present work shows a bibliographical review on band sawing, in respect to the factors related to cutting performance during the several operations of such process. Moreover, the following studies are presented: wood characteristics influencing the band sawing; sawing process itself; and cutting tools. In order to check the theoretical aspects encountered in the literature to adequate the sawing process, a case study in a sawmill plant has been carried out. *Pinus oocarpa* wood species has been machied by unfolding using a vertical bandsaw. The consumed power during the cutting process was measured by a data acquisition system in real time, what allowed the calculation of the average cutting power.

Keywords: 1. Wood Machining.
 2. Band Saw.
 3. Sawing Process.

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

A operação de serramento consiste em seccionar uma peça de madeira, retirando-se material com auxílio de uma ferramenta dentada, que a cada intervenção retira uma quantidade de madeira, denominada serragem.

O serramento com serra de fita é usado em todos os níveis da manufatura da madeira, possui as vantagens de trabalhar a altas velocidades, alto rendimento, baixo desperdício de madeira, fácil manuseio e, no caso das lâminas estreitas, podem cortar em curvas e formas irregulares difíceis ou impossíveis de serem feitas com outras ferramentas.

De acordo com KOCH & SZYMANI (1993) e BEROLZEIMER (1982), a serra de fita foi patenteada no início do século XIX, mas apenas em 1869 a primeira serra de fita funcional foi construída.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo principal, estudar o processo de serramento de madeira por serra de fita, a fim de registrar os conhecimentos adquiridos por outros pesquisadores que estudaram o desempenho de corte deste processo. Paralelamente, realizar um estudo de caso para confrontar as condições de serramento aplicadas na prática e verificar suas correspondências com as condições de corte citadas na literatura.

1.3 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIAS DO TRABALHO

Selecionar uma serra é uma decisão importante, ainda após a escolha, a serra deve ser ajustada e operada com certas especificações para um desempenho adequado. O conhecimento das relações entre o material a ser cortado, maquinário e o processo de serramento é essencial neste caso.

Freqüentemente, os operadores não possuem o conhecimento adequado para ajustar a capacidade do equipamento ao material a ser cortado. O que pode ser comprovado pela seguinte frase: *"Há menos considerações técnicas dadas às serras que a qualquer outro componente de uma serraria"*, (LUNSTRUM, 1986).

No entanto, o aumento do custo da matéria-prima e da mão-de-obra, a necessidade de cortar madeira de difícil usinagem não utilizada no passado, para substituir espécies ameaçadas de extinção e a busca da eficiência, da qualidade e da produtividade, para a sobrevivência das empresas no setor, indicam a necessidade de estudos e de mais rápido desenvolvimento do processo.

Por serem as serras os principais equipamentos utilizados na indústria da madeira, desde as primeiras operações de seccionamento das toras, até o produto final, estas precisam ser vistas como equipamentos essenciais ao processo de usinagem da madeira, necessitando de constantes pesquisas. Deste ponto de vista, este trabalho tem grande importância pelo seu caráter pioneiro no estudo de serra de fita para usinagem de madeiras, registrando os principais trabalhos realizados na área e apresentando um estudo de caso, que serão pontos de partida para novos trabalhos e também como fonte de referência bibliográfica para todos aqueles relacionados com o processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se neste item, os trabalhos de maior importância no estudo do processo de serramento por serra de fita, que nos últimos anos vem recebendo maior atenção em relação a outros processos de serramento.

CHIAKI, T. et al., (1999) - Estudaram a possibilidade de detectar danos em uma serra de fita devido à presença de sílica, metais ou nós muito duros, durante o processo de serramento, medindo-se a energia de emissão acústica.

Utilizaram uma máquina de serra de fita de 700 mm de diâmetro de volantes, com distância entre centros de 1250 mm, e quatro lâminas de serra com três dentes danificados e um normal respectivamente. Foram usados para detectar e medir o sinal de emissão acústica um microfone, um amplificador, um analisador de sinal e um computador.

Observaram que a energia acústica gerada por um dente normal, imediatamente após um dente danificado, foi maior que a gerada pelo dente danificado, contudo a energia gerada por cada dente normal foi bem menor e aproximadamente igual em módulo para cada dente. Dessa forma, concluíram que é possível detectar um defeito em um dente de uma lâmina de serra de fita usando o método de emissão acústica.

EKLUND, U., et al., (1999) - Desenvolveram e avaliaram um método de medida do deslocamento da lâmina em relação ao movimento de avanço de uma viga de madeira, em circunstâncias de produção de uma serra de fita em uma serraria, utilizando técnicas de análise de imagens.

Usaram para os experimentos uma resserra de 1500 mm de diâmetro de volantes e corpos de prova de Green Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) de 180 mm de altura, 100 mm de largura e 2,7 m de comprimento. Os movimentos da viga de madeira e o desvio da serra eram registrados por 6 sensores e uma câmera, conectados a um computador. Observaram que a variação medida correspondia adequadamente com o desvio da ponta do dente da serra registrado pela imagem.

IKAMI, Y., et al., (1999) - Estudaram a relação entre a qualidade das peças de madeira Sugi serrada, a quantia de cortes possíveis na tora, tempo de serramento, tempo de decisão da escolha dos parâmetros adequados para o corte e influência dos nós sobre o serramento. O equipamento utilizado foi uma serra de fita para desdobro equipada com carrinho de avanço de toras e duas câmeras de vídeo para registrar o tempo e o trabalho.

KIMURA, S. et al., (1999) - Analisaram a rugosidade e marcas da superfície serrada, como marcas onduladas, utilizando os seguintes tipos de lâminas de serra de fita remodeladas, (Figura 2.1):

Tipo 1 - Lâmina com dentes de stellite e recalcados, com 19 mm de passo;

Tipo 2 - Lâmina com dentes alternados de stellite e convencional, recalçadas, com 38 mm de passo;

Tipo 3 - De passo irregular e recalçadas;

Tipo 4 - Com travamento aleatório;

Tipo 5 - Com grupos de dentes travados em um lado e grupos de dentes travados de outro lado;

Tipo 6 - Dentes travados com passo diferente, e com um conjunto de três dentes em que um dente não tem ação de serramento.

Figura 2.1 - Lâminas com dentes remodelados (adaptado de KIMURA et al., 1999).

Neste trabalho, os autores concluíram que é possível controlar as ondulações com lâminas de serra com dentes remodelados, contudo observaram que a rugosidade não é perfeitamente controlada, pois a madeira serrada apresenta rugosidade devido ao próprio processo.

PROKOFJEV, F. et al., (1999) - Apresentaram novos modelos de máquina de serra alternativa, circular e de fita idealizados pelos pesquisadores. Como característica principal destas máquinas ressaltam-se as guias aerostáticas, que produzem reduzido atrito com a lâmina e garantem rigidez e estabilidade. Entre os novos projetos, a mais inovadora foi a serra de fita, na qual a lâmina era apoiada por duas guias aerostáticas e não mais por volantes, conforme Figura 2.2.

Figura 2.2 - Máquina de serra de fita com guias aerostáticas (adaptado de PROKOFJEV et al., 1999).

SAWADA, Y., et al., (1999) - Analisaram e relacionaram o som emitido por uma máquina de afiar lâminas de serra, no decorrer das etapas de afiação. Utilizaram uma lâmina de serra de stellite 20, de 1,08 mm de espessura e 125 mm de largura.

Elaboraram 4 estágios de afiação para os dentes de serra e perceberam que tanto a frequência, como o nível de pressão variaram de um estágio para outro, e em um mesmo estágio, quando o rebolo ora estava em contato com a garganta, ora com o dorso dos dentes, Figura 2.3.

Figura 2.3 - Afiação do dente (SAWADA, et al., 1999).

TAYLOR, J., et al., (1999) - Estudaram métodos estabelecidos por cinco pesquisadores para o cálculo da força necessária em máquinas de serra e picadores, com a intenção de desenvolver um método teórico que não necessita de testes preliminares, e que assegura razoável precisão na estimativa da força requerida por máquina de usinar madeira macia.

Para tanto, idealizaram ensaios para avaliar cada método e as variações de um para outro, e construíram gráficos com os dados devidamente ajustados. Todos os resultados coletados apresentaram um erro médio de mais 8% e um desvio de 25%.

Concluíram que cálculos exatos de força exigida pelas máquinas são pouco prováveis, devido à natureza variável da madeira e dos equipamentos e que os diversos métodos existentes para prever força de corte sem resultados iniciais de serramento são dispersos, contudo a adição de um fator de segurança adequado assegura a estimativa da força exigida por diversos equipamentos e espécies de madeira.

CHIAKI Y.J. & ZHU, G., (1997) - Investigaram o acabamento superficial no serramento de madeira congelada e não congelada da espécie Sugi (*Cryptomeria japonica D Don*). Seus experimentos foram realizados em uma serra de fita de 700 mm de diâmetro de volantes, uma lâmina de 4700 mm de comprimento, 51 mm de largura, 0,8 mm de espessura, 5 mm de altura de dente e 20 mm de passo. As tensões de esticamento usadas foram 30,1 a 48,4 N/mm², alternadas com velocidades de avanços de 3 a 12 m/min e uma velocidade de corte de 14,7 m/s. Um rugosímetro foi usado para medir a rugosidade das amostras serradas.

Observaram que, nas condições de corte dos experimentos, as peças congeladas cortadas possuíam melhores acabamentos que as não congeladas. Para explicar este fato, concluíram que o menor coeficiente de atrito entre a madeira e o metal da lâmina das peças congeladas eram responsáveis pela melhora no acabamento em relação às não congeladas. Outro motivo levantado pelos pesquisadores, foi a menor deformação e recuperação elástica da madeira congelada.

DUGDALE, D. S. & SARWAR, M., (1996). Examinaram o efeito do revestimento de nitreto de titânio e do revestimento de cromo na resistência à fadiga da lâmina e compararam os resultados com serras sem revestimento.

Os testes foram realizados em uma máquina de flexão alternada, com amostras de lâminas de baixo teor de liga. Exatamente no meio da amostra a garganta de dente foi modificada, tornando-se mais profunda. As gargantas dos dentes foram polidas alcançando rugosidade superficial média de 2.0 μmRa , valor este mantido sem alteração significativa após o tratamento de revestimento. O revestimento de nitreto de titânio foi aplicado por processo de deposição de vapor, atingindo uma espessura de 5 μm , já o revestimento de cromo foi eletro depositado.

Em todos os testes, a fratura ocorreu por crescimento de uma trinca na garganta central modificada das amostras, que se estendeu em uma linha até a falha. Os pesquisadores concluíram que o revestimento de nitreto de titânio aumenta de fato a resistência à fadiga (aumento de 44%), enquanto que o revestimento de cromo diminui (diminuição de 53%).

LOEHNERTZ, S.P.; COOZ. I.V. & GUERREIRO, J. (1996). Estudaram a tecnologia usada no serramento e problemas encontrados pelas serrarias de madeiras duras nos seguintes países tropicais: Gana, Brasil, Venezuela, Indonésia e Malásia.

Os autores observaram que a densidade e o conteúdo de sílica é um desafio para o processamento de muitas madeiras duras nesses países. A serra de fita é a máquina mais utilizada e empregada em diversos tamanhos e configurações. Os parâmetros da serra e operação variam de acordo com a natureza das espécies e são influenciados pelo costume local e conhecimento técnico do processo.

Principais problemas: pouca manutenção; pessoal não treinado; equipamento obsoleto; inadequada geometria dos dentes; e baixa resistência ao desgaste. Em relação ao Brasil, o problema principal encontrado foi o baixo avanço da madeira devido ao emprego de máquinas de pequena potência, uso de lâminas com geometria dos dentes inadequadas, estreita e com pouco tensionamento.

MURATA, K. et al., (1993) - Analisaram a performance de lâminas com pontas de dentes de quatros materiais diferentes e examinaram a acuracidade da largura da ponta do dente e a força de corte. Os materiais estudados foram os seguintes:

Stellite nº 1 - (50% Co, 33% Cr e 13% W), dureza de 54 a 56 HRc;

Stellite nº 12 - (58% Co, 29% Cr e 9% W), dureza de 48 a 51 HRc;

Aço rápido S4 - (3.8 a 4.5% Cr, 4.5 a 5.5% Mo, 5.5 a 6.7% W e 1.6 a 2.2% Va) dureza de mais de 63 HRc;

Metal duro K20 - (92 a 95% de carbeto de tungstênio, 0 a 3% de carbeto de titânio e de tântalo, e 5 a 8% de Co), dureza de mais de 89 HRa.

Utilizaram para os ensaios uma máquina de serra de fita com uma velocidade de corte de 36 m/s e três velocidades de avanço da madeira, dotada de um dispositivo de medição de força (células de carga com extensômetros). As espécies de madeira serradas foram: red meranti (*Shorea sp. (rubrosshorea)*), keruing (*Dipterocarpus sp.*) e selangan batu (*Shorea sp. (shorea)*).

Verificando a tolerância da ponta dos dentes com um micrômetro, observaram que esta foi melhor para o dente com stellite nº 12 e aço rápido, seguidas pelo stellite nº 1, e por último para o metal duro, porém relataram que estes resultados foram influenciados pelo tipo de afiação e pela técnica de soldagem de cada material no dente.

Quanto à força paralela ao corte, esta foi menor para dentes com pontas de aço rápido, seguido pelo stellite nº 12 e maiores com o stellite nº 1 e metal duro. E a força perpendicular ao corte foi menor para as pontas de dente de stellite nº 12, seguida pelo stellite nº 1 e pelo metal duro e maior para o aço rápido.

Dos resultados obtidos, os autores concluíram que a lâmina com pontas de dentes de aço rápido apresentou melhores resultados considerando a acuracidade da ponta do dente e a força de serramento.

MURATA, K. et al., (1993 a) - Abordaram a potência necessária, acuracidade do serramento e acabamento superficial utilizando os mesmos materiais na ponta dos dentes, mesmas espécies de madeira e parâmetros de corte apresentados no trabalho anterior. O consumo de força do motor principal foi medido por um medidor eletrônico.

Os experimentos mostraram que o consumo de potência aumenta com o aumento de velocidade de avanço da madeira e foi menor com a lâmina com dentes de aço rápido, seguida pela lâmina com stellite nº 12 e nº 1 e maior para a lâmina com pontas de metal duro. Quanto à acuracidade do serramento, foi melhor para a lâmina com stellite nº 1, seguida pela lâmina com pontas de metal duro e aço rápido e pior para a lâmina com stellite nº 12. Em relação à rugosidade, esta aumenta com o aumento da velocidade de avanço e foi menor para a lâmina com aço rápido e aproximadamente as mesmas para as outras.

TANAKA, C., (1993) - Apresentou um sistema de serramento automático que controla o desvio da lâmina, variando o avanço da madeira e analisou também a influência da orientação das fibras da madeira. A espécie de madeira utilizada para os ensaios foi a Yezo spruce (*Picea jezoensis*).

O sistema desenvolvido neste estudo constituía-se de: sensor de deslocamento, computador, controlador de avanço, inversor de frequência e servo motor anexado ao dispositivo de avanço, conforme Figura 2.4.

Figura 2.4 - Dispositivo de controle de desvio (adaptado de TANAKA, 1993).

O autor observou que o desvio da ponta do dente era afetado pelo ângulo formado pela direção das fibras e a lâmina, e era máximo a 90° , e concluiu, ainda, que o sistema desenvolvido possibilita o controle do desvio da lâmina, pelo controle do avanço da ponta do dente.

LEHMANN, B., F., & HUTTON, S., G., (1993 e 1991) - Apresentaram um modelo computacional que simula o comportamento da lâmina durante o serramento, incluindo o efeito do contato entre o corpo da lâmina e a madeira.

No primeiro estudo o efeito da espessura da lâmina, tensão de esticamento e superfície de folga sobre o desvio da serra foram analisados. Concluíram que, aumentando a rigidez das lâminas e a superfície de folga, a acuracidade do serramento melhora.

No segundo estudo, o modelo computacional é usado para estudar o efeito dos parâmetros da lâmina (espessura, tensão de esticamento, largura, rigidez e comprimento de corte) e das forças laterais de corte. Observaram que quando há pouco ou nenhum contato do corpo da lâmina com a superfície serrada, a acuracidade do serramento depende apenas da rigidez da ponta do dente e das forças laterais de corte.

HUTTON, S., G. & LEHMANN, B., F., (1991) - Apresentaram resultados analíticos e experimentais que mostram o papel dos sistemas de esticamento da lâmina durante o serramento.

Os experimentos foram conduzidos em uma serra de desdobro vertical com um sistema de esticamento hidráulico. Fórmulas matemáticas foram usadas para fornecer dados quantitativos da rigidez e frequência natural de vibração da lâmina, deslocamento do volante superior, tensão e força na lâmina.

Observaram que o sistema de esticamento diminui o efeito do aumento do comprimento da lâmina devido ao aquecimento durante serramento. E, ainda, que este sistema não é importante em termos de resposta da lâmina quanto à força de corte (não age diretamente no serramento), contudo minimiza a sobrecarga devido à serragem presa entre os volantes e a lâmina.

HUBER, H., (1985) - Aborda o tratamento térmico de uma lâmina, que é dividido em:

Austenitização - O diagrama Fe-C determina a temperatura de austenitização dos aços carbono não ligados, os elementos de liga manganês e níquel diminuem essa temperatura e o cromo, silício e tungstênio aumentam. O autor fornece alguns gráficos de temperatura de austenitização e dureza dos aços 75Cr1, 80Cr2 e 74NiCr2 e esclarece que, apesar de aqueles diagramas darem idéia de que a temperatura de austenitização é ilimitada, é errado, pois a medição de dureza não considera a microestrutura, que é um fator de grande importância para as propriedades mecânicas da serra depois do tratamento térmico. E conclui que para as propriedades mecânicas ideais é necessário observar adequadamente as condições de austenitização: materiais diferentes freqüentemente possuem valores adequados para sua composição química.

Resfriamento - É tão importante quanto a austenitização e a têmpera. Por um lado decide se a transformação da microestrutura ocorre completamente e se a ferramenta é ou não prejudicada com distorções e trincas. Com o resfriamento o carbono solubilizado durante a austenitização deve permanecer solubilizado, não pode haver tempo para o carbono sair da célula por difusão. Os parâmetros de resfriamento são tirados do diagrama TTT (tempo, temperatura e transformação). HUBER deixa claro que a razão de resfriamento para obter 100% de martensita e maior dureza não é ideal, pois dessa forma há aumento de tensões internas no material (devido à martensita possuir volume maior em comparação com a austenita), pois para ferramentas as tensões devem ser equilibradas para evitar distorções e trincas.

Têmpera - HUBER aconselha realizar testes de têmpera com amostras do material antes de temperá-lo. Os testes devem começar com baixas temperaturas e depois de medir a dureza, a temperatura deve então ser aumentada se houver necessidade.

KRILOV, A. (1985) - Avaliou a velocidade de avanço no corte de madeiras duras e com cristais de silício em uma serra de fita. Para tanto, fez uma comparação usando três tipos de lâminas: convencionais, parcialmente modificadas e completamente modificadas.

O pesquisador usou uma serra de fita vertical automática de desdobro, em uma serraria que processava a madeira Brushbox (*Lophostemon confertus*), uma espécie de alta densidade (690 Kg/m^3), alto teor de sílica ($0,97 \text{ g/100}$) e de difícil processamento. Os três tipos de lâminas foram introduzidas aleatoriamente na rotina da serraria para assegurar resultados estaticamente seguros.

Foram usadas velocidades de avanço ideais para cada tipo de dente, sendo: para o perfil de dente convencional aproximadamente 30 m/min , para o perfil parcialmente modificado de 30 a 33 m/min , e para totalmente modificado de 40 a 45 m/min . O pesquisador conclui que o perfil totalmente modificado pode substituir o convencional, com a vantagem de trabalhar a velocidades de avanço maiores.

FUJII, Y.; et al., (1984) - Estudaram a ação de forças que agem em um lâmina de serra, com a intenção de esclarecer seu desvio, responsável em diminuir a acuracidade, a precisão e aumentando as perdas. As componentes principais de força do processo de serramento foram examinadas variando-se o avanço por dente, sendo elas: força agindo na direção de corte ($F1$), na direção de avanço ($F2$) e perpendicularmente ao plano da lâmina ($F3$).

O equipamento utilizado para o experimento foi uma serra de fita vertical (800 mm de diâmetro de volantes) com um carro de avanço especialmente adaptado, contendo uma estrutura de suporte da madeira sobre quatro anéis elásticos, fabricados de uma liga de alumínio e extensômetros adequadamente posicionados.

A madeira serrada foi a White seraya (*Parashorea sp.*), a velocidade de corte de 25 m/s e velocidades de avanço entre 3 a 60 m/min. A Figura 2.5 ilustra o experimento, onde as dimensões da madeira são em milímetros.

Figura 2.5 - Máquina de serra de fita adaptada (FUJII et al., 1984).

Observaram com este experimento que a lâmina desvia pela ação de " F_2 " e " F_3 ", e que particularmente o efeito de " F_3 " é maior, pois age no sentido de flexionar a lâmina.

KATO, K., (1982). Investigou a relação entre velocidade de avanço e desvio lateral da lâmina em uma máquina de serra de fita cortando Ezomatsu (*Picea jezoensis carr.*). Uma máquina com diâmetro dos volantes de 1200 mm foi escolhida para testes usando cinco tipos de lâminas sob diversas condições.

O autor evidenciou a influência direta da espessura da serra e seu tencionamento perante a velocidade de avanço, do desvio e da flexão. Observou, ainda, que a deflexão lateral aumenta linearmente com o aumento da velocidade de avanço até um certo ponto e aumenta exponencialmente acima desse ponto.

HUBER, H., (1982) - Retrata os possíveis danos causados às serras durante as operações de fabricação. Esses danos ocorrem devido a perdas de serras durante a fabricação ou falhas desta ferramenta em trabalho. Foram abordados os seguintes tipos de danos:

O material - Em relação à produção do aço, muitos elementos devem ser removidos do banho de fundido, retirados sobretudo pela escória que flutua na superfície e absorve esses elementos. Contudo, uma certa quantidade de inclusões não metálicas permanece no material, favorecendo falha por fadiga.

Tratamento térmico - O tratamento térmico de serras consiste do aquecimento até a temperatura de endurecimento, têmpera e revenimento para alcançar a dureza desejada. Durante a temperatura de endurecimento (austenitização) o crescimento de grão deve ser evitado, para propriedades mecânicas do aço mais apropriadas. E o resfriamento, se for muito rápido, provoca o aumento do volume da martensita em comparação com a austenita, produzindo tensões térmicas que podem causar trincas.

Processos - Uma lâmina pode sofrer danos durante as etapas de sua fabricação, da seguinte forma: formação inadequada dos dentes na estamparia, que leva à formação de trincas; afiação sob condições erradas que provoca o aquecimento local, formando martensita (esta fase de martensita endurecida é muito frágil e origina microtrincas que levarão a falhas por fadiga); acabamento superficial, principalmente da garganta do dente, pois superfícies lisas são menos suscetíveis a falhas por fadiga; solda da serra com parâmetros inadequados leva à formação de martensita.

HATTORI, N.; FUJII, Y. & SUGIHARA, H. (1982). Desenvolveram um dispositivo auto-ajustável do volante superior de uma serra de fita com a intenção de diminuir o desvio da lâmina na direção de avanço. Utilizaram uma serra de fita com 1070 mm de diâmetro de volantes, 1800 mm de distância entre centros dos volantes e 121 mm de largura de cada volante. Cinco lâminas de serra de 7 m de comprimento, 127,5 mm de largura e 0,93 mm de espessura foram expostas a diferentes esforços de avanço e de tensionamento.

O dispositivo era constituído por: detetor ótico, composto por uma fonte de luz e um diodo fotoelétrico; mecanismo de controle, formado de alavancas que inclinavam o volante; e um servo-motor conectado ao mecanismo de controle. Quando a lâmina se deslocava na direção do avanço, o detetor ótico reconhecia o módulo e sentido do deslocamento e enviava um sinal para o atuador acionar o mecanismo de controle para inclinar o volante superior para corrigir o desvio.

Os pesquisadores conseguiram diminuir em até 60% o desvio da lâmina na direção do avanço usando esse dispositivo. Entretanto, tornou-se evidente a eles a dificuldade de controlar a lâmina em uma posição fixa, usando esse sistema de autocontrole, porque a lâmina não respondia imediatamente à inclinação do volante.

CHARDIN, A. (1977) - O autor apresenta alguns estudos elaborados para melhorar o entendimento dos processos de serramento, que são: esforço na ponta do dente, que aborda a relação entre esforço e densidade da madeira e esforço e madeira congelada; fluxo de cavacos, que compara a velocidade de formação de cavaco e velocidade de corte e ainda fluxo de cavacos congelados; movimento da lâmina sobre os volantes, que expõe alguns estudos relacionados à posição de equilíbrio da lâmina.

Aspectos Conclusivos da Revisão Bibliográfica

Analisando os trabalhos dos pesquisadores ligados ao serramento por serra de fita, percebe-se o grande interesse em estudar os fatores relacionados com o desvio da lâmina e com o acabamento superficial, por estarem intimamente ligados à eficiência e acuracidade do processo. Os fatores principais abordados nesses trabalhos foram: ação das forças de corte, de avanço e perpendicular ao corte; velocidade de avanço; efeito do contato do corpo da lâmina com a madeira; força de esticamento da lâmina; perfil e dimensões dos dentes; inclinação dos volantes; e tensionamento e rigidez da lâmina.

Notou-se também grande interesse no estudo do desgaste, relacionado com o desvio de corte, material dos dentes e características da madeira serrada. Outros trabalhos abordados foram: novas tecnologias de equipamentos, ressaltando-se máquinas com sensores acústicos e novos projetos de máquinas e equipamentos; estudo da potência e força de corte; e ainda trabalhos que estudaram os fatores relacionados ao serramento de uma ou mais espécies específicas de madeira.

3 USINAGEM DA MADEIRA POR SERRA DE FITA

3.1 CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA RELATIVAS AO CORTE

3.1.1 Anisotropia da Madeira

Em razão da estrutura ordenada da madeira, caracterizada por um crescimento orientado das fibras, dos vasos e raios, as propriedades físicas e mecânicas variam segundo a direção considerada. Os diferentes modos de cortar não podem ser abordados sem uma definição prévia do comportamento anisotrópico da madeira. Existem três direções principais relativas ao corte, padronizadas na literatura específica, como descritas a seguir:

- Direção Longitudinal ou Axial: É a direção paralela às fibras da madeira;
- Direção Radial: É perpendicular às fibras na direção dos raios medulares;
- Direção Tangencial: Perpendicular às fibras e tangente à direção dos anéis de crescimento.

Os diferentes sistemas de corte da madeira são definidos pela notação de McKENZIE apud KOCH (1964), conforme mostrados na Figura 3.1. O primeiro número da notação representa o ângulo da aresta de corte em relação à direção das fibras. O segundo número fornece o ângulo da direção do movimento em relação à direção das fibras.

- 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: A aresta de corte e a direção do movimento são perpendiculares à direção das fibras. Este sistema de corte aplica-se nas operações do processo de serramento com serra de fita.

Figura 3. 1 - Modos de cortar (HOADLEY apud NÉRI, 1998).

3.1.2 Defeitos da Madeira

Defeitos da madeira são todas as anormalidades de sua estrutura. Algumas dessas anormalidades contribuem para a sua heterogeneidade e exercem influências sobre o processo de serramento e sobre a forma e qualidade da madeira serrada. Alguns defeitos e anomalias são descritos por KOLLMANN (1959) e são eles:

Defeitos de forma do tronco

Desalinhamento

A curvatura dos troncos de árvores, que pode ser de forma plana ou helicoidal, é uma característica hereditária ou causada pelas condições climáticas; depende do terreno, força do vento etc. Este tipo de defeito provoca baixo rendimento em operações de desdobro das toras.

Forquilha e medula múltipla

A forquilha ocorre quando se formam dois ou vários troncos em vez de um só. Apresenta-se a certa altura do solo, é de natureza hereditária ou causada por algum dano. Este defeito é comum nas dicotiledôneas que crescem isoladas, e nas que rebrotam após abate, por exemplo as espécies de eucalipto. Se o defeito ocorre próximo ao solo, é denominado “medula múltipla” (Figura 3.2). Na maioria dos casos é devido ao desenvolvimento de vários brotos de caule, por dano do caule ou por predisposição natural. Outro caso ocorre em árvores que crescem separadas, porém quando muito próximas chegam a se fundir, conhecido na literatura como “duplo tronco”.

Figura 3. 2 - Seção transversal de tora com medula múltipla (KOLLMANN, 1959).

Tronco cônico

A forma cônica do tronco depende da espécie, idade da árvore, altura do tronco, estação, etc. Nas árvores isoladas, em consequência da força dos ventos a parte inferior da árvore se reforça, chegando assim a um contorno cônico pronunciado. Este defeito deve ser levado em conta a partir do segundo metro em diante, quando, medindo-se até a copa, o diâmetro diminui mais de um centímetro a cada metro de crescimento na direção axial.

Cavidades

Devido a problemas de nutrição de partes do tronco, com o tempo surgem cavidades profundas (buracos axiais).

Defeitos estruturais da madeira

Dos anéis de crescimento

Basicamente são quatro os tipos de defeitos que podem ocorrer nos anéis de crescimento. São eles: largura irregular, deslocado, excêntrico e ondulado.

- Largura Irregular: Ocorre quando variações bruscas na área de plantio ou nas condições climáticas provocam alterações na alimentação radicular (Figura 3.3a).
- Deslocado: Este defeito é devido à ausência de séries de vasos em determinadas regiões do lenho, que crescem menos que as regiões adjacentes possuidoras de vasos em abundância, (Figura 3.3b).
- Excêntrico: Ocorre quando a medula não ocupa o centro da seção transversal do tronco. É um defeito muito comum devido geralmente à força do vento ou da gravidade (crescimento oblíquo do tronco) ou por forte insolação lateral. Os anéis de crescimento ficam com diâmetro variável e desigualmente distribuídos, como mostrado na Figura 3.3c, causando assim a formação de madeira comprimida (densa), principalmente nas coníferas.
- Ondulado: Os anéis de crescimento apresentam-se de forma ondulada entre os raios medulares, conforme mostrado na Figura 3.3d.

Figura 3. 3 - Cortes transversais de toras onde ocorreram defeitos estruturais de formação dos anéis de crescimento (KOLLMANN, 1959).

Revezamento das fibras

O nome revezamento das fibras é dado à forma desordenada em que as mesmas se dispõem no lenho. Este defeito é freqüente em muitas espécies. Suas causas não são claras, porém, segundo pesquisadores, são devidas às características individuais e não a fatores externos. O revezamento pode se dar pela disposição diagonal de direcionamento das fibras em relação à direção axial do tronco (Figura 3.4), ou ainda pelo direcionamento desordenado e aleatório das fibras numa determinada região devido à descontinuidade da estrutura anatômica.

Figura 3. 4 - Defeito estrutural devido ao revezamento das fibras (KOLLMANN, 1959).

Trepanamento

É produzido quando as gemas do tronco permanecem sem brotar durante muitos anos e são recobertas lentamente pela capa cambial envolvente. A referida trepa ocasiona um desalinhamento bastante aleatório das fibras que as envolvem.

Bolsas de resina

São pequenas bolsas planas cheias de resina que aparecem dentro de um anel de crescimento anual. Apresentam-se somente nas coníferas, as quais possuem os canais resiníferos. As bolsas não se transformam em cerne e nem adquirem a coloração deste. Essas bolsas obstruem os raios medulares e interrompem o fluxo de substâncias de formação do cerne oriundas do alburno.

Falso cerne

Apresenta-se em diferentes formas acompanhando o cerne normal em muitas dicotiledôneas. Ainda não foi possível uma explicação fisiológica satisfatória devido às muitas variáveis que influem para que o fenômeno ocorra. As formas de falso cerne são denominadas: coração vermelho, (Figura 3.5a), coração cinzento, cerne gelado, cerne pardo.

Duplo alburno

Apresenta-se dentro do cerne normal em forma anular com espessura ou largura média, assim como mostrado na Figura 3.5b. Segundo pesquisadores o duplo alburno é causado pelos danos produzidos no alburno primário por consequência de estação exageradamente fria. Como consequência as células mortas do alburno perdem a capacidade de transformar a seiva bruta em seiva elaborada necessária para a formação do cerne.

(a)

(b)

Figura 3. 5 - Cortes transversais de toras onde ocorreram defeitos estruturais de formação denominados: (a) falso cerne do tipo coração vermelho e (b) duplo alburno (KOLLMANN, 1959).

Presença de nós

Os galhos, durante sua vida, formam anéis de crescimento que correspondem aos de formação no tronco. Possuem os anéis de crescimento muito estreitos e contêm relativamente mais madeira de outono que o tronco, daí a causa de sua elevada proporção de madeira comprimida; é também mais escura, dura e quebradiça; sua riqueza em lignina e extratos é consideravelmente mais elevada que no tronco. O crescimento radial do galho origina as alterações da disposição das fibras na zona de interação com o tronco.

Fendas

Vários fatores externos podem ocasionar este tipo de defeito, assim chamados:

- Fendas por Contração: Formam-se em grande quantidade na superfície das madeiras, geralmente quando o abate ocorre no verão e há perda de água rapidamente, levando a contração da madeira mais externa;
- Fendas do Cerne, da Medula e dos Raios Lenhosos: Vão desde a medula até a casca, formam-se nos extremos do tronco pouco após o abate, em consequência de uma contração desigual;
- Fendas de Frio: São devidas às tensões que surgem quando da ocorrência de estações frias intensas, as camadas externas do tronco se esfriam muito e se contraem mais que as camadas internas, conforme ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3. 6 - Corte em uma tora onde ocorreu fenda de frio (KOLLMANN, 1959).

- Fendas de Insolação: Originam-se em consequência de contrações muito elevadas durante o verão intenso e seco, quando as reservas de água do tronco atingem o limite crítico;
- Fendas por Formação de Anéis de Crescimento de Largura Irregular: Originam-se de variações bruscas na área de plantio ou nas condições climáticas, provocando alterações na alimentação radicular. A Figura 3.3a apresenta esta ocorrência.

3.1.3 Propriedades da Madeira

Teor de umidade

A quantidade de água contida na madeira exerce grande influência nas suas propriedades e resistência ao serramento.

A árvore após ser abatida tende a perder o elevado teor de umidade que possui. Esta perda ocorre de forma acelerada no início, devido à evaporação da água de capilaridade (água contida no interior de vasos e traqueídeos na forma livre).

Segundo KOLLMANN (1959), a madeira verde contém em seu cerne entre 30% e 100% de água, e no alburno de 40% a 200% (referido ao peso seco). Se referido ao peso úmido, reduz-se para o cerne de 25% a 50% e para o alburno de 29% a 67%.

Para cálculo do teor de umidade, conforme norma NBR 7190 (1997), a madeira seca em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por um período normalizado, fica totalmente isenta de água, podendo-se definir a massa de madeira seca (M_s), a qual relacionada com a massa inicial da madeira (M_i), ambas em gramas, fornece o teor de umidade em porcentagem, referida a base seca (U_{BS}) e a base úmida (U_{BU}), dadas por:

$$U_{BS} = \frac{Mi - Ms}{Ms} \cdot 100 \quad \text{e} \quad U_{BU} = \frac{Mi - Ms}{Mi} \cdot 100$$

Umidade de equilíbrio

Após o abate, ocorre a tendência natural de a umidade da madeira equilibrar-se com a umidade relativa do ambiente onde se encontra, em função da temperatura desse ambiente. A Tabela 3.1 exemplifica esta relação para três diferentes regiões:

Tabela 3. 1 - Valores médios de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa do ar, média anual de regiões de diferentes climas (HELLMEISTER, 1983).

REGIÃO	UMIDADE DE EQUILÍBRIO	UMIDADE RELATIVA
Manaus - AM	15 %	± 90 %
São Carlos - SP	12 %	± 65 %
Brasília - DF	9 %	± 40 %

Ponto de saturação

O ponto de saturação é aquele que corresponde ao mínimo de água livre e ao máximo de água de impregnação. Até se atingir este ponto, a madeira perde água de embebição por capilaridade. A partir daí a diminuição de teor de umidade deve ser feita de forma forçada, o que implica retração da madeira, visto que a água remanescente é de constituição celular, ou seja, compõe as células de glucose na forma de pontes de hidrogênio. Do ponto de vista de utilização, pode-se classificar o teor de umidade da madeira em quatro classes:

- Madeira Saturada: Nas serrarias, em operações de desdobro das toras para confecção de pranchas e tábuas, em picadores e moendas bastante utilizados na indústria de papel e celulose, como também na industrialização de chapas aglomeradas ou de fibras.

- Madeira Seca ao Ar: Na indústria moveleira devido aos cuidados que devem ser tomados quanto à ocorrência de retração e inchamento, acarretando danos superficiais das peças acabadas.
- Madeira Seca em Estufa: Na indústria de objetos de madeira com destino a regiões com umidade de equilíbrio abaixo daquela de origem; onde as operações de colagem de peças devem ter controle rigoroso; ou onde a madeira beneficiada ou resíduo dela, tenha como destino a combustão e intenciona-se aumentar o poder calorífico do material combustível.
- Madeira Seca Totalmente: Nas indústrias de chapas, onde o processo final de prensagem a quente propicia que a madeira fique totalmente seca .

Água de impregnação

A estrutura química da madeira é composta, primordialmente, de celulose, hemicelulose e lignina. Estes polímeros formam a parede celular da madeira e são responsáveis pela maioria das suas propriedades físicas e químicas. O menor elemento constituinte do esqueleto celulósico é considerado por muitos autores como sendo uma fibrila, a qual é formada por um feixe paralelo de 36 moléculas de celulose ligadas entre si por meio de pontes de hidrogênio.

A celulose é um polímero constituído por várias centenas de glucoses formando cadeias de até 10.000 elementos. Segundo KOLLMANN (1959), o algodão é aproximadamente a celulose pura (95% a 99%), o teor de celulose é de 40% a 50% para a madeira e de 20% a 30% para a casca. A fórmula geral da celulose é $n(C_6H_{10}O_5)$ e sua fórmula estrutural básica é apresentada na Figura 3.7:

Figura 3. 7 - Fórmula estrutural básica da celulose (KOLLMANN, 1959).

As pontes de hidrogênio não ocorrem somente com hidroxilas da cadeia celulósica, mas também com as hidroxilas da água, tal como ilustrado na Figura 3.8. A absorção de água pela celulose depende do número de hidroxilas nela existente.

Ligação lateral entre cadeias de celulose

Ligação de hidroxila de celulose com moléculas de água

Figura 3. 8 - Ligação lateral e ligação de hidroxila (KOLLMANN, 1959).

Cada conjunto ($C_6H_{10}O_5$) contém três hidroxilas e portanto poderia receber até três moléculas de água. A relação 54/162 entre o peso molecular de três moléculas de água e uma de celulose indica que o máximo de água de impregnação da celulose é de 33%. Considerando-se um teor de celulose na madeira de 45%, e 33% de água de impregnação, obtém-se, nessas condições um teor de umidade de aproximadamente 15%, ($0,45 \times 0,33 = 0,1485$), correspondendo ao teor de umidade da madeira seca ao ar, sem água de embebição.

Retratibilidade

A madeira possui três seções ou planos de corte, da mesma forma sua retratibilidade ocorre nos mesmos planos, que são: axial, tangencial e radial. Portanto, quando da ocorrência simultânea pode-se identificar uma retração volumétrica significativa.

A retração axial é, em termos percentuais, a menor delas e ocorre segundo a direção das fibras da madeira. A retração radial se dá segundo a direção dos raios medulares da seção transversal do tronco da árvore. A retração tangencial é a maior e ocorre segundo a tangente aos anéis de crescimento no plano transversal ao eixo da árvore. A Figura 3.9, a seguir, representa esquematicamente a retratibilidade média do Combaru - *Combarouna allata*.

Figura 3. 9 - Retratibilidade média da *Combarouna allata* (HELLMEISTER, 1983).

Devido às diferenças percentuais entre as direções de retratibilidade, pode-se explicar os defeitos observados após a secagem das várias espécies de madeira, tais como fissuras e empenamento.

Os defeitos de fissuras podem apresentar-se em diferentes formas, as quais foram detalhadas anteriormente e denominadas de fendas. O caso mais geral de ocorrência das fissuras se dá pela separação das fibras da madeira devido à condição de secagem inadequada.

O empenamento é a deformação da peça de madeira pelo arqueamento de seus eixos longitudinal, transversal ou ambos, devido à retração da madeira resultante da variação de umidade da peça. Na Figura 3.10, apresenta-se a retratibilidade de várias regiões da seção transversal do tronco após secagem.

Figura 3. 10 - Distorção de várias regiões do tronco após secagem em corte transversal de uma tora (adaptado de U.S. Forest Products Laboratory apud BODIG & JAYNE, 1982).

Os defeitos ocasionados pelo empenamento são classificados como:

- Arqueamento ou Encurvamento: Deformação relativa ao comprimento da peça;
- Encanoamento: Deformação em relação à largura da peça;
- Torcimento: Deformação simultânea nos sentidos longitudinal e transversal.

Densidade

A densidade juntamente com o teor de umidade são características de grande importância para classificar as madeiras serradas ou compostas. A densidade refere-se à massa (em Kg) de uma substância por unidade de volume (em m³) e é expressa em termos de quilograma por metro cúbico, segundo o Sistema Internacional de Pesos e Medidas. É definida para um corpo de seção finita, como:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [\text{kg} / \text{m}^3]$$

A densidade depende da espécie examinada, do local de onde provém a madeira, da localização dos corpos de prova na tora, da umidade, etc. Porém, o valor da densidade para uma determinada espécie oscila em torno de uma média conhecida. A faixa de variação para as diversas espécies distribuem-se de 300 a 1200 kg/m³, segundo BOLETIM Nº 31 - IPT apud HELLMEISTER (1983).

KOLLMANN (1959) relacionou a influência do teor de umidade na densidade através de um diagrama (Figura 3.11). Nesse diagrama, os valores de densidade são corrigidos para o teor de umidade correspondente ao de equilíbrio. TRENDLENBURG apud KOLLMANN (1959) mostrou que a variação da densidade de espécies diferentes de madeira verde é pequena em relação à variação nas mesmas espécies de madeira seca em estufa.

As variações na densidade são devidas basicamente às diferenças estruturais das espécies e à presença de constituintes estranhos. A estrutura é caracterizada por diferentes tipos de células tais como fibras, traqueídeos, vasos, canais resiníferos, raios, e por suas dimensões, especialmente a espessura das paredes celulares. Tendência hereditária, fisiológica e influências mecânicas, tais como fatores do meio ambiente (insolação, calor, chuva, vento) afetam a estrutura da madeira e conseqüentemente sua densidade.

Figura 3. 11 - Diagrama: densidade x teor de umidade (KOLLMANN, 1959).

Este diagrama é utilizado da seguinte maneira: com os dados de densidade e teor de umidade (correspondendo ao de equilíbrio) de uma determinada espécie, encontra-se uma curva, a partir desta curva é possível obter o valor de densidade em toda faixa de teor de umidade do gráfico.

A seguir, apresenta-se na tabela 3.2, a densidade de algumas espécies de madeira. A densidade aparente de cada espécie foi obtida a partir do diagrama de KOLLMANN (1959) para 12% de teor de umidade, correspondente à madeira seca naturalmente para uma umidade relativa média anual do ar de 65%.

Tabela 3. 2 - Valores de densidade para algumas espécies de madeira (adaptado de GONÇALVES & TEIXEIRA, 1995).

Espécie	Nome Científico	Teor de Umidade [%]	Densidade Base Úmida [g / cm ³]	Densidade Base Seca [g / cm ³]	Densidade Relativa a 12% [g/cm ³]
Pinus	<i>Pinus elliotti</i>	11,6	0,32	0,28	0,32
Cedro	<i>Cedrella fissilis</i>	13,3	0,49	0,43	0,48
Pinho	<i>Araucária angustifolia</i>	12,1	0,55	0,48	0,55
Imbuia	<i>Ocotea porosa</i>	12,4	0,61	0,54	0,61
Castanheira	<i>Bertholletia excelsa</i>	12,6	0,77	0,68	0,77
Eucalipto	<i>Eucalyptus grandis</i>	10,0	0,84	0,74	0,86
Peroba Rosa	<i>Aspidosperma polyneuron</i>	13,2	0,98	0,85	0,97
Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i>	10,9	1,12	1,00	1,13
Angico Preto	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	26,6	1,20	0,88	1,15
Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>	19,7	1,19	0,96	1,16

3.2 O PROCESSO DE SERRAMENTO

3.2.1 Mecanismo de Formação do Cavaco

De acordo com SALES (1990), o processo de formação de cavaco no serramento por serra de fita, pode ser decomposto em duas fases:

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 mais ou menos 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 " ϕ " com relação à trajetória da ferramenta (Figura 3.12a). Contudo, 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.

Figura 3. 12 - Formação e ruptura do cavaco: (a) plano de cisalhamento e (b) ruptura do cavaco (SALES,1990).

Da Figura 3.12b, observa-se que AB representa a espessura da cavaco e BC o comprimento do cavaco fracionado. Os valores de " ϕ " 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 " ϕ ". As pressões se transmitem em seguida, ao volume elementar A'B'C'D', conforme indicado na Figura 3.12b.

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

3.2.2 Parâmetros de Corte

Condições de usinagem

Velocidade de corte

Corresponde à distância percorrida por unidade de tempo, pela aresta de corte do dente, é diretamente proporcional ao diâmetro e à rotação dos volantes e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$V_c = \frac{3,1416 \times D_v \times R}{60} = 0,05236 \times D_v \times R$$

Sendo: V_c = Velocidade de corte [m/s.];

D_v = Diâmetro dos volantes [m];

R = Número de revoluções por minuto do volante motor [rpm].

Em uma máquina de serra de fita, as velocidades de corte usuais para serras de desdobro são: para madeiras macias, 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.

Velocidade de avanço ou velocidade de alimentação

É 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, dependendo do modelo da máquina. A velocidade de avanço pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$V_f = \frac{60 \times V_c \times \delta}{p}$$

Sendo: V_f = Velocidade de avanço [m/min];

δ = Espessura do cavaco [mm];

p = Passo [mm].

Grandezas de Corte

Espessura do cavaco e largura de corte

A linha de corte, representada pela linha pontilhada na Figura 3.13, não é rigorosamente perpendicular à direção de deslocamento da madeira. Essa diferença (entre deslocamento da lâmina e linha de corte) resulta no ângulo " φ " e depende da velocidade de corte e de avanço. Para velocidade de corte de 30 m/s, " φ " varia de 1° a 4° quando a velocidade de avanço vai de 30 a 130 m/min. Essa defasagem corresponde à diferença entre a espessura de cavaco real (δ) e a espessura de cavaco calculada (δ') em milímetros, as quais se relacionam pela seguinte expressão: $\delta = \delta' \cos \varphi$.

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. Ambos os parâmetros, δ' e δ , estão relacionados com o número de dentes que agem em um intervalo de tempo e com o deslocamento relativo da madeira em relação à lâmina.

Figura 3. 13 - Espessura de cavaco real e calculada (SALES, 1990).

Com velocidade de corte muito superior à velocidade de avanço da madeira (50 a 200 vezes), o ângulo " φ " é pequeno. Nestas condições a espessura de cavaco calculada é aproximadamente igual ao do cavaco real. O volume de material retirado por dente, para lâmina recalcada ou travada, é calculado pela expressão:

$$V = \delta' \times k \times H = \frac{p \times Vf \times H \times k}{Vc \times 60}$$

sendo: V = Volume de material retirado por dente [mm^3];

k = Largura de corte [mm];

H = Altura de corte [mm].

A Figura 3.14 apresenta as grandezas de espessura de corte " δ ", largura de corte " k ", folga lateral " s " e espessura da lâmina " e ", para dentes recalcados e travados.

Figura 3. 14 - Grandezas de corte de dentes recalcados e travados (KOCH, 1964).

Esforços de Corte

Distribuição dos esforços em um dente de serra

As forças que agem em um dente de serra no serramento contínuo podem ser divididas em dois grupos: forças que atuam no plano de trabalho e forças que atuam lateralmente ao plano de trabalho.

- Forças que atuam no Plano de Trabalho: Segundo SALES (1990), as pressões exercidas pelo dente sobre a madeira são aplicadas na superfície de saída. A distribuição dessas pressões é particularmente complexa, sendo elevadas na proximidade da aresta de corte e, gradativamente menores ao se afastar dessa região.

Esse conjunto de ações descritas pode ser simplificado 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 " F " (Figura 3.15a). A força " F " pode ser decomposta em uma força paralela à direção de deslocamento do dente, conhecida como força de corte " F_c "; e uma força perpendicular a essa direção, chamada força de avanço " F_a " (Figura 3.15b).

Figura 3. 15 - Forças atuantes no corte: (a) esforços na ferramenta e (b) decomposição da resultante dos esforços (adaptado de SALES, 1990).

A componente "**Fa**" 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 submetida. Assim, o trabalho necessário para o corte é dado pela expressão:

$$T = F_c \times H \times 1000$$

Sendo: T = Trabalho necessário para o corte [N.m].

- Forças laterais ao plano de trabalho: 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.

Influência dos diferentes parâmetros sobre os esforços de corte

Velocidade de corte. Segundo SALES (1990), em uma gama de velocidades entre 5 a 50 m/s e espessura de cavaco entre 0,5 a 1,5 mm, a influência deste parâmetro é desprezível. Contudo, age de maneira indireta, à medida que a velocidade de corte está relacionada com fenômenos que afetam a força de corte, tais como temperatura e desgaste da ferramenta.

Velocidade de avanço. Para baixas velocidades de avanço, a força de corte tende a ser maior que o esperado, provavelmente devido à fricção da aresta de corte com a madeira, pois os dentes passam mais vezes na região de corte para retirar a mesma quantidade de material, comparado a velocidades de avanço maiores. Com altas velocidades de avanço, o aumento da força de corte está relacionado com o preenchimento da garganta dos dentes e fricção da serragem com a lâmina e a madeira.

Teor de umidade e temperatura da madeira. O esforço de corte é mais elevado quando se corta madeira seca e menor para madeira verde. A taxa de aumento do esforço de corte varia desde desprezível, para madeiras muito densas (acima de 1000 kg/m^3), a até 20% de acréscimo de esforço de corte entre o estado verde e seco, de uma espécie muito macia. A variação na temperatura da madeira praticamente não exerce influência em relação ao esforço de corte.

Densidade. A densidade está relacionada com a resistência mecânica da madeira e a dificuldade de penetração do dente, assim exerce influência direta sobre o esforço de corte. Serrando madeira muito densa, o esforço de corte chega a cinco vezes, comparado ao serramento de madeira macia.

Orientação do corte. O corte perpendicular às fibras requer maior energia para ser efetuado que o corte ao longo das fibras, e portanto no corte perpendicular às fibras, a força de corte tende a ser maior que no corte paralelo às fibras.

Estado de afiação do dente. A qualidade de afiação age sobre a acuidade da aresta de corte e do estado das superfícies de saída e de folga, modifica a intensidade dos atritos e portanto, a força de corte. O dente vai perdendo a afiação ao decorrer do serramento e seu perfil vai tornando-se cada vez mais arredondado, muitas vezes em poucos metros de madeira cortada. Um acabamento com rebolo de grana fina e material do dente apropriado, diminuem a força de corte e o desgaste.

Espessura do cavaco. Para espessuras de cavacos de 0,2 a 2,8 mm, o esforço de corte aumenta linearmente. Acima de 2,8 mm, há um grande aumento da intensidade do esforço de corte, explicado por modificações das condições de usinagem e também pelo preenchimento da garganta do dente com serragem.

O gráfico da Figura 3.16 exemplifica a influência da espessura sobre o esforço de corte.

Figura 3. 16 - Espessura do cavaco X esforço de corte (SALES, 1990).

Ângulos de saída, de folga e de cunha. A influência dos ângulos de folga e de cunha sobre o esforço de corte é muito pequena (praticamente desprezível) em relação à influência exercida pelo ângulo de saída. O ângulo de folga colabora no aumento do esforço de corte, quando muito pequeno (menor de 2°), causando atrito do dente com a madeira. Em relação ao ângulo de saída, quanto maior for este ângulo menor o esforço de corte. Passando-se de uma lâmina com ângulo de saída de 10° para uma com 20° , obtém-se uma diminuição aproximada de esforço de corte em 11%, no serramento com cavacos de 0,2 mm de espessura, e de 20% para o serramento de cavacos com 0,8 mm de espessura.

Passo. A princípio o passo dos dentes não teriam efeito sobre a força de corte, contudo, serras com passo muito grande (poucos dentes trabalhando na madeira), podem ser mais facilmente deslocadas na direção lateral, aumentando a largura de corte e a força de corte pelo contato da lateral da lâmina com a madeira.

3.2.3 Operações de Corte

O processo de serramento por serra de fita é muito utilizado nas operações de processamento da madeira. A primeira operação que utiliza a serra de fita é o desdobro de toras, mostrando vantagens claras na produtividade, no baixo desperdício de madeira, além da possibilidade de se trabalhar com toras de grandes diâmetros. Existe uma variedade de tipos de máquinas empregadas na operação de desdobro, que são apresentadas no item 3.2.4.

A operação com serra de fita após o desdobro, é conhecida como recorte, na qual emprega-se serras de fita vertical com lâminas estreitas. A vantagem principal do serramento de recorte em relação a outros processos de corte, é a possibilidade de cortar a madeira em curvas de pequenos raios e em formas irregulares.

Em uma máquina de serra de fita, a lâmina é disposta sobre dois volantes, que possuem a distância entre centros ajustável. Este ajuste varia conforme modelo e fabricante, mas deve ser o suficiente para adaptar a máquina a um intervalo de variação do comprimento da lâmina. Para cada modelo de máquina, existe um comprimento máximo e mínimo da lâmina, ligado às possibilidades deste deslocamento, geralmente entre 15 a 20% do vão livre da máquina. Na prática apenas o volante movido (superior para as serras verticais) possui este ajuste.

O deslocamento do volante também tem a função de esticar a lâmina, proporcionando seu tracionamento, conhecido como tensão de montagem ou de esticamento, que mantém a lâmina sobre os volantes durante funcionamento. A intensidade da tensão de montagem depende da largura e espessura da lâmina, do tensionamento, da forma e diâmetro dos volantes, e das condições de serramento.

3.2.4 Classificação das Máquinas

SALES (1990) apresentou os diferentes modelos de máquinas de serra de fita, com as seguintes características que as diferenciam:

- Disposição dos volantes: vertical, horizontal e inclinada;
- Quantidade de cabeçotes associados, a fim de realizar diversos cortes em apenas um movimento (simples, dupla e quádrupla);
- Deslocamento relativo lâmina e madeira;
- Possibilidade de cortar na direção de avanço ou na direção de avanço e retorno da tora, (serras monocortes e bicortes);
- Tipo do volante;
- Largura da lâmina (estreita ou larga).

A seguir, apresenta-se a descrição dos tipos de máquinas classificadas pelas características acima listadas.

Máquina de serra vertical

As máquinas de serra 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, os volantes estão dispostos um sobre o outro, na direção vertical. A lâmina é posicionada de modo que seus dentes fiquem inclinados para baixo, no lado do corte. Esta é a posição para que os dentes da lâmina corte a madeira de cima para baixo, como ilustrado na Figura 3.17.

Quanto ao tipo de lâmina, há modelos de serras verticais que usam lâminas estreitas e largas. No primeiro tipo, as máquinas possuem volantes de 0,3 m a 1,0 m de diâmetro e geralmente a madeira é apoiada sobre uma mesa de corte. Essas máquinas possibilitam o corte em curvas, e quanto menor a largura da lâmina, menor é o raio de curvatura. As máquinas que utilizam lâminas largas possuem um trilho com carrinho ou um sistema de alimentação da madeira até o corte. Essas máquinas fazem apenas cortes retos e são usadas para desdobro e resserra.

Figura 3. 17 - Serra de fita vertical (TUSET & DURAN, 1986).

Existem máquinas verticais duplas (Figura 3.18a) e quádruplas (Figura 3.18b), 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 cabeçotes móveis.

(a)

(b)

Figura 3. 18 – Serras de fita: (a) dupla e (b) quádrupla (TUSET & DURAN, 1986).

Máquina de serra horizontal

Nas 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 verticais. As serras horizontais, podem ser estacionárias ou portáteis. As máquinas portáteis podem ser deslocadas para o lugar em que se encontram as toras, podendo inclusive ser levadas ao interior de uma floresta. A Figura 3.19 apresenta dois modelos de serra de fita horizontal.

Figura 3. 19 - Serras de fita horizontal: (a) cabeçote móvel e (b) cabeçote fixo (TUSET & DURAN, 1986).

Máquina de serra inclinada

Atualmente, as máquinas destinadas ao processamento primário da usinagem da madeira (desdobro) são ou vertical ou horizontal, contudo CHARDIN (1960) apresentou outro tipo quanto à disposição do cabeçote. Essa terceira possibilidade é uma máquina de serra inclinada, conforme mostrado na Figura 3.20.

Figura 3. 20 - Serra de fita inclinada (CHARDIN, 1960).

Uma grande vantagem desse tipo de máquina é que tanto o cabeçote como o carrinho porta-toras estão sob efeito de seus pesos próprios, assegurando maior estabilidade e evitando o "jogo" das partes móveis ao se deslocar. Além disso, as toras ficam bem estáveis no carrinho porta-toras, o que possibilita eliminar as garras de fixação, no serramento de grandes toras. Contudo, o carrinho porta-toras se desloca sobre quatro trilhos (no caso das serras vertical e horizontal, são apenas dois trilhos), e seu movimento deve ser perfeitamente controlado para assegurar retilidade e alinhamento.

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 (Figura 3.17). Essas máquinas monocortes são as mais conhecidas e correspondem à maior parte das máquinas instaladas, usadas em serras vertical e horizontal.

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.

Segundo SALES (1990), em uma serra monocorte, o tempo de retorno corresponde a dois terços do tempo não produtivo e a velocidade, em média, é três vezes mais rápida que no avanço, isto devido ao retorno ser feito sem cortar. Assim, a economia de uma serra bicorte é realizada apenas nos tempos de retorno, reduzindo o tempo total em média de 10 a 12%. 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.

Deslocamento relativo lâmina - madeira

Os modos de deslocamento se limitam a dois tipos, realizados separadamente: primeiramente é necessário criar um deslocamento na direção paralela ao plano de corte, chamado de plano de serramento (Figura 3.21a). Após o serramento, é necessário realizar um deslocamento perpendicular ao plano da lâmina (Figura 3.21b). As soluções técnicas para executar esses deslocamentos dividem as máquinas de serra em três categorias:

Figura 3. 21 - Deslocamentos relativos entre lâmina e madeira: (a) deslocamento para serramento e (b) deslocamento para posicionamento (SALES, 1990).

Máquina com cabeçote fixo

O cabeçote compreende a estrutura da máquina onde se encontram os volantes e seus componentes, e onde pode ou não estar contido o motor. As serras com cabeçotes fixos correspondem ao sistema em que a madeira é fixada através de garras em um carro transportador. Essas máquinas são as mais comuns e podem ser vistas na Figura 3.19b. Existem máquinas vertical e horizontal com esta configuração.

O carro transportador se desloca sobre trilhos paralelamente ao plano da lâmina. A técnica mais comum de movimentar o carrinho é por um cabo de aço ligado a um tambor. O avanço da madeira pode ser gerado por variadores eletrônicos, hidráulicos ou pneumáticos ligados ao tambor.

Os variadores eletrônicos de avanço permitem uma gama de velocidades de avanço maior, entre 30 a 100 m/min, ideal para cortar toras pequenas e madeira de baixa até média densidade. Já os variadores hidráulicos utilizam pistões hidráulicos e gama de velocidades de avanço de 10 a 30 m/min, conveniente para cortar madeiras de alta densidade e/ou grande diâmetro. Existe ainda o sistema de deslocamento com pistão pneumático, geralmente acionado a vapor, este sistema vem sendo substituído pelos sistemas anteriores.

Máquina de cabeçote móvel

Estas são as máquinas de concepção mais simples (Figura 3.19a). A madeira é presa em um suporte fixo e toda a estrutura que contém o cabeçote se movimenta sobre trilhos. O deslocamento vertical, apenas do cabeçote, é feito por guias fixadas em colunas existentes neste conjunto. Com este movimento se estabelece a espessura da peça.

As máquinas construídas dessa forma possuem diâmetro de volantes de no máximo 1,30 m e possuem velocidades de avanço muito lentas, da ordem de 5 m/min, velocidades acima deste valor acarretam desvios da lâmina. Contudo, uma grande vantagem desse tipo de máquina é poder serrar peças de grande comprimento, pois possibilitam maior curso de deslocamento para o mesmo espaço, em relação às máquinas de cabeçote fixo.

Máquinas mistas

As máquinas que usam a forma mista (cabeçote e carro transportador móveis) são essencialmente as serras de fita vertical dupla ou quádrupla. O serramento ocorre pelo movimento da madeira na direção paralela ao plano de corte definido pela lâmina. Já o movimento de posicionamento é realizado pelas lâminas, juntamente com os cabeçotes, e define a espessura da peça a ser cortada.

Volantes

Em máquinas de lâminas estreita, os dentes permanecem em contato com os volantes, sendo necessário revesti-los com uma manta de borracha ou material de função similar, evitando o contato direto. Para as máquinas de serra de fita larga não existe esta cobertura, pois os dentes da serra ficam para fora dos volantes a pelo menos 5 mm do fundo da garganta dos dentes. Os volantes são denominados volante motor e movido, podendo este último se movimentar de três formas:

- 1) Movimento de rotação em seu próprio eixo;
- 2) Movimento de aproximação e afastamento do volante motor, que possibilita a montagem da lâmina e seu esticamento;
- 3) Movimento de inclinação, conforme Figura 3.22a, que regula a posição exata da lâmina sobre os volantes (para serra vertical, geralmente este volante é o superior).

Existem ainda máquinas que podem inclinar os dois volantes (Figura 3.22b). Nessas máquinas, para se alcançar uma certa variação θ , é necessário inclinar cada volante em um ângulo $\theta/2$.

Figura 3. 22 - Regulagem dos volantes: (a) inferior e (b) inferior e superior (SALES, 1990).

Os volantes apresentam a forma chata ou abaulada (convexa). Para o volante abaulado, o perfil é simétrico para as serras bicorte e abaulado não simétrico, para as serras monocorte. Os volantes reto ou abaulado simetricamente (perfil a e b) utilizam lâminas tensionadas simetricamente ou não tensionadas, já os volantes abaulados não simetricamente (perfil c e d) utilizam lâminas tensionadas não simétricas. A Figura 3.23 esquematiza as formas dos volantes, onde " w " corresponde à largura dos volantes. A Tabela 3.3 apresenta os valores de f_1 e f_2 para os volantes de perfil "b" e "c".

Figura 3. 23 - Perfil dos volantes (sem escala), (adaptado de SALES, 1990).

Tabela 3. 3 - Valores de f_1 e f_2 para os volantes de perfil "b" e "c" (SALES, 1990).

Largura do volante- w mm	Perfil "c" f_1 em mm	Perfil "c" f_2 em mm	Perfil "b" f_1 em mm
90 - 110	0,10 - 0,11	0,12 - 0,18	0,10 - 0,20
110 - 130	0,11 - 0,12	0,15 - 0,20	0,15 - 0,25
130 - 160	0,12 - 0,13	0,18 - 0,23	0,17 - 0,27
160 - 210	0,13 - 0,14	0,20 - 0,26	0,25 - 0,35
210 - 270	0,14 - 0,15	0,25 - 0,31	0,30 - 0,40
270 - 330	0,15 - 0,16	0,28 - 0,35	0,35 - 0,45

Os valores " f_1 " e " f_2 " variam em função da largura dos volantes, e a largura é em função do diâmetro dos volantes, geralmente entre $Dv/7$ e $Dv/12$.

3.2.5 Interação entre Lâmina e Máquina

Uma lâmina oscila entre uma posição de equilíbrio, rotação em vazio, e uma posição de equilíbrio em trabalho, função dos diferentes parâmetros e esforços de serramento e de sua evolução em relação ao tempo (desgaste, aquecimento e outros). Os fatores que influenciam a posição de equilíbrio da lâmina são:

Temperatura. O aquecimento dos dentes pode aumentar o comprimento da lâmina nesta região e a consequência é o deslocamento da lâmina nos volantes, saindo da posição inicial de equilíbrio.

Contato lâmina-volante. O incrustamento da serragem nos volantes é uma situação não simétrica do contato lâmina e volantes, que ocasiona a variação da posição da lâmina e sua instabilidade dinâmica.

Prolongamento perpendicular e paralelo ao plano da lâmina. O primeiro caso resulta do fato de que a resultante dos esforços de corte não é rigorosamente paralela ao plano da lâmina, sempre há uma componente transversal que pode provocar a flexão lateral. E o segundo caso é devido aos fenômenos de repelimento e atração entre lâmina e madeira, deslocando a lâmina primeiramente sobre o volante inferior (serra vertical) e em seguida no volante superior, até uma nova posição de equilíbrio.

Inclinação dos volantes. A intenção de deslocar a lâmina inclinando o volante é anular ou minimizar o deslocamento causado pela força de avanço da madeira. Quanto menor a distância entre volantes e maior a espessura da lâmina, menor é a inclinação que anula uma determinada força de avanço.

Carga crítica e estabilidade

A resultante global da força de corte se decompõe em uma componente paralela à direção de deslocamento da lâmina (F_c), e uma componente perpendicular ao deslocamento (F_a). Quando " F_a " se aproxima de um certo valor, conhecido como carga crítica, um pequeno acréscimo de força gera um grande aumento da flecha transversal à lâmina. Nessas condições a componente " F_a " não é mais aplicada no plano da lâmina, o que agrava ainda mais o fenômeno, desviando a lâmina.

Tanto a tensão de esticamento, como o tensionamento, agem no sentido de favorecer a rigidez da lâmina. Com tensão de esticamento constante, a carga crítica aumenta com o nível de tensionamento, porém a tensão de esticamento possui um papel preponderante sobre a carga crítica, e uma diminuição de tensão de esticamento não pode ser integralmente compensada por um aumento equivalente de tensionamento. A situação ideal de trabalho é obtido com uma alta tensão de esticamento e com um tensionamento não simétrico, o que introduz uma sobretensão na frente da lâmina, nas proximidades da região dentada.

Quanto maior for a resultante das forças (madeira densa, grande altura de corte, velocidade de avanço elevada), maior a necessidade de se aumentar a rigidez da lâmina para obter um serramento satisfatório. Máquinas com menor distância entre volantes e/ou menor distância entre guias apresentam boa rigidez, contudo a natureza do contato lâmina e volantes e do contato guias e lâmina é diferente e o aumento de rigidez, nos dois casos, é difícil de ser comparado.

Fadiga de uma lâmina de serra de fita

Segundo SALES (1990), os esforços solicitantes em uma lâmina de serra de fita são divididos em um estudo estático e dinâmico, ambos apresentados a seguir.

Estudo estático

Uma lâmina instalada sobre os volantes de uma máquina de serra de fita e sujeita à tensão de esticamento sofre dois tipos de solicitações mecânicas.

A porção da lâmina que envolve os volantes sofre uma flexão de raio igual ao raio dos volantes, caracterizada por um alongamento da face convexa e por um encurtamento da face convoca (Figura 3.24a). A tensão de flexão máxima ocorre nas extremidades e é calculada pela seguinte expressão simplificada:

$$\sigma_F = \frac{2,6 \cdot 10^4 \times e}{D_v}$$

sendo: σ_F = Tensão de flexão máxima [N/m²];

e = Espessura da lâmina [mm];

D_v = Diâmetro dos volantes [mm].

A tensão de esticamento induz uma tensão de tração em cada vão livre dos volantes, e é igual a:

$$\sigma_p = \frac{FE}{e \times b}$$

sendo: FE = Esforço de tração aplicado ao vão livre [N];

b = Largura da lâmina [mm].

A região dos dentes atua como um fator de não uniformidade da distribuição de tensão de tração, na largura da lâmina. Sua presença forma uma zona de concentração de tensão no fundo da garganta do dente, sendo maior nas proximidades do ponto M, conforme Figura 3.24b. A tensão máxima condiciona a durabilidade da lâmina, ela pode ser alta o suficiente para introduzir um dano, como por exemplo, uma fissura que levará à ruptura da serra. Esta tensão é calculada pela seguinte equação:

$$\sigma_{\max} = K_c \times \sigma_{\text{médio}}$$

sendo: $\sigma_{\max}$ = Tensão máxima [N];

$\sigma_{\text{médio}}$ = Tensão média [N];

K_c = Coeficiente de concentração de tensão.

O coeficiente de concentração de tensão varia de um tipo de dente a outro, pela forma da cavidade, e pela altura do dente. Em uma mesma lâmina e na mesma garganta de dente, encontra-se o valor máximo de K_c no fundo da cavidade e seu valor está entre 1,5 a 2,5, e é tanto mais elevado quanto menor o raio de curvatura da garganta dos dentes " r_d " (Figura 3.24b).

Figura 3. 24 - Tensões: (a) flexão e (b) máxima e média (SALES, 1990).

Em condições normais de trabalho, com lâmina pouco desgastada, a lâmina é quase sempre repelida pela peça de madeira. Nesse caso, a tensão de tração nas proximidades do dente é menor em serviço, que com o sistema em vazio. Dessa forma, o aparecimento de trincas não deve ser diretamente atribuído ao esforço de corte e, sim, a uma afiação de má qualidade e a uma fadiga devido a esforços de torção, dada a uma componente de esforço de corte perpendicular ao plano da lâmina e flexão da lâmina sobre os volantes.

Estudo dinâmico

Uma lâmina de serra de fita sob rotação dos volantes é exposta a 2 tipos de solicitações mecânicas: uma tensão permanente (σ_p), correspondendo à tensão de esticamento; e uma tensão variável, devido ao curvamento da lâmina sobre a face dos volantes, sendo ($-\sigma_c$) a tensão de compressão, sobre a face de contato com o volante e ($+\sigma_c$) a tensão de tração sobre a face oposta.

A tensão máxima se dá sobre a face exterior da lâmina na vizinhança da cavidade do dente (ponto M na zona de concentração de tensões, Figura 3.24b) a cada vez que passa pelos volantes. Pode ser expressa por: $\sigma_{\max} = \sigma_p + \sigma_c$;

Este mesmo ponto se encontra em um estado de tensão mínima ao passar pelos vãos livres, sendo esta tensão: $\sigma_{\min} = \sigma_p$.

A amplitude da sollicitação é dada por: $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2 = 1/2 \sigma_c$.

A tensão média é calculada pela expressão: $\sigma_{\text{média}} = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$.

O período, ou o tempo de um ciclo completo, correspondendo a uma volta completa

da lâmina é dado por: $\tau = \frac{Dv + 2L}{V_c} = 2(\tau_1 + \tau_2)$.

Sendo: L = Comprimento do vão livre [m];

τ_1 = Tempo de passagem do ponto M sobre um volante [s];

τ_2 = Tempo de passagem do ponto M em um vão livre [s].

De um modo geral, a repetição de esforços variáveis leva à formação de uma trinca e posteriormente à ruptura, mesmo quando a tensão aplicada é inferior à tensão de ruptura e muitas vezes mesmo quando a tensão é inferior ao limite de elasticidade do aço, avaliado sob condições estáticas. Este fenômeno de diminuição de resistência do material é chamado de "fadiga".

A tensão máxima é inversamente proporcional ao número de ciclos, isto significa que diminuindo a tensão máxima o número de ciclos a ruptura aumenta, até um valor conhecido como "limite de resistência à fadiga". A partir desse valor, o material pode suportar indefinidamente a sollicitação alternada.

O aço de uma lâmina de serra de fita deve apresentar uma boa resistência mecânica, aliada a uma boa resistência à fadiga. Os aços pouco ligados, com porcentagem de carbono entre 0,6 a 0,8%, com 0,2 a 0,3% de silício, 0,3 a 0,5% de manganês e com menos de 0,03% de enxofre, atendem bem às exigências acima. A tensão média de ruptura estática desses aços está entre 1300 a 1600 MPa e com limite de resistência à fadiga em torno de 450 MPa.

Uma lâmina usada e reafiada não possui a mesma resistência à fadiga que uma nova, pois a afiação não retira todas as fissuras causadas pelos ciclos entre duas afiações. Na prática, o limite de resistência à fadiga de uma lâmina é baseado em um limite de segurança, e não apenas no máximo aproveitamento do equipamento.

Tensões mecânicas da lâmina em serviço

Uma lâmina é exposta a uma variedade de solicitações mecânicas, caracterizada por fatores que agem sobre a parte ativa da lâmina, e outros sobre a parte da lâmina em contato com os volantes. Os fatores que atuam na distribuição dos esforços na parte ativa da lâmina são: tensão de esticamento; força centrífuga; inclinação dos volantes; esforços de corte; aquecimento da lâmina e nível de tensionamento. Os fatores que atuam na distribuição dos esforços no contato lâmina-volantes são: tensão de esticamento; força centrífuga; aquecimento da lâmina; nível de tensionamento; forma dos volantes e flexão da lâmina.

Tensão de esticamento e força centrífuga. A tensão da lâmina em movimento é obtida somando a tensão de esticamento e a tensão devida à rotação dos volantes. Isso ocorre quando a máquina possui um dispositivo de esticamento da lâmina, que mantém sempre constante a tensão de esticamento, pois o efeito dos esforços centrífugos leva ao alongamento da lâmina e à diminuição de tensão de esticamento. Na prática, com parâmetros usuais da velocidade de corte (25 a 60 m/s) e tensão de esticamento (150 a 200 MPa), a influência dos esforços centrífugos sobre o alongamento é limitada.

Aquecimento da lâmina. Ocorre devido ao atrito do corpo da lâmina com a madeira e ao aquecimento da região dentada durante o serramento. Dois fenômenos distintos contribuem para o aquecimento do dente no decorrer do serramento: deformação e ruptura do cavaco, e atrito entre dente e cavaco.

Em relação ao primeiro fenômeno, o calor acumulado é desprezível no serramento da madeira, devido a sua pequena condutividade térmica e à alta velocidade de corte.

O segundo fenômeno é dominante e caracterizado pelo aquecimento devido ao atrito do cavaco com a face de saída e ao atrito da madeira com a face de folga. O calor gerado é em seguida propagado por condução térmica para todo o dente que funciona como um "radiador" e posteriormente para o corpo da lâmina, formando um gradiente de temperatura. O gradiente térmico entre o dorso da lâmina e o fundo da garganta do dente raramente ultrapassa 50°C quando a serra é utilizada em boas condições. Este gradiente leva a uma dilatação na largura da lâmina, sendo que a região mais próxima aos dentes se dilata mais que o dorso.

Inclinação dos volantes e esforço de corte. Estes fatores causam flexão da lâmina no vão livre no lado do corte e nenhuma modificação das tensões da parte da lâmina em contato com os volantes. No vão livre no lado do corte, uma inclinação positiva do volante (porção superior do volante inclinado à frente da máquina), produz sobretensão no dorso da lâmina e perda de tensão à frente. Já uma inclinação negativa (porção superior do volante inclinada para trás) produz uma situação inversa. O esforço, devido ao avanço do material, geralmente causa uma sobretensão à frente e uma perda de tensão no dorso da lâmina.

Nível de tensionamento. Uma lâmina instalada sobre seus volantes, sofre uma flexão igual ao raio dos volantes. Esta flexão provoca, no plano longitudinal, um alongamento da face exterior e um encurtamento da face em contato com o volante. A deformação é positiva para a face alongada e negativa para a face comprimida.

No plano transversal, estas deformações geram um encurtamento sobre a face exterior e um alongamento sobre a face em contato com o volante. Em uma lâmina não tensionada, observa-se uma concavidade voltada para o exterior do volante, conforme Figura 3.25a para o volante reto e 3.25b para o volante abaulado. Esta curvatura impede o contato das bordas da lâmina com o volante. A flecha formada (fora de escala no desenho) é em média 10% da espessura da lâmina.

Figura 3. 25 - Deflexão no plano transversal da lâmina: (a) volante reto e (b) volante abaulado (adaptado de SALES, 1990).

O tensionamento introduz um nível de tensão residual na lâmina que não produz efeito no vão livre, mas provoca uma curvatura convexa das bordas da lâmina ao passar pelos volantes. A curvatura convexa dada ao tensionamento e a curvatura côncava devida à flexão da lâmina sobre o volante se sobrepõem. A tensão residual obtida com o tensionamento é praticamente anulada na região da lâmina em contato com o volante. O desejado é, a partir de um certo nível de tensionamento, a concavidade estar sempre voltada para o volante.

Forma dos volantes. Uma lâmina apresenta diferentes modos de contato com os volantes, segundo o nível de tensionamento e tipo de volante (Figura 3.26). A tensão de esticamento e o nível de tensionamento devem ser suficientes para manter toda a largura da lâmina em contato com o volante. Uma lâmina não tensionada necessita de uma tensão de esticamento elevada para isso ocorrer.

Volantes Plano

(d) não tensionado

(e) tensionado

(f) (fortemente tensionado)

(g) (fortemente tensionado)

Volantes Abaulados

Figura 3. 26 - Interação entre lâmina e volante (adaptado de SALES, 1990).

A situação **a**, **d** e **g** da Figura 3.26, são influências negativas à carga crítica e devem ser evitadas. Somente as interações lâmina-volante **b**, **c**, **e** e **f** devem ser usadas.

4 FERRAMENTA DE CORTE

4.1 GENERALIDADES

Os dentes de uma serra de fita cortam a madeira muitas vezes a velocidades superiores a 50 m/s. A lâmina é submetida a grandes esforços durante o corte e ainda a tensões elevadas quando passam pelos volantes.

As exigências cada vez maiores em relação ao acabamento da superfície da madeira, a procura de maior rendimento e menor tolerância recaem diretamente sobre a lâmina de serra de fita. Para atender a essas exigências, cabe aos fabricantes projetar lâminas adequadas a cada operação de corte, resistentes ao desgaste, à fadiga, que mantenham o tensionamento, com rigorosa tolerância dimensional, tenacidade, planicidade e acabamento superficial liso e uniforme. Porém cabe ao usuário escolher a lâmina conveniente à máquina, aos parâmetros de corte e à madeira a ser cortada.

4.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E DIMENSIONAIS

Geometria da cunha cortante

A Norma NBR 6163 (1989) padroniza o conjunto de superfícies, ângulos e arestas em comum entre as ferramentas de corte. Para o caso de um dente de serra de fita, apresenta-se a seguir os principais elementos da geometria de corte.

- Parte de Corte: Parte ativa da ferramenta, onde estão as cunhas de corte com suas respectivas arestas de corte.
 - Cunha Cortante: Formada pelas superfícies de saída e de folga da parte de corte.
 - Superfície de Saída: Superfície da cunha de corte, sobre a qual desliza o cavaco.
 - Superfícies de Folga: Superfície da cunha de corte, que determina a folga entre a ferramenta e a superfície de usinagem.
 - Aresta de Corte: Aresta da cunha de corte formada entre as superfícies de saída e de folga.
- Ângulo de Folga, α : Deve ser suficiente para que o dorso do dente não entre 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. A Figura 4.1 ilustra os ângulos de uma lâmina de serra e as superfícies de folga e de saída.
- Ângulo da Cunha, β : Representa um ângulo sólido, 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.
 - Ângulo de Saída, γ : Grandes ângulos de saída permitem velocidades de avanço mais altas e são indicadas para o serramento de madeiras macia, dentes com pequenos ângulos são usados em lâminas destinadas ao serramento de madeiras dura a velocidades de avanço lentas.

Figura 4. 1 - Geometria de um dente de serra (adaptado de Gottlob, 1996).

Largura da lâmina

Quanto à largura, as lâminas de serra de fita são classificadas em estreita e larga, e para cada tipo os fabricantes de lâminas produzem uma diversidade de larguras.

Lâmina larga

Conforme especificações de fabricantes, são todas as lâminas com largura a partir de 63,5 mm (2 1/2"). São fabricadas com aço carbono ou aço cromo níquel, e usadas em máquinas horizontal e vertical, responsáveis nas primeiras etapas de processamento da madeira. A largura de uma lâmina relaciona-se com a largura dos volantes, sendo que o fundo da garganta dos dentes deve estar pelo menos 5 mm para fora do volante. À medida que uma lâmina é reafiada, sua largura diminui e SALES (1990) recomenda descartá-la do trabalho, quando a largura se reduz em um terço da original. Essas lâminas são limitadas ao corte reto, sob pena de colisão da lateral da serra com a madeira, assim são usadas para operações de desdobro.

Lâmina estreita

Possuem largura menor ou igual a 50,8 mm (2"), são usadas quase que exclusivamente em máquinas verticais, para o corte secundário. Fabricadas em aço de alto teor de carbono, possuem a vantagem de cortar reto ou em contornos, em trabalhos de recorte. As lâminas estreitas não estão vinculadas à largura dos volantes, pois seus dentes ficam sobre uma manta de proteção.

Espessura da lâmina

Muitos autores estabelecem que o diâmetro dos volantes "**Dv**" [mm] deve ser no mínimo 1000 vezes a espessura "**e**" [mm] da lâmina larga, sob pena de ocorrência de trincas na lâmina. A Tabela 4.1 fornece valores usuais de espessura da lâmina.

Tabela 4. 1 - Dimensões de serras de fita comercializadas, (extraído dos catálogos dos fabricantes: STARRET e SATURNO).

LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	TIPO DE DENTE	PASSO (mm)
9,5	0,5 - 0,6 e 0,7	C	5,0
12,7			6,0
15,9			7,0
19,0	8,0		
25,4	0,5 - 0,6 - 0,7 e 0,8		9,0
31,7	0,6 - 0,7 e 0,8		10,0
38,7	0,7 e 0,8		12,0
45,0	0,7 e 0,9		12,0
50,8	0,8 e 0,9		14,0
63,5	0,8 - 0,9 e 1,0		15,0
75,0	0,9 e 1,0	P	40,0
88,0			
100			
114,3			
125,0	0,9 - 1,0 - 1,1 e 1,2		45,0
150	1,0 - 1,1 e 1,2		
180	1,0 - 1,1 e 1,2		
200	1,1 - 1,2 - 1,3 e 1,47		
	1,25 - 1,3 e 1,47		
	1,25 e 1,47		

Perfil dos dentes

Para as lâminas de fita estreita, existem dois tipos de perfil, representados na Figura 4.2. O perfil 4(a) é um perfil mais resistente, mas com uma pequena garganta, é indicado para madeira seca e dura. O perfil 4(b) possui grande garganta, dentes mais esbeltos e tem aplicação geral.

A Figura 4.2 mostra também os três tipos de perfil para lâmina larga:

- Perfil tipo 1 ou C, possui garganta ampla e boa rigidez, e é usado para operações de desdobro no corte de qualquer madeira (TUSET & DURAN, 1986);
- Perfil tipo 2 ou P, permite fracionar o cavaco mais facilmente e é usado para todo o tipo de madeira;

- Perfil tipo 3 ou especial, possui ângulo de saída e espaço da garganta muito amplo, devido a estas características é usado no serramento de madeira macia.

Figura 4. 2 - Tipos de perfil de dentes para lâminas de serra larga e estreita (TUSET & DURAN, 1986).

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 a seguir, conforme TUSET & DURAN (1986):

- Lâminas para madeiras macias devem ter maior altura que para madeira dura;
- Maior em lâminas recalcadas que em lâminas travadas;
- Aumentando-se a largura e a espessura, pode-se aumentar a altura do dente;
- Não deve ultrapassar dez vezes a espessura;
- Para lâminas com largura entre 100 e 150 mm, a altura pode ser selecionada a partir dos seguintes critérios:

Para madeiras macias: Lâminas com dentes recalcados, a altura igual a um terço do passo. Lâminas com dentes travados, altura de três vezes e meia a quatro vezes menor que o passo;

Para madeiras duras: Lâminas com dentes recalcados, altura três vezes e meia a quatro vezes menor que o passo. Lâminas com dentes travados, altura cinco vezes menor que o passo.

Garganta dos dentes

Possui as funções de: em um primeiro instante, alojar a serragem produzida no serramento; e em um segundo momento, removê-la para fora da região do corte. Para uma boa performance da lâmina, as partículas de serragem devem permanecer na garganta até seu descarregamento. 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.

Nessa 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. Aumentar o tamanho da garganta não é uma boa saída, e em muitos casos pode acontecer um efeito inverso de aumentar a quantidade de serragem saindo pela lateral do dente.

A solução para esses problemas seria o usuário da serra de fita conhecer todos os parâmetros envolvidos e adequá-los à capacidade da lâmina. Contudo, a capacidade da garganta de um dente depende da relação de vários fatores, que dificultam os cálculos, como: densidade e umidade da madeira cortada, e da fração do volume da garganta que efetivamente é utilizada para abrigar a serragem. Segundo KOCH (1964) aproximadamente $\frac{3}{5}$ do volume total da garganta são preenchidos por serragem.

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-lo em elementos de forma geométrica simples, conforme SALES (1990). Na Figura 4.3, observam-se 12 quadrados iguais (1,2,3,4,5,6,12,13,14,15,19 e 20). Somando os elementos restantes obtêm-se mais 5 quadrados (7+10, 11+8, 18+23+9, 17+22+24 e 21+25), o que resulta no total de 17 elementos. Assim, o cálculo da capacidade da garganta é feito multiplicando o valor da superfície desses 17 elementos encontrados, pela espessura de corte.

Figura 4. 3 - Ilustração geométrica para cálculo do volume da garganta de um dente de serra (SALES, 1990).

Um meio de quantificar a capacidade da garganta é o Índice de Ocupação da Garganta (IOG), demonstrado por LUNSTRUM (1986). É um índice adimensional, definido como a razão do volume de madeira convertida em serragem que pode ocupar o volume da garganta. Por exemplo, uma garganta com volume de $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ pode conter $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ de madeira transformada em serragem, ou seja, seu IOG é 0,7 ($1,8 \cdot 10^{-3} / 2,6 \cdot 10^{-3}$).

Passo dos dentes da serra

A distância da ponta de um dente ao outro adjacente é conhecida como passo da serra. Esse parâmetro determina o número de dentes que estará atuando em uma peça de madeira de uma determinada altura. Conforme TUSET & DURAN (1986), os seguintes fatores devem ser considerados para selecionar o passo adequado:

- Velocidade de Corte: Para aumentar esta velocidade, 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 passo menores que as macias; assim como madeiras secas necessitam de passos menores que as de estado verde; já madeiras abrasivas são cortadas mais facilmente com passos maiores;
- Altura de Corte: Recomenda-se manter pelo menos de 3 a 5 dentes trabalhando durante o corte, para repartir 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 for a largura das serras, maior deverá ser o passo. Pode-se verificar pela Tabela 4.1 que o passo de uma lâmina larga é maior que o de uma lâmina estreita. Isto é explicado por KOCH (1964): devido às lâminas largas trabalharem a altas velocidades de corte em peças com grandes altura de corte, precisam de uma passo maior para conter uma grande garganta, para alojar a serragem produzida. A Tabela 4.2 apresenta os passos recomendados em função da densidade.

Tabela 4. 2 - Passos recomendados para lâminas (TUSET & DURAN, 1986).

Largura [mm]	Espessura [mm]	Passo [mm]			
		Travado		Recalcado	
		Madeira macia	Madeira dura	Madeira macia	Madeira dura
50	0,9	12	12	-	-
60 a 75	1,06 a 1,07	25 a 32	20 a 21	35 a 40	30
80 a 90	1,07 a 1,10	32 a 35	22	40 a 44	35 a 38
100	1,07 a 1,10	35 a 38	22	44	35 a 40
125	1,07 a 1,24	38 a 40	22 a 25	44 a 45	38 a 44
150	1,24 a 1,47	40	25	45 a 50	38 a 44
180 a 200	1,47	40 a 50	25 a 30	45 a 57	44 a 51

Folga lateral do dente

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). A Figura 4.4 ilustra a folga lateral de um dente.

Figura 4.4 - Folga lateral em um dente de serra recalcado (adaptado de LUNSTRUM, 1986).

Tipicamente, madeiras macias requerem folgas laterais que aumentam a espessura de corte de 40 a 50% da espessura da lâmina, enquanto que para madeiras duras aumentam em aproximadamente 25%.

4.3 PREPARAÇÃO DA LÂMINA

Soldagem

A solda é um procedimento utilizado para unir os extremos de uma lâmina de serra e para reparar fendas e dentes. As serras de fita estreitas devem de preferência ser soldadas em uma máquina de solda elétrica, enquanto que as serras largas são soldadas com o ferro de soldar. A solda oxi-acetilênica é empregada para reparar os dentes e possíveis fendas. A empresa UDDEHOLM do Brasil apresentou, em 1973, as formas de soldar a lâmina de serra, como a seguir:

- Soldagem por Resistência Elétrica: Este é um processo de solda de topo, em que o calor necessário para fundir o aço da lâmina é gerado pela resistência elétrica do aço, devido à passagem de uma corrente elétrica fornecida pelo transformador da máquina de soldar. Após a junção segue-se um revenimento feito na mesma máquina, para aliviar as tensões produzidas durante o processo.
- Soldagem com Ferro de Soldar: Neste processo emprega-se um material de adição, geralmente uma liga formada por 45-65% de prata, aproximadamente 25% de cobre, 10% de zinco e 5-10% de cádmio. A temperatura de fusão dessa liga está entre 670-720 °C, portanto abaixo da temperatura de têmpera do aço.

Travamento e recalque

O travamento e o recalque são artifícios usados para evitar o contato do corpo da serra com a madeira e auxiliar na remoção da serragem, ou seja, propiciam a folga lateral. As dimensões, tanto do travamento quanto do recalque, estão ligadas à espessura da serra e ao tipo da madeira, conforme TUSET & DURAN (1986), da seguinte forma:

- Para travamento: Para corte de madeira macia, fazer travamento com meia espessura da serra de cada lado. Para madeiras duras, o travamento deve ser de um quarto da espessura da serra para cada lado.
- Para recalque: Para corte de madeira macia, 0,4 a 0,6 mm da espessura para cada lado. Para madeiras duras, 0,3 a 0,4 mm da espessura para cada lado.

Os dentes de serra larga são geralmente recalcados, enquanto em lâminas de serra estreita podem ser tanto recalcados como travados. Contudo, serras menores de 19 mm de largura são mais facilmente travados que recalcados, pois seus pequenos passos dificultam o trabalho de recalque.

Conforme KÄLVEMARK (1973), dentes recalcados são mais resistentes; sua resistência ao desgaste é maior, devido ao aumento de dureza pelo encruamento da ponta; e possibilita maiores avanços da madeira com menor vibração. Tabela 4.1 fornece as espessuras, tipo de dente e passo, em função da largura.

Afiação

Conforme artigo publicado pela empresa UDDEHOM do Brasil em 1973, a afiação pode ser feita em uma máquina limadora ou, no caso mais usual, em uma máquina afiadora dotada de rebolos. Os rebolos são constituídos de óxido de alumínio, com diversas granas, conforme a dureza do dente e acabamento necessário.

As máquinas afiadoras possuem as vantagens de permitir maior produtividade e repetibilidade, porém devem ser muito bem controladas para evitar superaquecimento dos dentes. Isso pode provocar a perda de dureza dos dentes e diminuir a resistência ao desgaste, ou quando a temperatura da têmpera do aço é atingida, forma-se martensita. Essa estrutura é extremamente dura e quebradiça e sua presença aumenta a possibilidade de formação de trincas por fadiga.

Tensionamento

Lâminas largas são submetidas a um tratamento especial conhecido como tensionamento ou laminação. Essa etapa de preparação consiste em diminuir a espessura da parte central do corpo da serra, caracterizada por um formato simétrico ou não, dependendo da forma dos volantes. A intenção é induzir um estado de tensão residual e permitir que a lâmina possua um dorso convexo. Assim, quando a serra estiver esticada sobre os volantes, haverá um relaxamento parcial das tensões de tensionamento na parte fletida da lâmina. As partes dorsal e dentada estarão com maior tração que a central, tornando-se mais rígidas, e a lâmina suportará maior pressão lateral ao avanço da madeira (maior estabilidade).

Ao decorrer do serramento, a tensão de tração dada à tensão de esticamento diminui na frente da lâmina, sob o efeito do aquecimento dos dentes. Isso pode ser compensado por um tensionamento não simétrico de modo a dar uma sobretensão à frente em relação as costas.

No tensionamento, o nível de carga é introduzido por aproximação dos roletes de maneira que a altura de passagem da lâmina seja menor que sua espessura, introduzindo dessa forma um gradiente de deformação transversal por conformação plástica da lâmina. Uma porção de material se desloca, levando ao alongamento da lâmina na direção de ação dos roletes. As bordas se opõem à deformação da parte mediana, criando, assim, uma situação de tensão residual. A deformação remanescente não é permanente, as solicitações físico-mecânicas conduzem a um relaxamento parcial das tensões residuais e por essa razão é necessário tensionar freqüentemente, conforme a dificuldade do serramento. No caso de afiações freqüentes, o centro original aproxima-se da banda dentada, o que deslocaria a lâmina em funcionamento da posição correta nos volantes, o que também é resolvido com um novo tensionamento.

O tensionamento é efetuado de preferência antes da soldagem. Todo o processo é efetuado de acordo com um plano pré-estabelecido, passo a passo, iniciando-se no centro onde é aplicada a maior pressão dos roletes. As passagens dos roletes são feitas uma vez à direita, uma vez à esquerda do centro da serra, com a pressão diminuindo gradativamente. É aconselhável as passagens serem feitas várias vezes, evitando o tensionamento além do desejado, sobrecarregando o aço e formando irregularidades, como, por exemplo, saliências e cavidades. Essa sucessão de operações gera um campo de tensões residuais na lâmina que se aproxima à forma parabólica, conforme Figura 4.5.

Figura 4. 5 - Campo de tensão, de tração e de compressão formado na largura da lâmina (**b**), após tensionamento (SALES, 1990).

Para introduzir uma deformação durável, os esforços exercidos sobre a lâmina pela máquina de tensionar devem ser suficientes para produzir deformações no regime elástico-plástico. Se a tensão for inferior ao limite elástico do aço, a deformação se anula ao cessar a pressão. Em regime elástico-plástico, o aço apresenta características intermediárias, comportando-se elasticamente ao descarregamento, contudo uma deformação remanescente subsiste em função das cargas que foram aplicadas, do módulo de elasticidade do aço e seu limite elástico (Figura 4.6).

Figura 4. 6 - Deformação elástico-plástica na lâmina devido ao tensionamento (adaptado de SALES, 1990).

De acordo com SALES (1990), com grande tensão de esticamento, e uma máquina com volantes abaulados e condições de serramento não muito severas (sem aquecimento exagerado da lâmina) é possível se utilizar uma lâmina não tensionada. Lâminas destinadas a volantes chatos podem ser tensionadas e tradicionalmente são menos tensionadas que lâminas para volantes abaulados.

Endireitamento

Após o tensionamento segue-se o endireitamento, processo pelo qual a lâmina é examinada gradativamente ao longo de seu comprimento sobre uma mesa de endireitamento.

As eventuais saliências e pequenas imperfeições causadas às lâminas no decorrer de sua fabricação, são eliminadas a golpe de martelo especial para esta função. Uma saliência de um lado é acompanhada por uma cavidade de outro e o endireitamento deve ser conduzido com cuidado para não mudar uma saliência para o lado oposto.

Controle de torção

Após endireitar, controlar a forma do dorso e tensionar, é necessário verificar a torção da lâmina. Este defeito ocorre devido à manipulação incorreta da lâmina ou volantes mal alinhados. Para avaliar a torção, coloca-se a lâmina com o dorso ou a borda dentada sobre uma superfície plana, e verifica-se se está totalmente apoiada. Caso estiver torcida, dois lados extremos estarão suspensos.

4.4 DESGATE, MATERIAIS E TRATAMENTOS DA LÂMINA

4.4.1 Desgaste

De acordo com SALES (1990), o desgaste do dente, ao curso do serramento, é um fenômeno complexo, resultante da interação de numerosos fatores, que dependem:

- Da natureza da madeira (características físicas, mecânicas, químicas e de parâmetros susceptíveis de se modificar, principalmente o teor de umidade);
- Da ferramenta (forma geométrica e material que a constitui);
- Das condições de corte (velocidade de avanço e velocidade e altura de corte).

O conjunto de esforços aplicados à lâmina, variável pelo conjunto de parâmetros fixados, aumenta com a degradação da ferramenta e atinge ao decorrer do tempo de corte, um valor tal que o serramento torna-se praticamente impossível. A perda das condições de trabalho se manifesta, sobretudo, cada vez maior, do percurso da serra na madeira até um ponto em que o operador da máquina não considera aceitável. A reconstituição do estado da lâmina é indispensável e não concerne somente à afiação dos dentes, mas também do corpo da lâmina (endireitamento e tensionamento), sendo a frequência de intervenções no corpo da lâmina diferente das afiações.

Com uma lâmina com dentes recém-afiados, o esforço de corte aumenta rapidamente nos primeiros metros de corte e depois de modo menos progressivo, correspondendo a uma situação normal de trabalho. Isto corresponde a uma rápida deterioração da serra afiada, alcançando um perfil mais arredondado, visto na Figura 4.7, e evoluindo em seguida de forma mais lenta.

Figura 4. 7 - Evolução do perfil do dente em função do desgaste (SALES, 1990).

A noção de desgaste tem um valor subjetivo. O aumento da força de corte, devido à deterioração do dente, pode ser compensado pela diminuição da velocidade de avanço da madeira, e/ou por uma menor altura de corte. Dessa forma, uma lâmina que passou de um limite satisfatório para um determinado serviço, pode ser usada para outro, com parâmetros mais adequados à nova situação.

Materialização do fenômeno de desgaste

O desgaste dos dentes se traduz por uma modificação de sua geometria na vizinhança de sua aresta de corte, as superfícies de saída, de folga lateral e dorsal são afetadas pelo fenômeno. Sabe-se, intuitivamente, que um dente apresentando um grande recuo da aresta, mas conservando uma boa acuidade, trabalha em melhores condições que um dente com pequeno recuo, mas com perfil muito arredondado.

Em laboratório, o desgaste é estudado pela medida do recuo da aresta e pela evolução da geometria da ferramenta, tendo como referência marcações gravadas sobre a superfície de folga. Após determinado trabalho, o grau de desgaste é quantificado em microns, pelo recuo da aresta em relação às marcações, mostrado na Figura 4.8. Na indústria, a apreciação do nível de desgaste é limitada ao exame táctil e visual da aresta, feito quando o operador da máquina percebe o comportamento da lâmina insatisfatório. Pode ser associado em termos de aumento de esforços de corte, em função do comprimento de corte ou tempo de corte.

Figura 4. 8 - Medida do desgaste (SALES, 1990).

Outras evoluções do perfil levam o desgaste a se materializar de modo diverso:

- Deformação da cunha: Ocorre geralmente serrando madeira dura. A elevação de temperatura leva a uma perda da resistência mecânica da ponta do dente, e este se dobra sob efeito de pressões exercidas pela madeira, provocando um desgaste catastrófico, visto na Figura 4.9;

Figura 4. 9 - Deformação da cunha de corte em função da temperatura (SALES, 1990).

- Queima do Dente: É devido à solicitação do dente a uma temperatura suficientemente elevada para o aço da serra se oxidar ao ar. As regiões da superfície de folga e de saída, dessa maneira afetadas, apresentam uma coloração variando do negro ao alaranjado, conforme a temperatura a que foram expostas. A deformação da cunha de corte e a queima do dente freqüentemente ocorrem juntas;
- Deformação da Aresta de Corte e das Pontas Laterais dos Dentes: O desgaste pode recuar à linha da aresta de corte de modo irregular, caracterizado por um desgaste maior nas pontas ou no meio. Pode também deformar as pontas laterais dos dentes tornando-as arredondadas ou salientes.

Origens físicas do desgaste

O desgaste se origina de fenômenos mecânicos e de fenômenos físico-químicos. A importância deste último depende muito da natureza da madeira serrada e dos parâmetros de corte. Os fenômenos de origem mecânica são preponderantes no serramento de madeiras densas e abrasivas. O desgaste mecânico provoca uma perda de material, devido a atrito da madeira sob as áreas em contato. As fibras comprimidas na madeira, durante o corte, se destacam da peça e se distendem, induzindo atrito sobre as superfícies de folga lateral e dorsal.

A ação do corte ocorre sobre a superfície de saída e a intensidade do atrito formado é diretamente dependente da resistência mecânica do cavaco, e aumenta com sua espessura e a densidade da madeira, diminuindo com o aumento do teor de umidade. A elevação de temperatura e/ou a presença de elementos minerais mais duros que o aço da serra, têm influência importante no fenômeno de desgaste.

Temperatura de corte

O aço da lâmina, sofre uma redução considerável de sua dureza e propriedades mecânicas, quando a temperatura de serviço alcança níveis elevados. O resultado é um desgaste rápido e uma deformação excessiva da ponta do dente (esmagamento ou deformação), sob efeitos das pressões exercidas pela madeira.

A elevação de temperatura do dente depende da espécie e das condições de corte. Um dente que entra à temperatura ambiente em uma madeira dura e densa, apresenta, na sua saída, uma temperatura muito elevada, que aumenta com a espessura do cavaco e altura de corte, podendo alcançar 400 °C (medida a menos de 500 microns da aresta), diminuindo rapidamente em direção ao corpo da lâmina.

Os dentes, no decorrer do serramento, têm sua temperatura como função do efeito acumulativo, devido a cortes sucessivos. Ao cortar uma determinada altura de madeira, a temperatura do dente aumenta com o comprimento de corte e, então, pela passagem pelo ar é resfriado. A temperatura diminui, mas o tempo de passagem pelo ar é geralmente insuficiente, para dissipar todo o calor adquirido no corte. Ao penetrar novamente na madeira, uma nova quantia de calor é acrescentada à residual, o que leva a um efeito acumulativo, podendo causar temperaturas muito elevadas. A temperatura aumenta gradualmente até um regime de equilíbrio, sendo a temperatura máxima na saída e mínima na entrada da madeira.

A temperatura de 250 °C é crítica para os aços pouco ligados, no caso da lâmina de serra de fita, nota-se uma diminuição progressiva da dureza. Entretanto, os diferentes tratamentos térmicos, a que o aço de uma serra é submetido no decorrer do corte, deixam particularmente complexa a interpretação do desgaste em função da temperatura. Aquecendo-se esse aço acima do limite crítico e resfriando-o rapidamente, uma fração mais ou menos importante da austenita é transformada em martensita, conferindo maior dureza e resistência ao desgaste. Assim, chega-se a situações aparentemente contraditórias, em que um serramento com madeiras menos abrasivas e menos densas pode levar a desgaste superficial superior em relação às madeiras tidas como mais difíceis de usar.

Fenômeno físico-químico

Devido ao atrito madeira-ferramenta, os dentes são expostos a potências elétricas elevadas, levando a um fluxo de elétrons e a uma corrente de caráter iônico, associado a um transporte de massa, oriundo do material do dente. Esse desgaste eletro-químico agrava o desgaste termo-mecânico. A corrente elétrica, circulando entre a ferramenta e a madeira, é pequena (alguns mili-amperes) devido à resistência elétrica alta da madeira. No entanto, os potenciais são elevados (dentes com potenciais positivos) e se traduzem em desgaste do metal.

Espécie de madeira

Abrasividade

O elemento natural que mais contribui para a abrasividade da madeira e o desgaste da serra, é o óxido de silício (SiO_2), ou simplesmente "sílica". Encontrada na madeira sob a forma de cristais, que variam desde imperceptíveis ao microscópio óptico, a visíveis a olho nu, é expressa em porcentagem da massa total de madeira isenta de água em uma análise química. Sendo mais dura que o aço dos dentes, provoca a micro usinagem do aço da lâmina.

Os fatores que tendem a agravar o grau de abrasividade, com a presença de sílica, são: a elevação de temperatura e a densidade da madeira, que aumenta a resistência da matriz em que se encontram os cristais. Uma madeira macia com determinado teor de sílica pode ser mais abrasiva que uma madeira mais dura e com menos sílica.

O teor de sílica é muito variável de uma espécie a outra e, dentro de uma mesma espécie, de uma árvore a outra. Entre as espécies com teor de sílica menor e maior, o teor de sílica varia de 0,001% a mais de 1% e para a maioria de espécies de uma floresta natural, esta relação varia de 1 a 10 vezes, dentro da mesma espécie. Geralmente, o teor de abrasividade da madeira condiciona a escolha do material e do tratamento térmico da lâmina de fita, contudo as madeiras que possuem teores de sílica maiores que 1% são impróprias para o serramento industrial.

O fator espécie é indiscutivelmente preponderante quanto à resistência ao desgaste de uma lâmina de serra. Os parâmetros de corte e a umidade da madeira permitem limitar o desgaste em proporções menores devido à abrasividade intrínseca (teor de sílica e densidade) de cada madeira. Dessa forma, melhorias quanto à duração da vida da lâmina de serra estão relativamente limitadas a pesquisas de melhores condições de corte e de novos materiais para a fabricação das serras, sendo que é muito difícil reduzir a abrasividade de uma espécie de madeira.

Teor de umidade

O coeficiente de atrito entre a madeira e o aço é menor para a madeira verde que para a madeira seca, ou seja, é menor o desgaste por atrito e aquecimento dos dentes, cortando madeiras verdes.

A condutividade térmica da madeira aumenta em relação à quantidade de água presente, e uma parte do calor adicionado, a cada ciclo de corte, pode ser dissipado com a água, que funciona como líquido refrigerante, contribuindo para manter a temperatura do dente a um nível razoável. O corte com refrigeração é muito interessante quando a temperatura for elevada.

Velocidade de corte e altura de corte

As velocidades de corte usual no corte de madeira por uma serra de fita não exercem influência direta sobre o atrito madeira-ferramenta, mas em contrapartida, condicionam a temperatura do dente em trabalho, e por esta razão influenciam no fenômeno de desgaste.

O tempo de passagem do dente ao ar, em um ciclo de serramento, é tanto menor, quanto maior for a velocidade de corte, sendo, desta forma, menor o calor dissipado. O efeito acumulativo pode, desse modo, levar a aresta a temperaturas de trabalho muito elevadas. Em relação ao aumento da altura de corte, este acarretará a elevação da temperatura do dente e seu desgaste mecânico. A seguir, são apresentadas as velocidades de corte de desdobro em relação ao tipo de madeira e altura de corte, enunciados por SALES (1990).

- Madeira dura e muito abrasiva em grande altura de corte, usar velocidade de corte da ordem de 25 m/s;
- Madeira dura e muito abrasiva a pequena altura de corte, ou madeira mediantemente abrasiva em grande altura de corte, usar velocidade de 25 a 35 m/s;
- Madeira mediantemente abrasiva em pequena altura de corte, ou madeira pouco abrasiva em grande altura de corte, usar velocidade de 35 a 45 m/s;
- Madeira pouco abrasiva em pequena altura e madeira muito pouco abrasiva, usar velocidade acima de 45 m/s.

Influência da espessura do cavaco

No serramento com cavacos finos, o desgaste não se processa da mesma forma que com cavacos espessos. No corte com cavacos finos, o desgaste se manifesta com maior intensidade na superfície de folga. Em cavacos espessos, ele se distribui de modo mais eqüitativo, entre a superfície de saída e a superfície de folga e o dente conserva por mais tempo a forma e acuidade.

4.4.2 Materiais da Ferramenta

SALES (1990) relaciona os seguintes materiais para a fabricação de lâminas:

- Aços ao carbono: As lâminas de aço ao carbono de serras de fitas possuem dureza variando entre 45 a 50 HRC e porcentagem de carbono de 0,6 a 0,8%. Com teor de carbono de 1 a 1,2%, a dureza a frio se aproxima da dureza dos aços rápidos e do stellite, contudo perdem rapidamente resistência, quando a temperatura de corte ultrapassa 250 °C. A Figura 4.10, apresenta a influência da temperatura sobre a dureza em cada material da ferramenta.

Figura 4. 10 - Influência da temperatura na dureza dos materiais (SALES, 1990).

- Aços rápidos: Existem aços rápidos com dureza superior a 65 HRC, e que conservam sua dureza até 650 °C. São muito usados para fabricação de lâminas destinadas ao corte de aços, contudo sua utilização para madeira não é difundida.

Os principais elementos de liga dos aços rápidos são: carbono (0,8 a 1%), tungstênio (16 a 18%), vanádio (1 a 2%), molibdênio (0,5 a 1%), cromo (3 a 5%), manganês (0,3 a 0,5%), titânio (0,8 a 1%) e cobalto (1,7 a 2,5%).

- Stellite: É uma liga metálica empregada em dentes de lâminas de serra para desdobro. 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, acima de 700 °C. Uma outra vantagem do stellite é possuir baixo ponto de fusão, comparado a outros aço ligados, em média 1300 °C.

O stellite é adicionado na forma de pastilhas e soldado, 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 a ele a forma adequada e afiação. Os construtores de máquinas possuem modelos de retificadoras de dentes e máquinas automáticas de depositar stellite.

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 1 e 12 são os mais usados por possuírem menor ponto de fusão e dessa forma maior facilidade para a "stellitagem", e apresentam dureza média de 50 e 55 HRc, respectivamente. A seguir, a Tabela 4.3 ilustra a composição do stellite de grau 1 e 12 e sua nomenclatura americana.

Tabela 4.3 - Composição do stellite e sua nomenclatura americana (SALES, 1990).

Nomenclatura francesa	Grau 1	Grau 12
Nomenclatura americana	Stellite 20	Stellite 12
Carbono (%)	2,5	1,8
Cromo (%)	33	30
Tungstênio (%)	13	9
Cobalto (%)	50	58
Outros (%)	1,5	1,2

4.4.3 Tratamento Superficial e Térmico

Tratamento superficial

Tratamento superficial é toda técnica que modifica as propriedades superficiais da ferramenta e que não afeta as características do material além de algumas dezenas de microns de profundidade. Entre as técnicas de tratamento superficial, atualmente apenas a eletro-deposição pode ser empregada em lâmina de serra de fita.

- Eletro-deposição: Este tratamento deposita uma camada fina de carboneto de tungstênio ou de titânio. É mais que um simples depósito, pois ocorre uma pequena difusão de carbonetos no material base, suficiente para conferir um boa difusão ao revestimento. O tratamento é feito após a afiação da lâmina, devendo ser refeito a cada afiação. A eletro-deposição ainda está pouco desenvolvida para a serra de fita, contudo verificando o serramento de madeiras abrasivas, em meio industrial, este tratamento vem demonstrando performances análogas às de lâminas com stellite.

Tratamento térmico

O tratamento térmico possui três etapas, descritas a seguir:

- Austenitização: Esse tratamento endurece mais o aço, mas, em contrapartida, o deixa mais frágil. A temperatura média de austenitização está entre 850 a 900 °C para um aço carbono de lâmina de serra de fita, a dureza fica entre 45 a 65 HRc, e a ruptura a frio diminui de 1500 para 1100 MPa. A presença de cromo, silício, tungstênio ou molibdênio aumenta ligeiramente a temperatura de endurecimento.

- Têmpera: O resfriamento após a austenitização condiciona a resistência mecânica do aço, e se for mal conduzida pode levar a uma fragilização do aço. As velocidades ótimas de resfriamento na têmpera estão entre 3 e 11 °C/s, pois nessas velocidades a resistência mecânica varia pouco e o tratamento é seguro.
- Revenimento: Este tratamento térmico tem a função de reduzir a fragilidade do aço após a têmpera, e conduz a uma perda de dureza. O revenimento deve levar a um aumento das resistências mecânicas sem anular os efeitos benéficos das operações anteriores.

A temperatura de revenimento para um aço ao carbono é próxima de 500 °C, aumentando ligeiramente esta temperatura, reduz-se ainda mais a dureza do aço. Um revenimento de um aço ao carbono por 30 minutos alcançará uma resistência mecânica de 1500 MPa com uma dureza de 60 HRc, e após 2 horas uma resistência de 2000 MPa para uma dureza entre 45 a 50 HRc.

5 SERRAMENTO EM OPERAÇÃO DE DESDOBRO (ESTUDO DE CASO)

5.1 INTRODUÇÃO

O presente estudo refere-se ao acompanhamento e monitoração do trabalho de desdobro de toras de madeira da espécie *Pinus oocarpa*, realizado na empresa SERRARIA SANTO ANTONIO Ltda, no município de Agudos - SP.

O objetivo principal dessa experimentação foi de confrontar os parâmetros do processo de serramento por serra de fita em operação de desdobro, empregados na prática, em relação àqueles recomendados pela literatura.

A escolha da referida empresa deu-se pelo fato de a mesma possuir um sistema de produção adequado, com equipamentos automatizados, o que possibilitou instrumentar a operação de desdobro sem interferir nas variáveis do processo, resultando num acompanhamento em condições reais de trabalho.

5.2 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Dados da produção e do equipamento

A empresa, no período da experimentação, apresentava um volume de produção em desdobro de 2.000 metros cúbicos estéreo por mês, correspondente a aproximadamente 1.400 m^3 de madeira maciça roliça, de toras da espécie *Pinus oocarpa* com teor de umidade médio de 48%, comprimento de 2,4 m e diâmetros entre 14 e 50 cm. Considerando-se o regime de um turno de trabalho (160 horas/mês), podemos considerar um volume de produção de aproximadamente $8,7 \text{ m}^3$ de madeira maciça roliça por hora de serramento.

O equipamento empregado no serramento consta de uma máquina de serra de fita, modelo vertical, marca IKL, com volantes de 80 cm de diâmetro e motor trifásico de 30 CV, 608 RPM no volante motor, resultando numa velocidade de corte de 25,5 m/s, velocidade de avanço do carro de alimentação entre 0 a 40 m/min e velocidade de retorno de 0 a 80 m/min. O sistema de alimentação possui acionamentos pneumáticos de posicionamento da tora no carro de transporte, de rolagem da tora sobre o carro e de fixação da tora. O tracionamento do carro transportador é feito por cabo de aço através de tambor com comando hidráulico, e a velocidade de alimentação é controlada por sistema de frenagem de forma sensível pelo operador da máquina.

A ferramenta de corte empregada durante a experimentação foi uma serra de fita de lâmina larga, com geometria dos dentes tipo P, em estado de recém-afiação, com largura de 110 mm, passo de 45 mm, ângulo de saída de 15° , espessura da lâmina de 1,27 mm, dentes recalcados com espessura de 2,54 mm, portanto com recalque de aproximadamente 0,63 mm para cada lado da lâmina.

Instrumentação e aquisição de dados

A instrumentação do processo de serramento deu-se através da conexão de um instrumento de medição multifunção tipo alicate (modelo ALFA-9001) no painel de distribuição de energia elétrica da máquina. O medidor foi ligado a um sistema de aquisição de dados computadorizado através de interface RS-232 e, em tempo real foram registrados os valores das seguintes funções: Tensão (V), Corrente (A) e Potência ativa (Kw). Um software específico foi utilizado para aquisição e registro dos dados. Para medir o teor de umidade, utilizou-se o aparelho Digisystem (modelo DL 822).

Procedimentos de ensaio

Dada a necessidade de se efetuar a medição das funções nas três fases do painel elétrico, optou-se por selecionar três toras no estaleiro de alimentação da serra. Essa seleção foi feita de forma aleatória, porém com diâmetros próximos de 40 cm, dado o maior tempo de serramento e conseqüentemente maior quantidade de dados adquiridos. Dessa forma, foram selecionadas as amostras com os seguintes diâmetros médios: tora1 - 41,5 cm, tora2 - 39 cm e tora3 - 33,5 cm.

Após cada corte numa mesma amostra, foram efetuadas três medições de umidade e largura da peça, anotaram-se os valores médio, ao mesmo tempo cronometrou-se o tempo de corte de cada peça para calcular o valor da velocidade de avanço.

Na usinagem das toras, o medidor multifunção foi conectado às respectivas fases do painel elétrico: tora1 - fase1, tora2 - fase3 e tora3 - fase 2. Apesar de amostras de diferentes diâmetros, conhecendo-se as alturas de corte é possível calcular a potência de corte pela somatória das potências de cada fase de alimentação.

As Figuras de 5.1 a 5.5, a seguir, ilustram o acompanhamento do trabalho de movimentação das toras, alimentação e serramento em operação de desdobro em serra de fita vertical, com sistema de alimentação automático.

Figura 5. 1 - Carregamento das toras.

Figura 5. 2 - Posicionamento das toras no estaleiro.

Figura 5. 3 - Tora no carro de avanço.

Figura 5. 4 - Momento do serramento.

Figura 5. 5 - Tora sendo virada.

5.3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O cálculo da velocidade média de avanço para cada tora teve como base o comprimento da tora e o tempo de corte médio.

Para o cálculo da potência fornecida pelo motor, somou-se a potência ativa média de cada fase do painel de controle, incluindo os dados de potência ativa de todos os cortes de cada tora, multiplicando-se pelo rendimento do motor. A Figura 5.6 fornece o rendimento máximo para esse tipo de motor. As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os resultados obtidos para as três toras.

Na sequência, apresenta-se a potência de corte calculada, tendo como base os parâmetros do estudo de caso e equações apresentadas na literatura.

Figura 5. 6 - Rendimento do motor (adaptado de catálogo da WEG S.A.).

Tabela 5. 1 - Resultados da TORA 1.

Corte	Altura [cm]	Tempo de Corte [s]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência Ativa [Kw]
Vazio			118,8	27,26	
1	24,6	5,2	115,0 115,3	131,1 120,3	11,4 10,5
2	34,3	6,0	118,1 113,0 116,2 118,2	53,0 180,7 100,4 68,9	4,2 14,7 8,8 5,3
3	28,3	5,6	117,0 118,7	84,9 35,2	7,4 2,5
4	25,7	5,2	114,6 116,4	142,3 97,1	12,2 8,5
5	35,3	5,7	115,9 116,9	100,5 83,9	8,8 7,2
6	35,5	5,8	117,8 114,7 114,9 115,9 115,3	48,8 140,8 128,7 111,5 122,4	4,2 12,1 11,2 9,8 10,6
7	36,0	6,3	117,6 114,4 115,2 115,3 115,6	69,1 149,0 140,2 120,7 103,4	6,6 12,7 12,2 10,6 9,0
8	35,5	5,8	114,9 116,2 115,5 115,7 117,1	97,1 108,3 121,6 126,2 38,5	8,4 9,5 10,7 11,1 2,2
9	28	4,6	115,0 115,6 114,8	115,3 123,7 146,8	10,0 10,8 12,6
Média	31,5	5,6	116,0	104,4	9,2

Velocidade de avanço (TORA1) = Comprimento da tora / tempo = 2,4 / 5,6 = 0,43 m/s ou 25,8 m/min.

Tabela 5. 2 - Resultados da TORA 2.

Corte	Altura [cm]	Tempo de Corte [s]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência Ativa [Kw]
Vazio			119,4	27,63	
1	19,7	4,0	116,9 116,4	71,1 120,0	7,0 11,2
2	27,3	4,2	116,8 114,9	116,2 138,2	10,9 12,7
3	37,5	5,8	117,1 114,2 117,2	100,5 174,9 100,7	9,4 15,4 9,5
4	40,5	6,8	115,6 114,9 118,9	133,7 162,3 31,1	12,4 14,6 1,9
5	27,0	4,7	116,4 116,0	107,9 103,9	10,1 9,6
6	38,5	5,7	117,3	64,3	6,2
Média	31,8	5,2	116,6	103,7	10,1

Velocidade de avanço (TORA2) = Comprimento da tora / tempo = 2,4 / 5,2 = 0,46 m/s ou 27,7 m/min.

Tabela 5. 3 - Resultados da TORA 3.

Corte	Altura [cm]	Tempo de Corte [s]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência Ativa [Kw]
Vazio			118,4	26,0	
1	20,0	2,0	116,7	99,6	9,6
2	25,7	4,2	114,6 115,5	110,9 123,9	10,5 11,0
3	33,0	5,8	117,6 115,8 117,2	59,3 133,0 59,6	5,5 12,6 4,4
4	24,9	5,2	118,0 115,5 116,2	42,9 120,9 94,9	3,7 11,4 8,2
Média	25,9	4,3	116,6	87,1	8,5

Velocidade de avanço (TORA3) = Comprimento da tora / tempo = 2,4 / 4,3 = 0,56 m/s ou 33,5 m/min.

O tempo médio global = 5,0 segundos

Velocidade média de avanço = 29 m/min

Potência ativa global (soma da potência ativa média de cada fase) = 27,8 Kw

Potência de corte = $0,9 \times 27,8 = 25 \text{ Kw} = 34 \text{ CV}$

Potência de corte calculada

Dados Iniciais:

$Dv = 0,8 \text{ m}$; $R = 608 \text{ rpm}$; $V_f = 29 \text{ m/min}$; $\gamma = 15^\circ$; $K = 2,54 \text{ mm}$, passo = 45 mm.

Do item 3.2.2. têm-se:

$$V_c = \pi \times Dv \times R = 1528 \text{ m/min (25,5 m/s)};$$

$$V_f = \frac{60 \times V_c \times \delta}{p} \Rightarrow \delta = 0,85 \text{ mm}$$

O cálculo de força de corte e potência de corte são feitos:

$$F_c = Ks1 \times K \times \delta^{1-Z} \qquad N_c = \frac{F_c \times V_c}{75}$$

sendo: F_c = Força de corte por dente [daN];

$Ks1$ = Pressão específica de corte;

K = Largura da aresta de corte [mm];

$1-Z$ = Coeficiente adimensional de "KIENZLE";

N_c = Potência de corte [CV].

Do estudo realizado por TIBURCIO (2000), obteve-se para a espécie de madeira

Pinus ssp saturada os seguintes valores de $Ks1$ e $1-Z$:

$Ks1_{(10^\circ)} = 3,56 \text{ Kg/mm}^2$ e $1-Z_{(10^\circ)} = 0,70$ (para ângulo de saída de 10°).

para $\delta = 0,85 \text{ mm}$, tem-se: $F_{c(10^\circ)} = 8,07 \text{ daN/dente}$

$Ks1_{(24^\circ)} = 2,91 \text{ Kg/mm}^2$ e $1-Z_{(24^\circ)} = 0,69$ (para ângulo de saída de 24°);

para $\delta = 0,85 \text{ mm}$, tem-se: $F_{c(24^\circ)} = 6,61 \text{ daN/dente}$

Cálculo de $F_{c(15^\circ)}$ e $N_{c(15^\circ)}$:

$$\frac{F_{c(10^\circ)} - F_{c(24^\circ)}}{24^\circ - 10^\circ} = 0,104 \text{ daN/grau};$$

$$F_{c(15^\circ)} = F_{c(10^\circ)} - (5 \times 0,104) = 7,55 \text{ daN/dente}$$

$$N_{c(15^\circ)} = 2,57 \text{ CV/dente.}$$

Calculo de potência de corte calculada:

TORA1 - altura de corte média/ passo = $31,5 / 4,5 = 7$ dentes cortando a madeira;

$N_{C(15^\circ)} \times \text{número de dentes} = 2,57 \times 7 = 17,99 \text{ CV}$

TORA2 - $31,8 / 4,5 = 7,1$ dentes cortando a madeira;

$2,57 \times 7,1 = 18,25 \text{ CV}$.

TORA3 - $25,9 / 4,5 = 5,8$ dentes cortando a madeira.

$2,57 \times 5,8 = 14,91 \text{ CV}$.

5.4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Comparando as dimensões do tipo de lâmina utilizada pela serraria e a Tabela 4.2, verifica-se que o passo está adequado para a espécie de madeira (macia) e respectivas alturas de corte, contudo a espessura da lâmina é maior que a máxima aconselhável. Levando-se em conta a espessura calculada para o diâmetro do volante usado (800 mm), tem-se: $800/1000 = 0,8 \text{ mm}$ (máximo). Este dado é bem inferior à espessura de lâmina utilizada (1,27 mm). Desta forma é de se esperar constantes perdas de lâmina por fadiga, fator este agravado por pouca intervenção de afiações.

Contudo, perdas por fadiga não são tão freqüentes devido a dois fatores principais: primeiro o material da lâmina é resistente à fadiga e, segundo, a relação de cálculo de espessura (diâmetro de volante / 1000) é a favor da segurança, fornecendo uma aproximação grosseira.

Do item 4.3. obtém-se a distância para cada lado da lâmina recalcada no serramento de madeira macia (0,4 a 0,6 mm), valor este próximo do encontrado (0,63 mm).

A máquina possui uma gama de velocidades de avanço entre 0 a 40 m/min, e as velocidades medidas foram: 25,8 m/min (TORA1); 27,7 m/min (TORA2); e 33,5 m/min (TORA3), portanto abaixo da máxima. Contudo, a potência de corte calculada foi de 34 CV, acima da potência do motor (30 CV), e ainda há picos de corrente muito elevados. O esperado seria o motor apresentar problemas a curto prazo, porém o tempo de serramento é curto e não é suficiente para danificar o motor.

Em relação à velocidade de corte utilizada (25,5 m/s), pode ser considerada como baixa, pois a espécie serrada é macia, com baixo teor de sílica e serrada no estado verde, auxiliando na refrigeração da lâmina e diminuindo o desgaste. O item 4.4.1. e 3.2.2. aconselham utilizar velocidade acima de 45 m/s, porém outros parâmetros devem ser levados em conta, por exemplo, se a velocidade de corte fosse maior, a potência exigida do equipamento seria maior, agravando o problema acima descrito.

Fez-se monitoramento de uma tora por fase, devido ao fato de o medidor multifunção possibilitar aquisição de dados de uma fase de cada vez. A potência ativa média calculada apresenta valores muito próximos para as três toras, ou seja, a força de corte para cada tora praticamente não se altera. Isto ocorre, pois a velocidade de avanço da madeira é controlada ao decorrer do corte de forma sensível pelo operador, de forma a manter constante a força de corte.

Das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, observa-se que tanto a tensão média quanto a corrente "em vazio", medidas separadamente em cada fase e em cada tora, estão muito próximas. Isto significa que todo o sistema (rede de distribuição de energia elétrica e equipamento) está balanceado, garantindo a confiabilidade dos resultados.

Utilizou-se para o cálculo de força de corte os valores de $Ks1$ e $1-Z$ de TIBURCIO (2000), pois para o caso da mesma espécie saturada estes valores não se alteram no caso de teores de umidade diferentes. A potência de corte calculada para cada tora é a potência teórica efetivamente utilizada para o corte e não pode ser comparada com a potência de corte do experimento, pois esta é a potência média exigida do motor e não leva em conta o rendimento da transmissão de potência do equipamento.

6 CONCLUSÃO

Do presente estudo, pode-se concluir:

Devido à madeira ser um material anisotrópico, no processo de serramento deve-se considerar: que o sentido de corte da ferramenta e o direcionamento das fibras influenciam diretamente nas propriedades mecânicas e de resistência ao corte; defeitos da madeira, que geram perdas de produtividade e de material; densidade, teores de umidade e de sílica influenciam a resistência ao corte e desgaste dos dentes da lâmina de serra de fita.

Em relação à ação dos esforços, devido ao serramento, verifica-se: as forças que agem perpendicularmente à lâmina são as principais causadoras do desvio do corte, e são tão mais acentuadas quanto maior for o desgaste dos dentes, maior a velocidade de avanço, menor a largura de corte e direcionamento das fibras da madeira; o teor de umidade, densidade, orientação de corte, acuidade das arestas de corte e espessura de cavaco são os fatores de maior influência no esforço de corte; a rigidez da lâmina, altura de corte e densidade da madeira serrada estabelecem a carga crítica e por conseguinte a velocidade de avanço máxima para uma determinada tolerância.

A maior parte das fissuras ocasionadas na lâmina por fadiga são eliminadas por afiações, contudo, não evitam necessariamente a quebra da lâmina, pois as trincas remanescentes se propagam de modo mais acentuado entre um intervalo de afiação e outro, até a ruptura. Desse modo, a vida útil da lâmina deve levar em conta o fator segurança e não apenas a máxima utilização da ferramenta.

O projeto da geometria da lâmina de serra e de suas dimensões, visa a uma melhor relação de eficiência e produtividade, mantendo-se as características da aresta de corte por um período prolongado, e ainda considerando as propriedades e altura da madeira serrada. Uma lâmina tensionada apresenta melhoria de sua estabilidade ao decorrer do serramento, contudo, pode-se diminuir ou eliminar o tensionamento por uma tensão de esticamento elevada.

A vantagem de serrar a madeira no estado verde é mais acentuada referindo-se ao teor de sílica e densidade, tendo em vista que para estes dois fatores a temperatura é limitante. Contudo, em muitos casos, para diminuir o desgaste, a solução é fabricar lâminas com pontas de dentes de material mais resistente que o aço carbono, nesse caso a deposição de stellite é vantajosa por ser uma técnica econômica e tecnicamente viável.

A prática do serramento em cavacos espessos conserva por mais tempo a acuidade da aresta de corte, porém o aumento dos esforços de corte exige mais do equipamento. Assim a solução é aumentar o passo e diminuir a velocidade de avanço.

Do estudo de caso da operação de desdobro de toras da espécie *Pinus oocarpa*, pode-se concluir:

A serraria utiliza uma lâmina de serra adequada para a operação, contudo, por apresentar espessura maior que a calculada, deve-se dar atenção ao aparecimento de trincas por fadiga. Em relação ao equipamento, comprovou-se que o motor de acionamento da lâmina está exigido acima de suas especificações, conforme medições e cálculos efetuados no item 5.3. Assim, o ideal seria a serraria utilizar uma máquina com motor de maior capacidade e para o caso do fabricante alterar a especificação de velocidade de avanço máxima ou o motor. Os resultados obtidos com o estudo de caso serão repassados à serraria para análise e posteriores e eventuais melhorias.

7 BIBLIOGRAFIA

7.1 REFERENCIADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6163 - **Ferramentas de usinagem, geometria da cunha cortante**. Rio de Janeiro, 1989. p.15.

_____(a). NBR-7190 - **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. p.107.

BEROLZHEIMER, C.P. Wood machining yesterday, today and tomorrow In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 7., California, 1982. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Richmond, 1982. p.2-11.

BODIG, J., JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**, New York, Van Nostrand Reinhold company, p.1-45, 1982.

CHARDIN, A. Bandsaw efficiency: developments concerned with the tooth, cutting edge, the blade, and the sawing process. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 5., California, 1977. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Richmond, 1977. p.154-164

CHARDIN, A. Ruban a Grumes vertival, horizontal ou inclinê?. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, n.74, p.51-55, nov/déc. 1960.

CHIAKI, Y.J.; ZHU, G. Surface roughness on sawing frozen wood and non-frozen wood using band saw. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.77-80.

CHIAKI, T. An Automatic control of the feed-rate of a band-saw for woodworking In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 11., Oslo, 1993. **Proceedings**. The Norwegian Institute of Wood Technology, Oslo, 1993, p.453-461.

_____. et al. Automatic detection method for damaged bandsaw teeth In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., Paris, 1999. **Proceedings**. Epinal, Cluny, 1999. V.1, p.203-210.

DUGDALE, D.S.; SARWAR, M. Fatigue strength of bandsaws with hard coatings. **Journal of Materials Processing Techonology**, v.56, n.1-4, p.729-732, 1996.

DURAN, F.; TUSET, R. **Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilizacion**. Montevideo, Agropecuaria Hemisferio Sur, 1986. 696 p.

- EKLUND, U.; HAGMAN, O.; GRÖNLUND, A. Measurement of cant feeding disturbances during sawing. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., Paris., 1999. **Proceedings**. Epinal, Cluny, 1999. v.1, p.193-202.
- FÁBRICA DE SERRA SATURNO S.A. **Tabela de especificação de serras**. São Paulo, s.ed., s.d.
- FUJII, Y. et. al. The force acting on band saw and the sawing accuracy. **Bolletín of the Kyoto University Forests**, n.56, Nov. 1984.
- GOTTLOB, W.J. **Determinação da vida de ferramentas de aço AISI classe D-6 e do stellite-1 na usinagem da madeira "Eucalipto Grandis"**. São Carlos, 1996. 152p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- HATTORI, N.; FUJII, Y.; SUGIHARA, H. Feedback control of the running position of a band saw with na actuator. **Mokuzai Gakkaishi**, v.28, n.12, p.783-787, 1982.
- HELLMEISTER, J.C. Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MEDIDAS E ESTRUTURAS DA MADEIRA, São Carlos, 1983. **Anais**. P.37
- HUBER, H. Faults during manufacture of saw blades and methods to avoid them. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 7., California, 1982. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Richmond, 1982. p.292-300
- _____. (a). Heat treatment of saws for wood processing. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 8., California, 1985. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1985. p.107-134.
- HUTTON, S.G.; LEHMANN, B.F. The role of top whell dynamics in bandmills. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 10., California, 1991. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1991. p.247-256.
- IKAMI, Y. et al. Work characteristics of the middle diameter sugi log sawing system using the bandsaw machine with carriage. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., Paris, 1999. **Proceedings**. Epinal, Cluny, 1999. v.2, p.589-596.
- INDÚSTRIA KLÜPLER S.A. **Serras de fita para desdobro de toras**. Ponta Grossa, s.ed., s.d.
- KÄLVEMARK, M. Novo aço Sandvik para lâminas de serra de fita. **Revista da Madeira**, p.7-12, Fev. 1973.
- KATO, K. Maximum feed-speed in sawing with a bandsa. **Mokuzai Gakkaishi**, v.28, n.11, p.699-704. 1982.
- KIMURA, S.; SAKAKIBARA, K.; YOKOCHI, H. Remodeled bandsaw to control washboarding during sawing. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., Paris, 1999. **Proceedings**. Epinal, Cluny, 1999. v.1, p.163-172.
- KOCH, P. **Wood machining processes**. New York, Roland Press, 1964. p.179-201.
- _____.; SZYMANI, R. Wood and humankind an overview of development of wood machining processes, and of world forest resources and use. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 11., Oslo, 1993. **Proceedings**. The Norwegian Institute of Wood Tecnology, Oslo, 1993. p.3-24.

- KOLLMANN, F. **Tecnologia de la madera y sus aplicaciones**. Madrid, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de La Madera, 1959 p.675.
- _____; COTÉ, W. **Principles of wood science and technology**. New York, Springer-Verlag, 1984. , v.1, p.475-490.
- KRILOV, A. Feed speeds in cutting silicious hardwoods by bandsaw. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 43 , p.381-384, 1985.
- LEHMANN, B.F.; HUTTON, S.G. Factors influencing bandsaw behavior during cutting. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 10., California,. 1991. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1991. p.257-267
- _____(a). Modelling of a bandsaw during cutting. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 11., Oslo, 1993. **Proceedings**. The Norwegian Institute of Wood Technology, Oslo, 1993. p.441-452.
- LOEHNERTZ, S.P.; COOZ, I.V.; GUERREIRO, J. Hardwood sawing tecnology in five tropical countries. **Forest Products Journal**, v.46, n.2, p. 51-56, Feb. 1996.
- LUNSTRUM, S.J. Balanced saw performance. **Forest Service**, n.12, p.17, 1986.
- MURATA, K.; et al. Sawing performances of band saws treated with new filing methods I - Power consumption in sawing accuracy, and roughness of sawn surface. **Mokuzai Gakkaishi**, v.39, n.11, p.1239-1245, 1993.
- _____(a). Sawing performances of band saws treated with new filing methods II - Accuracy of kerf and sawing force. **Mokuzai Gakkaishi**, v.39, n.11, p.1231-1238, 1993.
- NÉRI, A.C. **Medidas de forças de corte na madeira de eucalipto**. Campinas, 1998. 152p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- PROKOFJEV, G.F.; DUNDIN, N.I.; IVANKIN, I.I. Development of sawing machines. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., Paris, 1999. **Proceedings**. Epinal, Cluny, 1999. v.1, p.187-192
- SALES, C. **La Scie a ruban: théorie et pratique du sciage des bois en grumes**. Nogent, Centre Technique Forestier Tropical, 1990. p.152.
- SAWADA, Y. et al. Pattern recognition of the grinding sound of bandsaw teeth and its application to the automatic diagnosis of grinding conditions. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., Paris, 1999. **Proceedings**. Epinal, Cluny, 1999. v.2, p.767-773,
- STARRET INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Tabela de especificação de serras**. Itú, s.ed., s.d.
- TAYLOR, J.A. et al. A report summary of "Power requirements for sawing and chipping". In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 14., Paris, 1999. **Proceedings**. Epinal, Cluny, 1999. v.1, p.99-108.
- TIBURCIO, U.F.O. **Aplicação do método de Kienzle em experimentos de usinagem da madeira para determinação da pressão específica de corte**. Bauru, 2000. 76p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia - Universidade do Estado de São Paulo.

UDDEHOLM. fita de aço para serra para madeira. São Paulo, Uddeholm do Brasil, s.d.

WEG S.A. **Eletronic catalogue**: version 3.1. s.n.t.

7.2 CONSULTADA

CANCAR, K. High strain: theory and applications. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 8., California, 1985. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1985. p.383-404.

CHARDIN, A. Étude de l'usure des dents de scies: cap.I nécessité d'une étude de l'usure et choix d'une méthode de travail. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, n.115, p.55-67, sep/oct, 1967.

_____(a). Étude de l'usure des dents de scies: cap.I nécessité d'une étude de l'usure et choix d'une méthode de travail. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, n.114, p.65-72, juil./août, 1967.

_____(b). Displacement of band saw blades on wheels: comparison between a 5-foot and an 8-foot band saw. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 7., California, 1982. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Richmond, 1982. p.183-193.

_____; SALES, C. Bandsaw blade stability: effects of wheel geometry and tensioning. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 8., California, 1985. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1985. p.405-415.

CHIAKI T. Experimental studies of vibration of band saw blades. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 7., California, 1982. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Richmond, 1982. p.166-174.

_____;HUANG J. Automatic control of the band-saw feed speed using fuzzy control system. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.2, p.617-628.

DAS, A.K. Analysis of dynamic stability of band sawing systems. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 7., California, 1982. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Richmond, 1982. p.175-182.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos materiais**. São Paulo, Edgard Blücher, 1995. p.751.

FUJII, Y. et al. Sawing on a band-saw equipped with a controller for the band-saw running position. **Mokuzai Gakkaishi**, v.30, n.2, p.349-353, 1984.

_____; KATAYAMA, S.; NOGUCHI, M. Measurement of bandsaw deformation with moiré topography. **Mokuzai Gakkaishi**, v.32, n.7, p.498-504, 1986.

_____; NOGUCHI, M.; SAWADA, Y. Analysis of the lateral stiffness of bandsaw blades using experimental and finite element method. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 11., Oslo, 1993. **Proceedings**. The Norwegian Institute of Wood Technology, Oslo, 1993. p.498-499. /Abstract/

- GASSLANDER, J.E. Finite element analysis on bandsaw blades. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.81-90.
- GONÇALVES, M.T.T. **Contribuição para o estudo da usinagem da madeira**. São Carlos, 1990. 242p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- _____(a) **Usinagem dos Metais**. Bauru, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado de São Paulo, 1995. 95p. /Apostila/
- _____(b) **Proposta de metodologia para medição dos esforços de corte na usinagem da madeira**. São Carlos, 1993. 249p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- HATORI, N.; Sawing accuracy at Norwegian bandsaw mills. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 8., California, 1985. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1985. p.16-32.
- _____; NOGUCHI, M. Development of a bandsaw strain system without tensile force change I: mechanism of tensile force change caused by a strain system with knife edges. **Mokuzai Gakkaishi**, v.31, n.5, p.343-348, 1985.
- JONES, D.S.; HAWKINS, B.T.; MCARTHUR, E. Saw tooth stresses and deflection. **Forest Products Journal**, v.16, n.11, p. 35-44, Nov. 1966.
- KIRBACH, E.; STACEY, M. Sawing frozen and unfrozen wood with various gullet designs. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 8., California, 1985. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1985. p.33-42.
- KRILOV, A. Sawblade design- theory and practical application: geometry of the sawtooth apex, sawtooth hardness. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 43, p.277-281, 1985.
- _____(a) Sawblade design-theory and practical application: experiments, practical applications, results. **Holz als Roh und Werkstoff**, v. 43, p.351-353, 1985.
- LEHMANN, B.F.; HUTTON, S.G. The kinematics of washboarding of bandsaws and circular saws. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.205-216.
- LISTER, P.F.; SCHAJER, G.S. The effectiveness of the light-gap method for indicating changes in bandsaw frequency and stiffness. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 11., Oslo, 1993. **Proceedings**. The Norwegian Institute of Wood Technology, Oslo, 1993. p.463-484.
- MENTHIÈRE, N. Modelling on the behaviour of the bandsaw. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 11., Oslo, 1993. **Proceedings**. The Norwegian Institute of Wood Technology, Oslo, 1993. p.508, /Abstract/
- MOTE, C.D. The theory of roll tensioning of bandsaws. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 11., Oslo, 1993. **Proceedings**. The Norwegian Institute of Wood Technology, Oslo, 1993. p.409-440.

- _____(a). Some dynamic characteristics of band saws. **Forest Products Journal**, p. 37-41, Jan. 1965.
- MURATA, K. et al. Economical estimation of band saw maintenance. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.365-376.
- OKAI, R.; KIMURA, S.; YOKOCHI, H. Effects of workpiece thickness and position from the ground on self-excited vibration and washboarding during sawing. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.193-204.
- OKUMURA, O. *A theoretical approach to the cutting edge temperature in interrupted cutting of wood*. **Memoirs of the College of Agriculture**, n.127, p.29-36. dec. 1985.
- RIVAT, J.M. et al. Bandsaw performance improvement II - Some experimental aspects of parametric excitation and bandsaw blade behavior during no-load running. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.53-64.
- SUGIHARA, H. Theory on running stability of band saw blades. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 5., California, 1977. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Richmond, 1977. p.99-110.
- SZYMANI, R. Status report on the technology of saws. **Forest Products Journal**, v.36, n.4, p. 15-19, Apr. 1986.
- TAN, C.A; HUANG, D.; FAN, Q. Experimental active vibration control of moving bands. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.67-76.
- TAYLOR, T.; WHITE, J. Minimizing cutting bias in bandsaws. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.23-40.
- WANG, K.W.; MOTE, C.D. Band saw vibration under impulsive, boundary excitation: excitation by weld translation. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 8., California, 1985. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1985. p.482-507.
- _____(a). Vibration coupling analysis of band saw systems. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 8., California, 1985. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Berkeley, 1985. p.416-450.
- WONG, D.C.; SCHAJER, G.S. Effects of wheel profile on bandsaw tracking stability. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 13., Vancouver, 1997. **Proceedings**. University of British Columbia, Vancouver, 1997. v.1, p.41-52.
- WU, W.Z.; MOTE, C.D.Jr. Analysis of vibration in a band saw system. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 7., California, 1982. **Proceedings**. Forest Products Laboratory, Richmond, 1982. p.148-165.
- _____(a). Analysis of vibration in a bandsaw system. **Forest Products Journal**, v.34, n.9, p. 12-21, Sept. 1985.

8 GLOSSÁRIO

Água de Embebição - Água livre no interior da madeira.

Água de Impregnação - Água pertencente a cadeia celulósica.

Alburno - Também conhecido como xilema, é o principal tecido condutor de água e estruturalmente é constituído por diferentes tipos de células.

Alburno Primário - Região onde se forma o alburno, corresponde a uma interface entre o câmbio e o alburno.

Austenita - Ferro com estrutura CFC, ou liga ferrosa baseada nessa estrutura.

Austenitização - Tratamento térmico para dissolução do carbono no ferro CFC, formando a austenita.

Câmbio - Responsável pelo crescimento transversal do caule, é o responsável pela formação do xilema e floema.

Canais Resiníferos - Espaços intercelulares que contém resina.

Celulose - É o principal componente das paredes das células vegetais, é constituída de moléculas longas cuja unidade básica é n ($C_6H_{10}O_5$).

Cerne - A parte mais interna do alburno vai se tornando inativo para condução e reserva formando, assim, o cerne que tem função estrutural.

Coníferas (Gimnospermas) - Termos que definem madeiras resinosas, com ausência de vasos, baixa densidade e semente nu. Seus constituintes são: traqueídeos, raios medulares, canais resiníferos e células de parênquima. Exemplo: Pinus e Pinho do Paraná.

Dicotiledôneas (Angiospermas) - Termos que definem madeiras de alta densidade e com sementes no interior de frutos. Seus constituintes principais são: fibras, vasos, raios medulares e células de parênquima. Exemplo: Peroba Rosa, Imbuia, Mogno e Cerejeira.

Encruamento - Aumento de dureza devido a deformação plástica.

Fibras - Células alongadas e estreitas.

Floema - Principal tecido condutor de seiva que contem os nutrientes para as plantas.

Grana (de rebolo) - Dimensão das partículas abrasivas constituintes do rebolo.

Hemicelulose - Mistura de polímeros de baixa massa molecular que estão associados com a celulose nos tecidos das plantas.

Lenho - Alburno mais ceme.

Lignina - Substância química que confere rigidez a parede da célula, age como um agente de ligação entre as células.

Madeira de Outono - A atividade do câmbio diminui nos períodos de inverno e outono, originando os anéis de crescimento e madeira mais densa.

Madeira Dura - Madeira produzida por dicotiledôneas lenhosas.

Madeira Maciça Roliça - Volume efetivo de madeira.

Madeira Mole - Lenho produzido por árvores coníferas.

Martensita - Estrutura dura e quebradiça produzida da austenita por uma transformação cisalhante durante a têmpera.

Medula - Tecido contínuo localizado na região central do caule e da raiz. Sua função é armazenar substâncias nutritivas.

Metro Cúbico Estéreo - Volume total de madeira empilhada, corresponde ao volume de madeira maciça mais o espaço vazio entre toras.

Polímero - São macromoléculas formadas pela união de várias moléculas menores, denominadas monômeros.

Potência Ativa - Potência que efetivamente realiza trabalho.

Resserra - Máquina de serra de fita ou circular destinada a operações secundárias de desdobro de toras e de costaneiras.

Têmpera - Resfriamento acelerado após austenitização destinado a aumentar a dureza do aço.

Tensão de Esticamento - Tensão aplicada à lâmina por um sistema de esticar acoplado em um volante da máquina de serra de fita.

Tensionamento - Etapa de preparação de uma lâmina larga (página 71).

Traqueídeos - Células alongadas que conduzem a seiva bruta na direção axial nas coníferas.

Vasos - Responsável pela condução axial da seiva bruta nas dicotiledôneas.