

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**JHONATTAN JOSÉ TREJO FRANCO**

**MODELO NÃO LINEAR PARA DETERMINAÇÃO DE VIDA ÚTIL DE  
FERRAMENTA DE CORTE NA INDÚSTRIA MADEIREIRA**

**CURITIBA**

**2023**

**JHONATTAN JOSÉ TREJO FRANCO**

**MODELO NÃO LINEAR PARA DETERMINAÇÃO DE VIDA ÚTIL DE  
FERRAMENTA DE CORTE NA INDÚSTRIA MADEIREIRA**

**NON-LINEAR MODEL FOR DETERMINING THE TOOLS LIFE IN THE WOOD  
INDUSTRY**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais na área de concentração: Engenharia de Manufatura da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Milton Luiz Polli.  
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha.

**CURITIBA**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Curitiba**



JHONATTAN JOSE TREJO FRANCO

**MODELO NÃO LINEAR PARA DETERMINAÇÃO DE VIDA ÚTIL DE FERRAMENTA DE CORTE NA  
INDÚSTRIA MADEIREIRA**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Área de concentração: Engenharia De Manufatura.

Data de aprovação: 14 de Abril de 2023

Dr. Milton Luiz Polli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Osvaldo J Encinas Blanco, Doutorado - Universidad de Los Andes - Venezuela

Dr. Paulo Andre De Camargo Beltrao, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Ricardo Jorge Klitzke, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Ugo Leandro Belini, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/07/2023.

*Em memória do meu Pai...*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer sinceramente aos meus orientadores Prof. Milton Luiz Polli e Prof. Marcio Pereira da Rocha, pelo apoio e valiosas contribuições ao trabalho.

Aos professores Marco Aurelio de Carvalho, Paulo André De Camargo Beltrão, Ugo Leandro Belini, Ricardo Jorge Klitzke que sempre me ofereceram ajuda incondicional.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (PPGEM - UTFPR), assim como ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná (PPGEF - UFPR) pela receptividade, apoio e acolhida.

A empresa venezuelana PROPULSO, e as empresas brasileiras MADEM e em especial a TODESMADE e a MENDES MÁQUINAS, pelo apoio na coleta dos técnicos para o desenvolvimento e validação deste trabalho.

Um especial agradecimento aos engenheiros e colegas Sidiano Valduga e Alexandro Sechini da empresa Todesmade, pela parceria nas discussões técnicas, assim como ao Rodrigo Mendes, Diego Uncini e Thiago Roper da empresa Mendes Máquinas pelo grande apoio para a coleta de dados de pesquisa.

Sincere thanks to Prof. Ph.D. Daniel Chuchala at the Gdańsk University of Technology from Poland, for his timely contributions.

Aos meus estimados colegas Oriana e Yamid, por estarem sempre presentes.

A mi amada madre y mi querido hermano por las palabras de apoyo y motivación. A mi amado padre, fuente de inspiración.

Ao Camilo, Fatima e José Pedro, minha família brasileira, que com muita receptividade, e amor me abriram as portas como um membro mais. De coração agradeço a vocês.

À minha amada esposa Carmen e ao meu amado filho Lorenzo, obrigado pela compreensão nas horas de ausência, essa conquista é de nós três.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“A natureza nos deu as sementes do conhecimento, não o próprio conhecimento”.

Sêneca

## RESUMO

As principais variáveis que exercem maior influência na eficiência das indústrias madeireiras e que, por sua vez, são controláveis pela equipe de produção, são a qualidade dos produtos, as perdas da matéria-prima e a produtividade das linhas. Conhecer o limite de trabalho das ferramentas de corte é muito importante e, na grande maioria, essa operação é realizada empiricamente. Nesta Tese, foi desenvolvido um modelo quantitativo que permitiu definir o limite de trabalho ou vida útil das ferramentas de corte na indústria madeireira considerando a variabilidade dos processos industriais, relacionando o consumo de energia durante o corte e o trabalho específico realizado pelas serras, que é definido pelo comprimento de corte ou volume de madeira serrada. O modelo desenvolvido proporcionou um ajuste matemático não-linear composto por uma função modelada com um comportamento quase-logarítmico e uma parte exponencial. O limite de trabalho das ferramentas de corte foi determinado através de equações diferenciais, identificando o ponto de inflexão na função. O modelo teórico foi experimentalmente corroborado de forma multiobjetivo ao relacionar o consumo de energia durante o corte, a qualidade superficial e dimensional dos produtos, o trabalho específico das serras, e o desgaste das ferramentas. Pode-se afirmar que o modelo quantitativo apresentou uma aceitável aproximação, pois estimando o valor do ponto de inflexão é possível conhecer o limite de trabalho ou vida útil das ferramentas no corte da madeira e, desta forma evitar todas as consequências negativas presentes num processo de corte não controlado.

Palavras-chave: corte de madeira; consumo de potência; desgaste; modelo não linear; ponto de inflexão.

## **ABSTRACT**

The main variables that exert the greatest influence on the efficiency of the timber industries, and that are controllable by the production team, are the quality of the products, the loss of raw material, and the productivity of the lines. Knowing the working limit of the cutting tools is especially important, and in most cases, this operation is carried out empirically. In this thesis, a quantitative model is developed that allows defining the work limit or useful life of cutting tools in the timber industry, considering the variability of industrial processes, relating energy consumption during cutting and the specific work performed by the saws, which is defined by the cut length or lumber volume. The developed model provides a non-linear mathematical fit composed of a modeled function with a quasi-logarithmic behavior and an exponential part. The working limit of the cutting tools is determined through differential equations, identifying the inflection point in the function. The theoretical model was experimentally corroborated in a multi-objective way by relating energy consumption during cutting, the surface and dimensional quality of the products, the specific work of the saws, and the wear of the tools. The quantitative model presented an acceptable approximation since by estimating the value of the inflection point it would be possible to know the work limit or useful life of the tools in the wood cutting and, in this way, avoid all the negative consequences in an uncontrolled cutting process.

**Keywords:** wood cutting; power consumption; wear; non-linear model; inflection point.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplos de processamento mecânico da madeira. A- Processamento primário. B- Processamento secundário .....	23
Figura 2 - Sistemas de corte ortogonal na madeira.....	24
Figura 3 - Diagrama de um processo de corte ortogonal (esquerda) e um processo de corte oblíquo (direita). .....	25
Figura 4 - A: Fresas retas. B: Fresa helicoidais.....	25
Figura 5 - Forças de corte no processo de corte ortogonal (esquerda) e no processo de corte oblíquo (direita). .....	25
Figura 6 - Parâmetros técnicos das ferramentas de corte.....	31
Figura 7 - Serrarias com diferentes níveis tecnológicos. ....	32
Figura 8 - A: Serras de fita dupla. B: Serras circulares múltiplas. C: Peças serradas. ....	33
Figura 9 – Picador perfilador ou <i>chipper canter</i> .....	33
Figura 10 - Serras circulares para operações de destopo ( <i>trimmer</i> ). ....	33
Figura 11 - Corte de madeira e principais ações por regiões. ....	34
Figura 12 – A e B: Serras de fita. C: Lâmina da serra de fita. ....	35
Figura 13 - Esquerda e Centro: Serras circulares de eixos duplo. Direita: Corpo da serra circular.....	36
Figura 14 - Curvas de desgaste abrasivo em função do tempo de corte efetivo ou comprimento de corte.....	42
Figura 15 - A: Serra circular em boa condição. B e C: Serra circular com deformação permanente por aquecimento.....	44
Figura 16 - A: trajetória teórica de corte e trajetória real de uma serra com perda de tensão. ....	44
Figura 18 - Interpretação geométrica da derivada de uma função. ....	50
Figura 19 - Corte transversal de camadas de painéis com serra circular.....	56
Figura 20 - Cinemática do corte dos painéis HDF em serra circular. ....	56
Figura 21 - Avaliação da qualidade da superfície de corte nos painéis. A: Produto Excelente. B: Produto Aceitável. C: Produto Rejeitado. ....	59
Figura 22 – Medição do desgaste por microscopia ótica .....	60
Figura 23 - Parâmetros usados para medir o desgaste da ferramenta .....	60
Figura 24 - Pseudocódigo desenvolvido para o modelo.....	62
Figura 25 - Consumo de potência no corte em função da distância de corte acumulada.....	64
Figura 26 - Estágios na curva de consumo de potência e distância de corte acumulada.....	64
Figura 27 - Limite de trabalho das serras circulares no corte nos diferentes testes desenvolvidos.....	65
Figura 28 - Largura dos painéis, comprimento de corte acumulado e limites de tolerância. Teste 1.....	67
Figura 29 - Largura dos painéis, comprimento de corte acumulado e limites de tolerância. Teste 2.....	68
Figura 30 - Largura dos painéis, comprimento de corte acumulado e limites de tolerância. Teste 3.....	68
Figura 31 - Diferença na largura dos painéis e comprimento de corte acumulado. Teste 1. ....	70

Figura 32 - Diferença na largura dos painéis e distância de corte acumulada. Teste 2. ....	70
Figura 33 - Diferença na largura dos painéis e distância de corte acumulada. Teste 3. ....	71
Figura 34 – Consumo de potência no corte da madeira. Teste 1 .....	72
Figura 35 - Consumo de potência no corte da madeira. Teste 2.....	73
Figura 36 - Consumo de potência no corte da madeira. Teste 3.....	73
Figura 37 - Consumo de potência no corte da madeira. Teste 4.....	73
Figura 38 - Consumo de potência no corte da madeira. Teste 5.....	74
Figura 39 – Comparativa das médias do consumo de potência no corte da madeira nos testes.....	75
Figura 40 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 1. ....	76
Figura 41 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 2. ....	76
Figura 42 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 3. ....	77
Figura 43 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 4. ....	77
Figura 44 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 5. ....	78
Figura 45- Comparativa da produção média por turno dos testes extremos. Teste 2 vs. Teste 5.....	80
Figura 46 – Comparação do desgaste da aresta versus o volume de madeira cortada. Serra referência do Teste 2.....	81
Figura 47 - Desgaste das serras vs. Volume de madeira cortada.....	82
Figura 51 - Supervisório de seguimento e controle do consumo de corrente no corte aplicado na indústria. ....	96
Figura 52 - Supervisório aplicado na indústria para o monitoramento do consumo de corrente por cada serra. ....	97
Figura 53 - Banco de dado armazenado do consumo de corrente vs. tora cortada pelo supervisório aplicado na indústria. ....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Densidade média aparente dos painéis utilizados nos testes de corte ....	53
Tabela 2 - Densidade média aparente das espécies .....	53
Tabela 3 - Parâmetros das ferramentas de corte utilizadas na etapa I .....	54
Tabela 4 - Parâmetros das ferramentas de corte utilizadas na etapa II .....	54
Tabela 5 - Parâmetros de corte utilizados na etapa I (corte de painéis HDF) .....	55
Tabela 6 - Estatística descritiva para o consumo de energia em cada Teste, para uma distância total de corte de 1.032 m a uma altura média de corte de 40 mm. ....	63
Tabela 7 - Proporção percentual da avaliação da qualidade da superfície. ....	66
Tabela 8 - Proporção percentual da avaliação da qualidade superficial em cada teste. ....	66
Tabela 9 - Avaliação superficial do corte e seu respectivo comprimento de corte em cada teste.....	67
Tabela 10 - Porcentagem de registros fora da tolerância dimensional em relação ao ponto de inflexão calculado. ....	69
Tabela 11 - Estatística descritiva do consumo de potência.....	72
Tabela 12 – Análise da variância (ANOVA) dos dados do consumo de potência (kW) nos testes .....	74
Tabela 13 – Teste Duncan dos dados do consumo de potência (kW) nos testes .....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
EDO	Equações diferenciais ordinárias
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Comando numérico computarizado
ISO	International Organization for Standardization
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UFPR	Universidade Federal do Paraná
MDF	Medium Density Fiberboard
MDP	Medium Density Particleboard
HDF	High Density Fiberboard
HSS	High Speed Steel
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OSB	Oriented Strand Board
JUNAC	Junta del Acuerdo de Cartagena
PLC	Programmable logic controller

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\emptyset$	Diâmetro
$^{\circ}$	Graus
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celcius
$\rho$	Densidade
$a$	Profundidade de corte (mm)
$b$	Largura da ranhura (mm)
$E_c$	Energia de corte
$E_t$	Energia total consumida
$E_i$	Energia necessária para manter o movimento da serra
$f$	Avanço (mm)
$f_z$	Avanço por dente
$F_c$	Força de corte
$F_f$	Força de avanço
$F_p$	Força passiva
ha	Hectare
$h$	Espessura de cavaco (mm)
Hd	Altura do dento
Hz	Hertz
kW	Quilowatt
N	Newton
$n$	Rotação por minuto (rpm)
P	Passo da serra
R	Tenacidade à fratura
s	Segundo
t	Tonelada
$V_c$	Velocidade de corte ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )
$V_f$	Velocidade de avanço ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )
$z$	Número de dentes da serra (unidade)
$\gamma_n$	Ângulo de saída medido pelo plano normal ( $^{\circ}$ )
$\beta_n$	Ângulo de cunha medido pelo plano normal ( $^{\circ}$ )
$\alpha_n$	Ângulo de incidência medido pelo plano normal ( $^{\circ}$ )
$\lambda$	Trava (mm)

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Energia útil para o corte .....	37
Equação 2: Potência de corte .....	37
Equação 3: Potência mecânica de corte .....	37
Equação 4: Potência elétrica de corte .....	37
Equação 5: Desgaste do gume .....	39
Equação 6: Estágio I, de desgaste acelerado com tendência de crescimento logarítmico .....	42
Equação 7: Intensidade de desgaste específica derivada em função do tempo de trabalho de corte (T) .....	42
Equação 8: Intensidade de desgaste específica derivada em função do percurso de atrito (P) .....	42
Equação 9: Estágio II, de desgaste com tendência de crescimento linear, denominada zona de trabalho .....	42
Equação 10: Estágio III, de desgaste acelerado com tendência de crescimento exponencial, denominado zona de desgaste catastrófico .....	43
Equação 11: Fórmula geral para um polinômio de ordem $n$ .....	48
Equação 12: Representação polinomial clássica de um polinômio de terceira ordem .....	48
Equação 13: Taxa de variação de $y$ quando a variável independente $x$ varia .....	49
Equação 14: Taxa média de variação de $y$ em relação a $x$ .....	50
Equação 15: Derivada ou taxa de variação instantânea de $y$ em relação a $x$ .....	50
Equação 16: Equação para a espessura de cavaco ótimo .....	57
Equação 17: Equação relação altura de corte vs. Espesura de cavaco ótimo .....	57
Equação 18: Equação não linear composta desenvolvida no modelo .....	61

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos do trabalho</b> .....	<b>21</b>
1.2.1	Objetivo geral .....	21
1.2.2	Objetivos específicos.....	21
<b>1.3</b>	<b>Hipótese de investigação</b> .....	<b>21</b>
<b>1.4</b>	<b>Motivação do estudo e contribuição científica</b> .....	<b>21</b>
<b>1.5</b>	<b>Contribuição tecnológica para a indústria brasileira</b> .....	<b>22</b>
<b>1.6</b>	<b>Estrutura da Tese</b> .....	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1</b>	<b>Processamento mecânico da madeira</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Orientação dos cortes na madeira, corte ortogonal e corte oblíquo</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Fatores que afetam a resistência da madeira ao corte</b> .....	<b>26</b>
2.3.1	Fatores inerentes à madeira.....	26
2.3.1.1	As espécies, orientação da fibra, extrativos e substâncias minerais:.....	26
2.3.1.2	Teor de umidade: .....	27
2.3.1.3	Temperatura da madeira: .....	27
2.3.2	Fatores inerentes às condições de corte .....	27
2.3.2.1	Largura de corte (comprimento dos gumes):.....	27
2.3.2.2	Avanço por dente: .....	28
2.3.2.3	Velocidade de corte ( $V_c$ ): .....	28
2.3.2.4	Velocidade de avanço ( $V_f$ ):.....	28
2.3.3	Fatores inerentes às ferramentas de corte .....	28
2.3.3.1	Parâmetros técnicos geométricos das ferramentas de corte:.....	28
2.3.3.2	Influência da qualidade do gume:.....	28
2.3.4	Parâmetros técnicos geométricos das ferramentas de corte .....	30
2.3.4.1	Passo ( $P$ ):.....	30
2.3.4.2	Capacidade da garganta: .....	30
2.3.4.3	Altura do dente ( $H_d$ ): .....	30
2.3.4.4	Ângulo de saída ( $\gamma_n$ ):.....	30
2.3.4.5	Ângulo de incidência ( $\alpha_n$ ): .....	31
2.3.4.6	Ângulo de cunha ( $\beta_n$ ): .....	31

2.3.4.7	Trava ( $\lambda$ ):.....	31
<b>2.4</b>	<b>As operações nas serrarias: operações principais e secundárias ..</b>	<b>32</b>
2.4.1	Máquinas, ferramentas de corte e as operações secundárias nas serrarias .....	35
<b>2.5</b>	<b>O consumo de energia no corte de madeira .....</b>	<b>36</b>
<b>2.6</b>	<b>Desgaste das ferramentas de corte .....</b>	<b>38</b>
<b>2.7</b>	<b>Vibrações na usinagem .....</b>	<b>45</b>
2.7.1	Vibrações externas à máquina-ferramenta.....	46
2.7.2	Vibrações causadas pela máquina-ferramenta .....	46
2.7.3	Vibrações causadas por corte interrompido .....	47
2.7.4	Vibrações devido à falta de homogeneidade da peça .....	47
2.7.5	Vibrações regenerativas .....	47
<b>2.8</b>	<b>Abordagem matemática usada no modelo .....</b>	<b>48</b>
2.8.1	Aproximação polinomial não linear .....	48
2.8.2	Equações diferenciais .....	49
2.8.3	Derivada primeira .....	49
2.8.4	Segunda derivada .....	50
2.8.5	Ponto de inflexão.....	51
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1</b>	<b>Matéria-prima.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2</b>	<b>Propriedades físicas e mecânicas da matéria-prima utilizada .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3</b>	<b>Espessura dos painéis.....</b>	<b>54</b>
<b>3.4</b>	<b>Ferramentas de corte .....</b>	<b>54</b>
<b>3.5</b>	<b>Equipamento de corte.....</b>	<b>54</b>
<b>3.6</b>	<b>Procedimento de corte.....</b>	<b>55</b>
<b>3.7</b>	<b>Coleta das informações .....</b>	<b>57</b>
<b>3.8</b>	<b>Consumo de energia .....</b>	<b>58</b>
<b>3.9</b>	<b>Variações dimensionais dos painéis .....</b>	<b>58</b>
<b>3.10</b>	<b>Qualidade da superfície de corte nos painéis.....</b>	<b>59</b>
<b>3.11</b>	<b>Desgaste dos gumes.....</b>	<b>59</b>
<b>3.12</b>	<b>Processamento de dados .....</b>	<b>60</b>
<b>3.13</b>	<b>Análise estatístico dos dados .....</b>	<b>62</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Etapa I: Ensaios preliminares .....</b>	<b>63</b>
4.1.1	Consumo de energia no corte .....	63



4.1.2	Qualidade da superfície cortada.....	65
4.1.3	Qualidade dimensional .....	67
<b>4.2</b>	<b>Etapa II: Validação do modelo.....</b>	<b>71</b>
4.2.1	Consumo de energia no corte .....	71
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>84</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>86</b>
	<b>APÊNDICE A - Algoritmo desenvolvido para o modelo não linear para o controle adaptativo .....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE B - Aplicação do modelo desenvolvido na indústria madeireira brasileira .....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor florestal é estratégico para o Brasil, com 9,58 milhões de hectares de plantações florestais dos quais a maior parte é de plantios de pinus e eucalipto, sendo o sétimo país com maior área florestal plantada (APRE, 2022). Na última década, a cadeia produtiva florestal apresentou, em média, desempenho significativamente acima do PIB brasileiro, em termos reais. Enquanto o PIB do país cresceu 7,4% de 2010 a 2021, o valor adicionado da cadeia florestal apresentou incremento de 20,5%, no mesmo período. A partir de 2017, após um breve período com baixa produção, observou-se uma tendência de aumento e em 2021 a produção de serrado de pinus alcançou a maior marca da última década com 10,2 milhões de m<sup>3</sup> (APRE, 2022; IBA 2022).

No ano 2021, o Brasil se posicionou no posto 9 entre os maiores produtores de madeira serrada do mundo. A China ocupou o primeiro posto com 84 milhões de m<sup>3</sup> (16,9%), seguido por Estados Unidos com 79,1 milhões de m<sup>3</sup> (15,9%), Rússia 41,8 milhões de m<sup>3</sup> (8,4%), Canadá 40,2 milhões de m<sup>3</sup> (8,1%), Alemanha com 26,2 milhões de m<sup>3</sup> (5,3%), Suécia com 18,6 milhões de m<sup>3</sup> (3,7%), Finlândia com 10,9 milhões de m<sup>3</sup> (2,2%), Áustria com 10,6 milhões de m<sup>3</sup> (2,1%) e Brasil com 10,2 milhões de m<sup>3</sup> (2,1%) de madeira serrada (APRE, 2022). Neste cenário o ano 2021 representou a maior receita do setor florestal em sua história, chegando a R\$ 244,6 bilhões (IBA 2022).

No Brasil, os chamados painel de madeira reconstituída são compostos por cinco grupos de produtos: painel de fibra de média densidade (MDF / *medium density fiberboard*); painel de fibra de alta densidade (HDF / *high density fiberboard*) também conhecida como *hardboard*; painel de partículas de densidade média (MDP / *medium density particleboard*); painel de lascas de madeira orientadas (OSB / *oriented strand board*); e os painel Compensado (*plywood*) (BELINI et al, 2012; APRE, 2018). Estes produtos consomem como matéria-prima a madeira em tora oriunda das florestas plantadas, tanto de pinus, quanto de eucalipto.

As serrarias são de grande importância na cadeia de suprimento de madeira para o país, pois assumem a função da transformação primária da madeira proveniente das florestas plantadas, em produtos semi-processados, que serão fornecidos para o restante das indústrias processadoras do país, como as fábricas de

molduras, de pisos engenheirados, de embalagens de madeira, carretéis de madeira, madeira estrutural para a construção civil, entre outras.

A obtenção de um produto de madeira de alta qualidade deve ser o alvo fundamental das indústrias madeireiras, tarefa que começa com a seleção das sementes nos viveiros florestais e o manejo desses plantios florestais. Nas indústrias, a gestão de qualidade começa com o manuseio da matéria-prima, seu armazenamento, sua classificação e seu processamento ou transformação em produto acabado. Obter elevada qualidade superficial do corte da madeira essencialmente na primeira fase de transformação, ajuda a maximizar os processos posteriores na cadeia de transformação e beneficiamento dos produtos de madeira (TORKGHASHGHAEI *et al.*, 2023). Os principais parâmetros que causam maior influência na renda das indústrias madeireiras e que, por sua vez, são controláveis pela equipe de produção são a qualidade dos produtos, o rendimento da matéria-prima e a produtividade das linhas.

Na atualidade, o comércio e as elevadas demandas globais por produtos florestais de alto valor agregado, exigem cada vez mais produtos satisfatórios, o que implica alta qualidade, assim como volumes e prazos de entrega competitivos, ou seja, mais volume e em menos tempo.

Para alcançar uma qualidade satisfatória em produtos madeireiros, são necessárias madeiras adequadas (espécies e condições da matéria-prima) assim como parâmetros de processamento apropriados. Silva *et al* (2009) destacam que é necessário conhecer a estrutura da madeira e os parâmetros de trabalho para entender as relações que proporcionam bons resultados em qualidade.

Com a otimização do processamento da madeira e seus derivados, obtêm-se importantes vantagens para o processo em geral, como a redução do custo energético demandado pelas máquinas, maior aproveitamento da madeira, aumento da vida útil das ferramentas e da produtividade, e conseqüentemente redução dos custos gerais de produção (LOPES *et al* 2014).

A gestão efetiva de uma empresa madeireira engloba os processos de planejamento, organização, direção e controle do trabalho nos processos de produção da organização e o uso adequado e racional dos recursos necessários para atingir os objetivos corporativos. Portanto, para garantir a comercialização dos produtos madeireiros ao longo do tempo, tanto no mercado nacional quanto no internacional, é

necessário manter uma boa qualidade dos produtos ofertados, uma vez que é um dos principais atributos diferenciadores das estratégias competitivas.

### **1.1 Justificativa**

Para garantir a qualidade da madeira serrada, é essencial a realização de controles permanentes e adequados durante o processo, a fim de corrigir as causas atribuíveis oportunamente e alcançar um sistema ideal. Segundo Williston (1988), as variações dimensionais nas peças serradas têm notáveis efeitos negativos, não apenas na qualidade dos produtos, mas também estão intimamente relacionadas com o rendimento da matéria-prima, tendo por sua vez uma influência direta na produtividade da serraria. As variações dimensionais são consideradas como imperfeições dimensionais que podem se apresentar entre diferentes peças serradas ou nas mesmas peças, ocasionando produtos de qualidades inferiores que criam forte efeito negativo para a economia da empresa (BROWN, 1982).

As serrarias adotaram a tendência para garantir as dimensões especificadas de seus produtos, mediante a alocação de sobremedida para a dimensão final ou *Target Size*, que é trabalhar a espessura e a largura das peças a serem serradas dependendo das possíveis perdas de matéria-prima no processamento, o que afeta diretamente os rendimentos e os custos operacionais. Estes incrementos nas dimensões devem levar em consideração as contrações da madeira durante a secagem e as variações por flambagem das serras durante o corte.

Conhecendo a taxa de contração de uma determinada madeira pela perda de umidade até o grau desejado de secagem, pode-se trabalhar com certa precisão para o produto acabado, porém o maior desafio é a incerteza na flambagem da ferramenta que será decisiva para o produto final em termos de aceitação ou reclassificação da qualidade dimensional ou reprocessamento. As dimensões imprecisas na serraria, causam sérios problemas em processos subsequentes, como a secagem, resultando em um produto de qualidade inferior que não é capaz de atender às necessidades dos consumidores e, portanto, afetar a reputação da organização.

Uma tendência recente nos sistemas de manufatura é a busca por linhas de produtos mais eficientes, autorreguladas e confiáveis, por meio da mudança dos processos convencionais de produção gerenciados de forma centralizada por uma nova abordagem da Indústria 4.0 (*smart manufacturing*), baseada na implantação de sistemas de captura de sinal, processamento de informações, distribuição de sinais

de decisão e acionamento individual das maquinarias por unidade de produção, também conhecida como Unidade de Produção Holônica (CARDILLO *et al.*, 2022 e DHATTERWAL *et al.*, 2022).

Para isto, nas serrarias é muito importante trabalhar de acordo com uma abordagem de melhoria contínua por unidade de produção celular ou pequenas unidades de produção que conformam o todo da fábrica. É preciso centralizar a atenção em medidas preventivas antes que só nas medidas corretivas que tendem simplesmente a resolver os problemas que são apresentados ao longo da rotina de produção.

Ao cortar a madeira, busca-se superar a resistência oferecida pelo material ao corte, através de gumes, com o qual o material é extraído na forma de partículas (cavaco). Neste sentido, são procurados cinco objetivos principais, que podem ser resumidos em: obtenção de qualidade de superfície e precisão de cortes, procura da eficiência na operação, controle de desgaste da ferramenta, redução de consumo de energia e redução das perdas de matéria-prima (JUNAC, 1989). Com essa mesma intenção, Cristóvão *et al.*, (2013) desenvolveram um modelo preditivo do consumo de energia em serrarias em condições reais de operação, assumindo um desgaste das ferramentas de corte com tendência linear. Da mesma forma, Ghosh *et al.*, (2015) enfatizaram que a qualidade da superfície é muito importante para as indústrias, uma vez que determinará a necessidade de processamento adicional e/ou reclassificação para possíveis usos finais. Svrzic e Danon (2015) ressaltam que há poucas pesquisas relacionadas ao consumo de energia do corte de painel derivados da madeira. Orłowski *et al.*, (2014) enfatizam que este tipo de abordagem é muito importante para prever os efeitos energéticos do processo de corte da madeira em uma indústria, uma vez que permite aos gestores estimarem as capacidades de corte das máquinas em termos de potência disponível. Portanto, é uma ferramenta de previsão apropriada para desenvolver os modelos de corte adequados com as exigências do mercado e de acordo com a potência disponível.

O desgaste nas ferramentas de corte acontece de forma progressiva durante o tempo de trabalho, já que ocorrem deterioração dos dentes, portanto a força de corte aumenta assim como a temperatura de corte.

Trejo *et al.* (2018) expressaram que conhecer o momento exato da troca de ferramentas de corte na indústria é muito importante e, na grande maioria, essa operação é realizada empiricamente pela tentativa e erro. Em outros casos, as

mudanças nas ferramentas de corte são padronizadas com rotinas de tempos de trabalho sem critério especializado ou nas mudanças de turnos de trabalho independentemente do trabalho específico realizado pelas serras.

Parar as operações de produção para fazer troca nas ferramentas de corte em estágios prematuros do desgaste, também tem consequências associadas à diminuição da produtividade da fábrica.

O programa de afiação de ferramentas de corte nas indústrias madeireiras é uma rotina pré-determinada baseada em conhecimento empírico comumente transmitido ao longo do tempo. Ao introduzir um monitoramento constante e permanente nos dados obtidos como resposta nos processos, é possível se antecipar oportunamente ou prever quando é o momento ideal para afiar as ferramentas, baseado na qualidade da superfície e à quantidade de energia consumida (SVRZIC e DANON, 2015). As indústrias de processamento da madeira sempre mostram grande interesse neste ponto para evitar a manutenção frequente das ferramentas de corte (GHOSH *et al.*, 2015).

O ideal seria realizar uma manutenção preditiva das serras a partir da análise dos dados obtidos no processo. É preciso identificar os efeitos causados pelo desgaste, conhecer as causas que ocasionam, entender os tipos de desgaste que acontecem no corte da madeira, assim como poder identificar com precisão os estágios de desgaste das serras, mesmo que estas estejam em operação, ou seja, sem a necessidade de parar o processo para realizar uma observação direta de suas arestas (TREJO *et al.*, 2018).

Nasir e Cool (2018), afirmam que apesar dos esforços nas pesquisas, as condições dos testes de laboratório ainda não podem representar plenamente as condições extrema de corte nas indústrias. Portanto, deve-se enfatizar as duras condições de corte industrial, a fim de obter otimizações e aplicações viáveis nos processos. Da mesma forma, destacam que as pesquisas sobre o corte de madeira carecem de uma abordagem de otimização multiobjectivo, que sugere por exemplo, que a geração de resíduos deve ser analisada simultaneamente com a qualidade da superfície das peças serradas e o consumo de energia do processo.

Em comparação com o corte de metal, tem havido pouca pesquisa sobre o monitoramento no corte da madeira usando uma abordagem de inteligência artificial, que devem ser priorizados no projeto de sistemas de controle adaptativo, já que a combinação de monitoramento inteligente e abordagens de otimização de múltiplos

objetivos deve abrir o caminho para o controle do processo de corte, a fim de obter maior qualidade da superfície do produto e um processo rentável (NASIR e COOL, 2018). Neste caso, o controle adaptativo assegura que o sistema de controle automático se adapte a diferentes circunstâncias de comportamento na dinâmica de um sistema e suas perturbações. Entretanto, como primeiro passo é necessário ter dados confiáveis, oportunos e objetivos como resposta ao processo de corte, para depois desenvolver modelos quantitativos que forneçam suporte inteligente ao sistema de produção.

A alta produtividade das serrarias suecas consideradas entre as mais eficientes do mundo foi concebida através da aplicação de ferramentas adequadas de controle de processos. Para isso, é essencial ter dados confiáveis e oportunos da saída do processo de produção para a análise e tomada de decisões, já que é vital para criar uma medida de confiança de que as decisões são realmente implementadas com base nos fatos, não apenas em suposições ou experiências anteriores. É por isso que as serrarias modernas cada vez mais utilizam ferramentas de automação, controle e otimização de processos (LUNDAHL, 2007).

Uma serraria eficaz e rentável deve poder usar sua matéria-prima e a habilidade de sua equipe de forma eficiente. A produção das serrarias poderia adotar áreas apropriadas na análise de seus processos através de métodos de otimização de processamento mecânico na indústria. Nesse sentido, os dados ou saídas dos processos devem estar acessíveis e confiáveis para fornecer informações oportunas para o controle de seu processo. Sistemas de diagnóstico flexíveis podem, além de atender a uma serraria com diagnóstico e conhecimento de seus processos, fornecer os dados necessários para antecipar as ações. Essas ferramentas permitem que as decisões sejam baseadas em fatos (LUNDAHL, 2009).

Com base no exposto, são derivadas as seguintes perguntas de pesquisa:

- Como definir objetivamente o momento exato em que devem ser afiadas as serras na indústria madeireira, sem ter que parar as operações de produção para avaliar seus estados?
- Como evitar afiar ferramentas de corte que ainda estejam tecnicamente operativas ou em estágios prematuros de desgaste?

## 1.2 Objetivos do trabalho

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um modelo quantitativo que permita definir o limite de trabalho ou vida útil das ferramentas de corte na indústria madeireira considerando a variabilidade dos processos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

O objetivo geral foi alcançado a partir dos seguintes objetivos específicos:

- Modelar de forma não linear o comportamento do consumo de energia durante o corte, até que a ferramenta de corte seja considerada desgastada.
- Avaliar a evolução do desgaste da ferramenta de corte em função do trabalho específico realizado (distância de corte percorrida ou volume de madeira cortada).
- Analisar como a qualidade da superfície cortada e a estabilidade dimensional do produto é afetada durante o corte.
- Desenvolver um modelo computacional usando procedimentos matemáticos que permitam determinar o limite de trabalho da ferramenta de corte.

## 1.3 Hipótese de investigação

**H<sub>i</sub>:** O desgaste das ferramentas de corte pode ser identificado sem interromper o processo de produção industrial antes que o produto seja afetado negativamente e o processo seja considerado ineficiente.

## 1.4 Motivação do estudo e contribuição científica

Embora os mecanismos de desgaste das ferramentas de corte, suas causas e seus efeitos tenham sido cuidadosamente estudados, existe pouca evidência científica e técnica disponível sobre a determinação objetiva do limite de trabalho das ferramentas de corte no processamento da madeira. É por isso que as indústrias usam



critérios empíricos obtidos através da tentativa e erro, para buscar a mudança ideal de suas ferramentas de corte.

Com este estudo, pretendeu-se dar um importante aporte prático para as indústrias do setor madeireiro e uma contribuição científico-acadêmica, com a adaptação de um modelo numérico e ferramentas computacionais aplicadas a um processo de amplo interesse e com algumas lacunas a serem resolvidas, como o limite de trabalho das serras no corte da madeira.

### **1.5 Contribuição tecnológica para a indústria brasileira**

Após os resultados obtidos, foi de interesse das indústrias do setor (fabricante de máquinas e indústria de processamento de madeira) implementar o modelo desenvolvido dentro de seus processos de controle inteligente. O estudo foi implementado com sucesso na indústria onde os dados de campo foram coletados. Agora é parte integrante do sistema de controle 4.0 da serraria (*Smart sawmill*).

### **1.6 Estrutura da Tese**

O trabalho foi organizado em uma primeira parte que apresenta a introdução que contextualiza a área de estudo, o setor, a comercialização de produtos madeireiros no Brasil e os pontos de atenção relacionados com a qualidade dos produtos. Adicionalmente, são apresentadas a justificativa do estudo baseado em alguns antecedentes relacionados ao tema de estudo, o objetivo geral, a motivação e contribuições. Uma segunda parte que apresenta o estado da arte, detalhando aspectos relacionados ao corte da madeira, fatores que afetam, o desgaste, consumo de energia no corte, vibrações na usinagem e o modelo matemático implementado neste estudo.

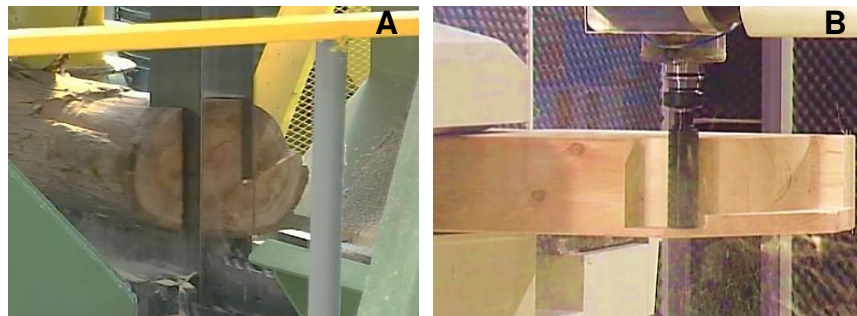
Seguidamente, descrevem-se aspectos referidos com materiais e o método. Em sequência são apresentados os resultados e discussões comparando com situações clássicas na literatura, e a aplicação tecnológica do modelo na indústria brasileira. Finalmente são apresentadas as considerações finais, para terminar com a listagem das referências bibliográficas consultadas neste trabalho e os apêndices.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Processamento mecânico da madeira

O processamento mecânico da madeira está dividido em dois tipos de processos, o processamento primário e o processamento secundário. O processamento primário é o tipo de processo de transformação inicial constituído pelo corte da madeira desde sua forma mais básica em toras até obter o primeiro subproduto da madeira que pode ser madeira serrada, cavaco, serragem (Figura 1-A). O processamento secundário, são os processos quando a madeira já passou por uma primeira transformação, e engloba as operações de transformação pela eliminação de material com ferramenta definida ou não definida como em usinagem ou beneficiamento da madeira (Figura 1-B) (NININ, 1986).

**Figura 1 - Exemplos de processamento mecânico da madeira. A- Processamento primário. B- Processamento secundário**



Fonte: Autoria própria (2023).

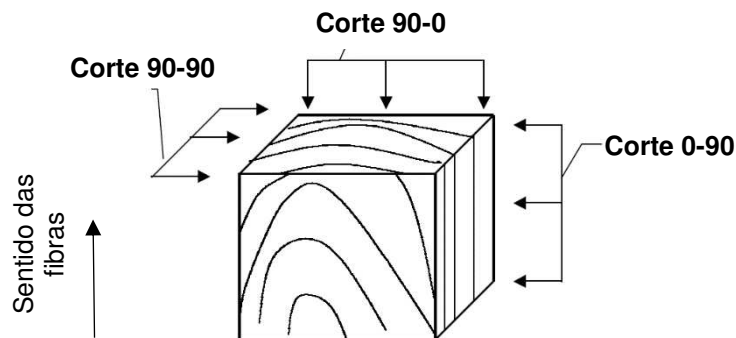
### 2.2 Orientação dos cortes na madeira, corte ortogonal e corte oblíquo

Diferente da usinagem de metais, a usinagem da madeira é muito variável devido às suas características (material orgânico, ortotrópico, higroscópico e heterogêneo) que variam entre as diferentes espécies. Em literaturas clássicas para o processamento da madeira como Kivimaa (1950), Franz (1958), McKenzie (1961) e Koch (1964), reportaram importantes diferenças entre o corte e os planos de simetria, axial ou longitudinal, radial e tangencial. Os autores demonstraram a dependência da força de corte em relação à orientação do corte, o que corroborou a influência da inclinação da trajetória de corte em relação com a orientação das fibras da madeira. Isto implica que no corte paralelo às fibras ( $0^\circ$  de inclinação entre a direção do corte e a orientação das fibras da madeira), a força de corte é menor que no corte cuja

trajetória é perpendicular às fibras ( $90^\circ$  de inclinação entre a direção do corte e a orientação das fibras da madeira).

Baseado nisto, foi desenvolvido um sistema de coordenadas de referência para identificar em primeiro caso, a posição do gume em referência com a orientação das fibras e em segundo caso o movimento de avanço ou percurso da ferramenta de corte em relação com à orientação das fibras, o que foi denominado como sistema de corte ortogonal (KIVIMAA, 1950; FRANZ, 1958; MCKENZIE, 1961 e KOCH, 1964). Esta notação define as três principais situações, ou seja, cortes 90-0, 90-90 e 0-90, como mostrado na Figura 2.

**Figura 2 - Sistemas de corte ortogonal na madeira.**

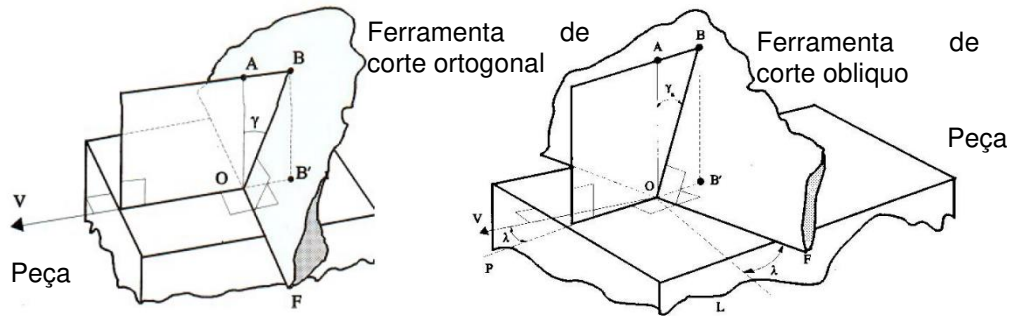


**Fonte: Adaptação de Koch (1986).**

Segundo Cardoso (2004), o processamento mecânico da madeira varia em função das propriedades físicas e mecânicas, de acordo com a direção considerada (anisotropia/ortotropia). Portanto, o corte na madeira não pode ser abordado sem a consideração do seu comportamento anisotrópico. Por isso, é preciso considerar a orientação e as principais direções de corte, combinado com o efeito da direção das fibras em relação ao corte.

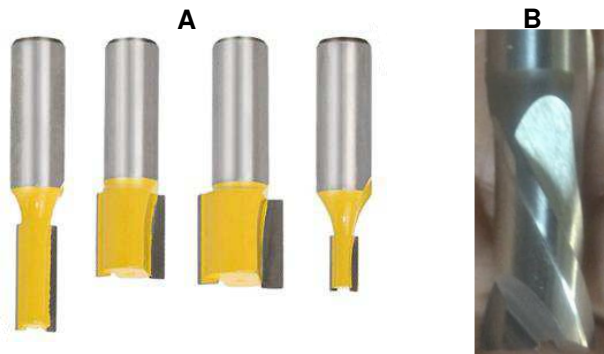
A diferença do corte ortogonal, no corte oblíquo os processos de remoção de cavacos, os gumes não são perpendiculares ao percurso ou avanço da serra, o seja, com o movimento de corte principal (Figura 3). Um exemplo de corte oblíquo pode ser a fresagem com ferramenta de dentes helicoidais (Figura 4-B), diferentemente do corte ortogonal com ferramentas de dentes retos (Figura 4-A).

Figura 3 - Diagrama de um processo de corte ortogonal (esquerda) e um processo de corte oblíquo (direita).



Fonte: Adaptação de Naylor e Hackney (2013).

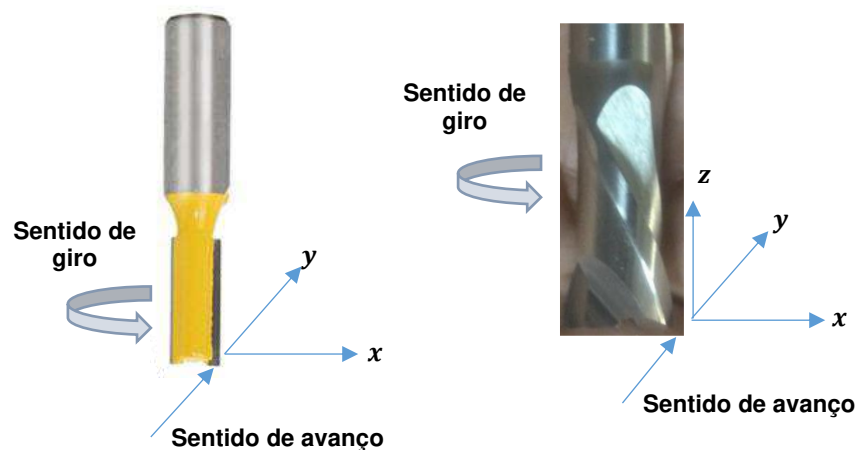
Figura 4 - A: Fresas retas. B: Fresa helicoidal.



Fonte: Autoria própria (2023).

No corte ortogonal, as forças que se desenvolvem durante sua execução podem ser traçadas em um sistema de coordenadas bidimensional de  $x, y$ , enquanto no corte oblíquo, o sistema de coordenadas das forças de corte é tridimensional de  $x, y, z$  (Figura 5).

Figura 5 - Forças de corte no processo de corte ortogonal (esquerda) e no processo de corte oblíquo (direita).



Fonte: Autoria própria (2023).

No corte de painel derivados da madeira como o painel de fibra de densidade média do inglês *Medium Density Fiberboard* (MDF), o aglomerado de partículas de densidade média do inglês *Medium Density Particleboard* (MDP) e o painel de lascas orientadas do inglês *Oriented Strand Board* (OSB), o corte segue uma trajetória sob uma distribuição aleatória das fibras de madeira, o que implica que as arestas de corte devem cortar fibras em diferentes inclinações. No caso do corte de painel compensado, as camadas das lâminas de madeira são dispostas ortogonalmente uma em cima da outra (90° uma da outra). Portanto, a ferramenta de corte sempre confronta as fibras paralelas e perpendiculares simultaneamente durante um corte.

Esses cortes são influenciados pela densidade do painel, sendo que a força de corte é diretamente proporcional à densidade da madeira a ser cortada (KIVIMAA, 1950). Portanto, o corte de painel, que se encontram em um intervalo entre 450 e 800 kg.m<sup>-3</sup> como MDF, MDP, OSB e compensados, apresentarão menor esforço de corte que de painel próximos a 1.100 kg.m<sup>-3</sup>, como o HDF.

### **2.3 Fatores que afetam a resistência da madeira ao corte**

Naylor e Hackney (2013) destacam que no processamento mecânico os três principais fatores que afetam a mecânica do corte da madeira são: parâmetros atribuídos ao processo de corte, fatores associados às propriedades da madeira (espécies) e o teor de umidade da madeira.

Ninin (1986) e JUNAC (1989) separam em três grupos os fatores que afetam a resistência da madeira ao corte, sendo: inerentes à madeira (matéria-prima), inerentes às condições de corte (operações) e inerentes à ferramenta (serras).

#### **2.3.1 Fatores inerentes à madeira**

##### **2.3.1.1 As espécies, orientação da fibra, extrativos e substâncias minerais:**

As diferentes espécies de madeira apresentam ampla variabilidade de sua constituição, intimamente vinculada com as características anatômicas que incidem sobre as propriedades físicas e mecânicas do material.

A composição química é influenciada principalmente por substâncias minerais e extrativos. Substâncias minerais referem-se à presença de conteúdos de sílica que geram considerável abrasividade. Os extrativos referem-se a substâncias visivelmente viscosas, que interferem na adesão das partículas em forma de cavaco e serragem nas ferramentas de corte.

### 2.3.1.2 Teor de umidade:

A maioria das propriedades mecânicas da madeira varia inversamente com o teor de umidade abaixo do ponto de saturação da fibra (PSF). Acima do PSF, a maioria das propriedades mecânicas são constantes com mudanças no teor de umidade. As propriedades mais sensíveis com a variação do teor de umidade são a densidade aparente, resistência à compressão, tração e cisalhamento paralela ao grão, resistência à flexão em flexão estática, módulo de elasticidade e a dureza paralela e perpendicular ao grão, atingindo algumas delas a aumentos quase exponenciais com a redução do teor de umidade abaixo do PSF (GÜNTEKIN *et al.*, 2015; RUTHES *et al.*, 2022). A água livre na madeira tem uma influência tanto na qualidade da superfície produzida como no desgaste da ferramenta de corte, já que atua como lubri-refrigerante que dissipa o calor no corte, além do efeito exercido pela água na redução das resistências da madeira a partir do ponto de saturação da fibra (oscila entre 28% e 40% de teor de umidade, embora, em termos práticos, possa ser considerado como um valor médio de 30%).

### 2.3.1.3 Temperatura da madeira:

Existe pouca evidência científica disponível referente a este fator no caso da madeira serrada, porém, Ninin (1986) enfatiza que a resistência da madeira diminui quando ela é aquecida. A redução da resistência com o incremento da temperatura se vê significativamente influenciada quando o teor de umidade da madeira aumenta e é menos significativo com a madeira seca. Essa tendência persiste, o que é um indicador da interação entre a temperatura, o teor de umidade e a resistência ao corte da madeira.

## 2.3.2 Fatores inerentes às condições de corte

### 2.3.2.1 Largura de corte (comprimento dos gumes):

No corte ortogonal, como no caso da madeira serrada, as tensões de cisalhamento são diretamente proporcionais com à largura do corte ou comprimento do gume (*kerf cut*), que é composto pela espessura do corpo da serra e o dobro do valor da trava. Em outras palavras, se a largura de corte for duplicada, os esforços envolvidos no corte serão o dobro do valor de referência de forma diretamente proporcional.

### 2.3.2.2 Avanço por dente:

Ninin (1986) demonstrou que para o caso de espessura de cavacos pequena a força paralela a estas, é de acordo com uma curva do tipo exponencial, enquanto para o caso de espessuras de cavacos maiores, é possível obter um ajuste linear, afetando o tipo de desgaste apresentado nas ferramentas de corte. O avanço por dente é determinado pela relação entre a velocidade de corte e a velocidade de avanço.

### 2.3.2.3 Velocidade de corte ( $V_c$ ):

É a velocidade instantânea do movimento principal de ponto selecionado do gume em relação a peça. Refere-se a velocidade linear percorrida por um dente da serra durante sua rotação em uma unidade de tempo. Geralmente é expresso em  $m \cdot \text{min}^{-1}$  ou  $m \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 2.3.2.4 Velocidade de avanço ( $V_f$ ):

É a velocidade instantânea do movimento de avanço da peça (madeira) em relação com o ponto selecionado do gume. Sua relação com a velocidade de corte gera o avanço por dente. Geralmente é expresso em  $m \cdot \text{min}^{-1}$ .

## 2.3.3 Fatores inerentes às ferramentas de corte

### 2.3.3.1 Parâmetros técnicos geométricos das ferramentas de corte:

Os parâmetros mais importantes que devem ser considerados ao especificar as serras de fita ou serras circulares são: largura da serra em mm para as serras de fita ou diâmetro para as serras circulares em mm, espessura da serra em mm ( $\epsilon$ ), comprimento da serra para as serras de fita em mm e as características técnicas dos dentes que estão compostas pelo: passo em mm (P), altura do dente em mm (Hd), capacidade da garganta em  $\text{mm}^3$ , ângulo de saída ( $\gamma_n$ ) em graus, ângulo de incidência ( $\alpha_n$ ) em graus, ângulo da cunha ( $\beta_n$ ) em graus.

### 2.3.3.2 Influência da qualidade do gume:

A qualidade do gume pode magnificar as ações como resposta dos elementos constituintes da madeira e os mecanismos de falha do material no corte, por sua vez, afetam os esforços de corte, a evolução do desgaste e conseqüentemente a qualidade superficial e dimensional das peças serradas.

Os principais parâmetros e de maior relevância a serem considerados nas operações de corte da madeira são a velocidade de avanço ( $V_f$ ), a velocidade de corte ( $V_c$ ) e a altura de corte ( $H_c$ ) (MARTINS *et al.*, 2013), e ao incorporar a quantidade de dentes ( $z$ ) e ou passo ( $P$ ) é possível obter a relação de avanço por dente ( $f_z$ ) e a espessura de cavaco ( $h$ ).

Lopes *et al.* (2014) destacam que o avanço por dente ( $f_z$ ) e a velocidade de avanço ( $V_f$ ) são parâmetros muito importantes e inversamente proporcionais à qualidade da superfície da madeira, ou seja, quanto menores os valores de  $f_z$  e  $V_f$ , melhor é a qualidade da superfície da peça de madeira.  $V_f$  varia dependendo do tipo da madeira, altura de corte e da densidade da madeira, sendo que as menores densidades e as menores alturas de corte são trabalhadas com maior  $V_f$ , portanto, maior  $E_c$ .

Ninin (1986), enfatiza que a  $h$  é um parâmetro de grande importância nas serrarias, principalmente nas serras de fita. A espessura do cavaco ótima é aquela que para uma altura de corte específica (trajetória do dente na madeira) satura a capacidade da garganta com a serragem resultante e com o menor consumo de energia possível (menos trabalho específico).

Costes e Larricq (2002), destacam que a relação entre a  $V_c$  e a  $V_f$  influencia diretamente na qualidade superficial da madeira. Nesse sentido, Silva *et al.* (2007) observam que, utilizando menores valores de  $V_f$  e elevados valores de  $V_c$  (consequentemente menor  $f_z$  e menor  $h$ ), pode-se comprometer a qualidade superficial da madeira obtida, devido à carbonização da superfície da madeira pela elevada temperatura de corte. Para valores muito elevados de  $V_f$  em relação à  $V_c$  (excessivo  $f_z$  e  $h$ ) pode comprometer a qualidade superficial e dimensional da madeira cortada, principalmente pelas falhas na superfície da madeira pelo arrancamento de fibras (Silva *et al.*, 2009) e pela flambagem da serra como consequência da sobressaturação das gargantas com a serragem. Estas variações da qualidade superficial da madeira podem ser avaliadas através de método qualitativo, como a observação visual por especialistas ou pelo método quantitativo, como a rugosidade superficial de contato e a rugosidade superficial 3D por infravermelho.



### 2.3.4 Parâmetros técnicos geométricos das ferramentas de corte

Os principais parâmetros técnicos geométricos nas ferramentas de corte são definidos a continuação (STEMMER, 2008; FERRARESI, 2003; NININ, 1986 e MACHADO, 2009):

#### 2.3.4.1 Passo (P):

É a distância entre as pontas ou bordas de dois dentes consecutivos, ou seja, a separação entre os dentes. Este espaço deve ser o mesmo em todos os dentes para distribuir o corte em todos os dentes, facilitar a evacuação do cavaco e permitir a afiação automática das serras.

#### 2.3.4.2 Capacidade da garganta:

É o espaço ou cavidade que contém, transporta e evacua os cavacos e a serragem, determina a capacidade de evacuação de serragem. A capacidade da garganta é uma variável que sintetiza a otimização e o equilíbrio entre as proporções de ângulo de saída, ângulo de cunha, ângulo de incidência, o passo e a altura do dente contra uma resistência de corte específica. Uma otimização dessa variável sempre busca a saturação da garganta, ou seja, ela é otimizada procurando os valores máximos possíveis de capacidade da garganta de acordo com a densidade de madeira processada.

#### 2.3.4.3 Altura do dente ( $H_d$ ):

É a distância entre a parte inferior da garganta e a ponta ou borda do dente (Figura 6). Ao aumentar a altura do dente aumenta-se a capacidade da garganta de armazenar serragem, mas a resistência do dente aos esforços de corte é afetada, isto é, inversamente proporcional à resistência, já que a maior altura dos dentes, os dentes os tornam menos rígidos.

#### 2.3.4.4 Ângulo de saída ( $\gamma_n$ ):

É o ângulo formado entre a face ou superfície sobre a qual o cavaco escoia e a superfície de referência da ferramenta e pode ser definido no plano ortogonal da ferramenta (Po), no plano de trabalho convencional (Pf), no plano normal do gume (Pn). Este ângulo determina a eficiência do corte e conseqüentemente a capacidade produtiva da máquina, já que um ângulo de saída da ferramenta suficiente facilita a incisão dos dentes, a fragmentação do cavaco, e, portanto, reduz os requisitos de energia para o corte (Figura 6).

#### 2.3.4.5 Ângulo de incidência ( $\alpha_n$ ):

É o ângulo formado entre o flanco e o plano do gume da ferramenta (Ps). Pode ser definido no plano ortogonal da ferramenta (Po), no plano normal do gume da ferramenta (Pn) e no plano ortogonal do flanco (Pb). Este ângulo ajuda a reduzir a interferência da madeira com o lombo dos dentes, no entanto, devem ser evitados ângulos de incidência exagerados, pois enfraquecem inutilmente o dente, pois reduzem o ângulo de cunha (Figura 6). A maiores  $V_f$  exigirá valores mais altos de  $\alpha_n$  para evitar o atrito entre a parte de trás do dente e a madeira no corte.

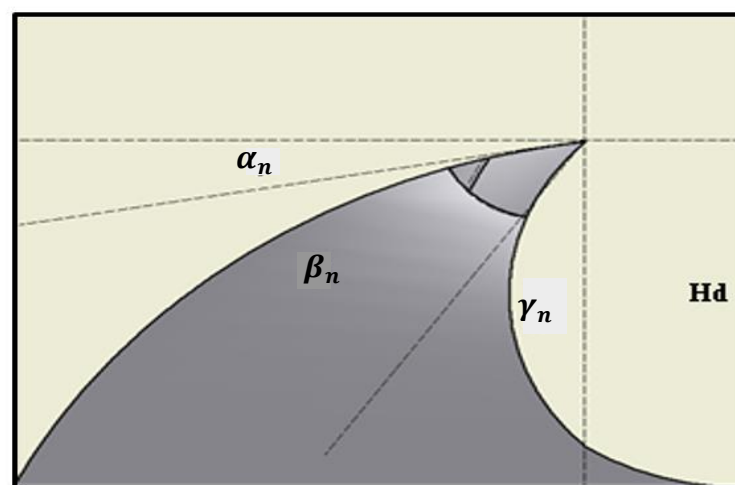
#### 2.3.4.6 Ângulo de cunha ( $\beta_n$ ):

É o ângulo definido entre a face e o flanco medido no plano normal do gume (Pn). É um valor indireto da rigidez dos dentes (Figura 6).

#### 2.3.4.7 Trava ( $\lambda$ ):

É um valor de distância geralmente expresso em milímetros (mm) ou décimos de milímetros, que corresponde à distância entre o corpo da serra e o alargamento do dente na ponta, obtidos principalmente por deformação plástica da ponta do dente (recalcado) ou pela adição do material de reforço pela fusão do material de aporte (caso do estelite). A trava também é definida pela largura das placas de metal-duro para o caso de serras circulares. A função da trava é permitir a livre passagem da ferramenta no interior da madeira, evitando ou diminuindo as ações laterais nas ferramentas, produto das deformações elásticas da madeira no instante do corte.

**Figura 6 - Parâmetros técnicos das ferramentas de corte.**



Fonte: Autoria própria (2023).

## 2.4 As operações nas serrarias: operações principais e secundárias

As serrarias são centros de processamento, normalmente consolidados em uma fábrica onde as principais operações de processamento de madeira são realizadas, podendo ser formado em unidades de produção individual com baixa produtividade até sistemas integrados semiautomatizados ou completamente automatizados com tecnologia 4.0 (*Smart Sawmill*) de alta eficiência (Figura 7).

**Figura 7 - Serrarias com diferentes níveis tecnológicos.**

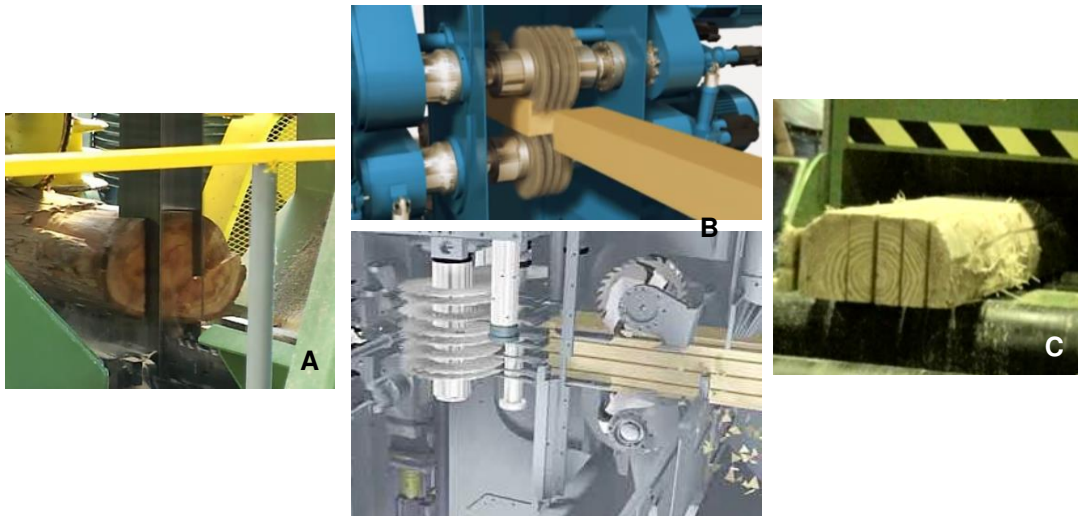


**Fonte: Cortesia de Stenner (Alemanha) e Todesmade (Brasil) (2023)**

O serrado é o processo de transformação primário da madeira (corte ortogonal 90-90) em sua forma mais básica (toras) em forma de tronco de cone. A função do serrado é a redução da tora em peças de menor dimensão para facilidade de trabalho (redução da altura de corte) para as operações secundárias. Também incluem operações de reserragem (definição ou padronizado da espessura das peças), canteagem (definição ou padronizado da largura das peças) e o destopo (definição ou padronizado do comprimento das peças), para conformar os produtos na forma de um paralelepípedo regular chamados peças serradas ou madeira serrada.

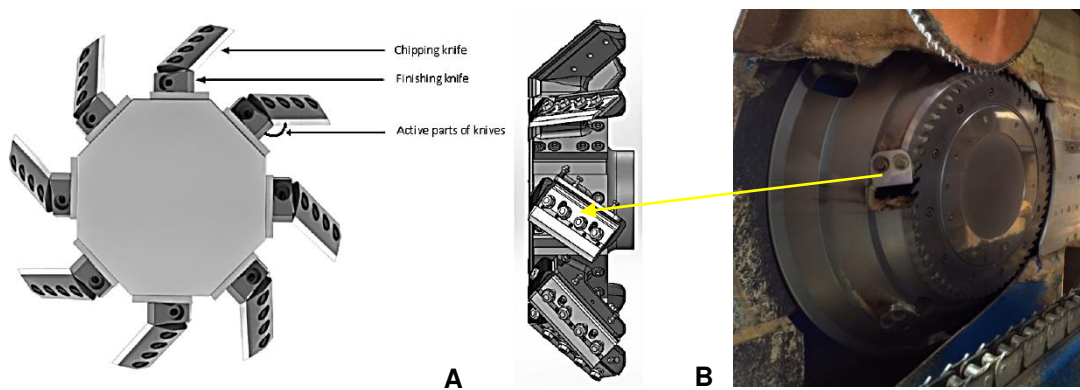
As operações de serragem podem ser feitas através do uso de serras de fita (Figura 8-A), serras circulares (Figura 8-B), picador perfilador (*Chipper canter*) (Figura 9). As operações de reserragem podem ser feitas pelas serras de fita ou serras circulares e as operações de canteagem e o destopo são feitas exclusivamente pelas serras circulares (Figura 10).

Figura 8 - A: Serras de fita dupla. B: Serras circulares múltiplas. C: Peças serradas.



Fonte: Cortesia de Mendes Máquinas, USNR Söderhamn Eriksson e HewSaw (2023).

Figura 9 – Picador perfilador ou *chipper canter*.



Fonte: Ghosh et al (2015). B: Autoria própria (2023).

Figura 10 - Serras circulares para operações de destopo (*trimmer*).



Fonte: Autoria própria (2023).

Estes equipamentos e máquinas utilizam ferramentas de corte, que devem ser adequadas às exigências do processo, uma vez que o processamento da madeira é uma técnica muito complexa, que envolve a superação da resistência da madeira

ao corte, por meio dos dentes, gumes e faces dos elementos de corte, que permitem a remoção de material na forma de cavaco.

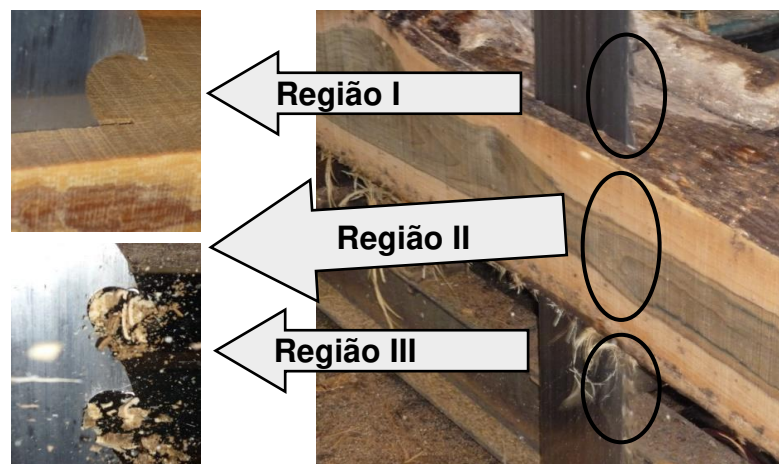
De acordo com os resultados apresentados por Orłowski *et al.* (2022), é possível realizar a analogia que durante o corte da madeira com serras de fita, interagem na ferramenta de corte ações de três regiões principais (Figura 11):

**Região I:** início do corte. Nesta etapa ocorrem impactos entre os dentes e a madeira durante a incisão (corte interrompido). Adicionalmente a resistência da madeira ao corte produz uma força de compressão na ferramenta devido às forças de corte opostas a com direção do movimento de corte.

**Região II:** corte na madeira. Durante o percurso da serra na madeira se gera e acumula cavaco/serragem nas gargantas. Apresenta elevadas temperaturas pelo atrito, bem como forças de compressão sobre a ferramenta.

**Região III:** saída do corte (evacuação da serragem). Neste ponto a ferramenta é submetida a forças de tração devido à tração de montagem, ao acionamento do eixo de transmissão e a liberação do corte na madeira.

**Figura 11 - Corte de madeira e principais ações por regiões.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Em função disto, um trabalho meticuloso na preparação das ferramentas de corte deve ser um fator importante a considerar nas empresas madeireiras para limitar as deformações, falhas ou rupturas e mudanças prematuras nas serras durante o processo da produção. A este respeito, é preciso não só uma máquina eficiente, mas também é preciso ferramentas de corte capazes de suportar as variadas exigências, já que o desempenho das serras está em estreita relação com as propriedades e as

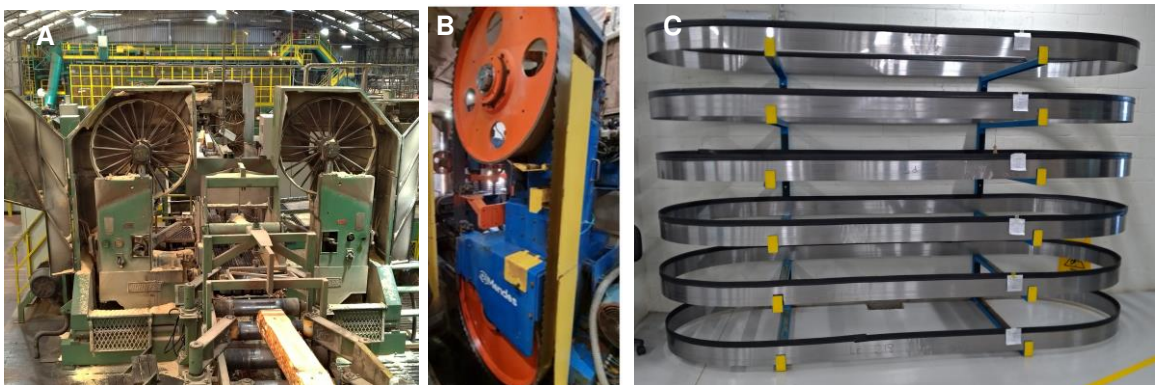
características do material que forma a estrutura, que deve resistir aos esforços a que será submetido durante o corte da madeira.

Por esta razão, os corpos que compõem as serras e para atender com sucesso as demandas do processo de corte da madeira, devem ser fabricados a partir de um material que satisfaça as seguintes características: a) elevada dureza de modo que os dentes possam manter sua geometria e diminuir o desgaste, juntamente com maleabilidade para trabalhar os corpos das serras com sucesso, b) elevada resistência contra o impacto presente nas operações de corte interrompido na madeira, c) flexibilidade e alta resistência a fadiga e d) elasticidade e homogeneidade estrutural (TREJO *et al.* 2021).

#### 2.4.1 Máquinas, ferramentas de corte e as operações secundárias nas serrarias

Reduzida às suas partes essenciais uma máquina de serra de fita, consiste em dois volantes localizados no mesmo plano, sobre os quais é montada uma lâmina de serra (Figura 12) cujas extremidades são soldadas, de modo que constitui uma fita sem fim que pode ser disposta vertical ou horizontalmente. De acordo com sua utilidade é classificada em três grupos (NININ, 1986): serras de grande porte destinadas a cortar toras com alta velocidade de corte entre 2.500 a 3.500  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e velocidade de alimentação de 70 a 140  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ; as máquinas de tamanho médio destinadas para velocidades de corte entre 1.850 a 2.500  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e avanço de 30 a 100  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  e as serras menores, onde a velocidade de corte é reduzida entre 900 a 1.850  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  geralmente para trabalhos menores.

**Figura 12 – A e B: Serras de fita. C: Lâmina da serra de fita.**



Fonte: Autoria Própria (2023).

As serras circulares podem ser compostas de vários discos de corte incorporados ao eixo de transmissão, inclusive vários eixos de transmissão (Figura 13), dispostos vertical ou horizontalmente na máquina. As serras são formadas por um corpo de metal circular dentado na sua periferia, que é responsável por cortar a madeira longitudinal ou transversalmente, conforme o caso, através da rotação da ferramenta de corte (Figura 13).

**Figura 13 - Esquerda e Centro: Serras circulares de eixos duplo. Direita: Corpo da serra circular.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Nasir *et al.* (2018) destacam que as serras circulares são principalmente de dois tipos: as serras de colarinho e serras ranhuradas. Em uma serra de colarinho, a lâmina é rigidamente fixada ao eixo de acionamento por flanges de fixação, enquanto uma serra ranhurada, o raio interno da lâmina é estriado e coincide com um eixo estriado que fornece o torque do motor para a serra.

## 2.5 O consumo de energia no corte de madeira

As forças convencionais num dente em corte são definidas pela força de corte ( $F_c$ ), a força de avanço ( $F_f$ ) e a força passiva ( $F_p$ ). A força de corte (também chamada de força principal ou paralela) é responsável pela remoção do material e, portanto, é a força mais elevada. Atua no dente no sentido oposto ao movimento de corte da serra, que é linear na serra de fita (MEULENBERG *et al.* 2022; ORLOWSKI *et al.* 2022).

A abordagem mais avançada no corte da madeira, requer monitoramento constante do processo de corte em tempo real, o que pode ser feito medindo

diferentes saídas de processo. A quantidade de calor gerada durante o corte, as forças de corte e a potência consumida são exemplos comuns do desempenho do processo de corte (SVRZIC e DANON, 2015). Svrzic e Danon (2015) destacam que o monitoramento do processo de corte é essencial para muitas razões tecnológicas, tais como a qualidade da superfície, o estado da ferramenta de corte, a energia consumida e o desgaste da máquina.

Ninin (1986) enfatiza que ao analisar os dados referentes ao consumo de energia do processo de corte, é muito importante diferenciar a energia consumida e a energia útil para o corte. Quando o motor da serra é independente do sistema de alimentação, tem-se que:

$$E_c = E_t - E_i \quad (1)$$

Onde,  $E_c$  = energia de corte,  $E_t$  = energia total consumida,  $E_i$  = energia necessária para manter o movimento da serra.

A intensidade da corrente medida em determinadas condições de corte permite determinar a potência elétrica média, através da estimativa adaptada para o serrado da madeira por Orłowski *et al.* (2017) apresentada na Equação 2.

$$P_{cw} = Z_a \cdot \frac{\tau_\gamma S_t \delta}{Q_{shear}} V_c \bar{h} + Z_a \cdot \frac{RS_t}{Q_{shear}} V_c \quad (2)$$

Onde,  $P_{cw}$  = potência de corte,  $Z_a$  = número médio de dentes em corte,  $\tau_\gamma$  = esforço cortante na direção da velocidade de corte,  $S_t$  = largura de corte (*kerf*),  $\delta$  = deformação ao longo do plano de corte,  $V_c$  = velocidade de corte,  $\bar{h}$  = espessura do cavaco e  $R$  = tenacidade à fratura para a posição indireta da velocidade de corte.

Da mesma forma, Ābele e Tuhern (2014) desenvolveram um modelo para estimar a potência de corte em madeira serrada por meio da Equação 3, que considera a potência elétrica. Essa energia elétrica pode ser quantificada a partir da Equação 4 (Ābele e Tuhern 2014).

$$P_{gr}^m = \frac{P_{gr}^{el} \cdot (0.107 \cdot L + 630.1)}{0.111 \cdot L + 905.7} \quad (3)$$

$$P_{gr}^{el} = U_F \cdot (I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}) \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

onde,  $P_{gr}^m$  = potência mecânica de corte (W),  $P_{gr}^{el}$  = potência elétrica (W),  $L$  = comprimento do caminho de corte (m),  $U_F$  = tensão de fase (V),  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_{L3}$  = amperagem da linha (A),  $\varphi$  = ângulo de diferença de fase entre a tensão e o grau de corrente. Portanto, com a intensidade da corrente medida em certas condições de corte pode-se estimar a potência mecânica média. Trejo *et al.* (2020) enfatizaram que



em condições reais de operação, é importante trabalhar com valores do consumo de energia total ( $E_t$ ), pois sendo o parâmetro de maior magnitude, afetará diretamente o desempenho dos motores, proteções elétricas e, conseqüentemente no projeto dos motores e o consumo global.

Segundo Ninin (1986), as exigências energéticas estão intimamente relacionadas com a resistência da madeira ao corte (principalmente com sua dureza e densidade), dimensões da madeira a ser processada (altura de corte), os parâmetros geométricos das ferramentas, parâmetros inerentes ao processamento (principalmente a velocidade de avanço, a velocidade de corte e conseqüentemente com a espessura do cavaco e/ou o avanço per dente).

## 2.6 Desgaste das ferramentas de corte

O desgaste é um fenômeno tribológico, que ocorre quando dois corpos, sujeitos a uma carga, estão em contato e em movimento relativo, e devido ao atrito entre a ferramenta de corte e o material a cortar, fazem dele um processo progressivo em função do trabalho específico realizado (PÉREZ, 2011).

A falha nas ferramentas de corte pode ocorrer sob três formas distintas: a) lascamento, ou seja, quebra de pedaços do gume; b) desgaste no flanco, marcas de desgaste na superfície de incidência; c) desgaste na face, presença de cratera na superfície de saída (STEMMER, 2008).

Dentro dos principais fatores de desgaste, pode-se detalhar os seguintes (STEMMER, 2008):

### **a- Deformação plástica:**

Ocorre quando a dureza a quente do material da ferramenta não é mais suficiente para resistir às pressões de usinagem.

### **b- Abrasão:**

Ocorre por arrancamento de finas partículas de material, em decorrência do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre a peça e a ferramenta. A resistência a abrasão depende principalmente da dureza do material da ferramenta.

### **c- Aderência:**

É originado quando existe aderência entre o material da peça e as asperezas superficiais da ferramenta de corte. Esta solda de material se deve a ação das altas temperaturas e pressões que ocorrem na zona de corte e ao fato de que

a superfície inferior do cavaco recém arrancada se apresenta limpa, sem camadas protetoras de óxidos e, portanto, quimicamente muito ativa.

**d- Difusão:**

Ocorre em temperaturas elevadas, em que as moléculas adquirem certa mobilidade migrando de um material para outro.

**e- Oxidação do material:**

Ocorre no aquecimento de peças a altas temperaturas com a formação de carepas.

**f- Correntes elétricas iônicas:**

É um fenômeno termoelétrico gerando-se pelo aquecimento do ponto de união de um par de materiais distintos. Na usinagem, em virtude das diferenças de temperatura nos diferentes pontos da zona de corte, ocorrem na própria ferramenta circuitos fechados de corrente que aceleram o desgaste.

Ninin (1986) destaca que no corte de madeira, o principal mecanismo de desgaste é devido á abrasão, portanto é o principal processo que limita a vida útil das ferramentas de corte. É o resultado da fricção causadas pelas forças de usinagem e pela resistência da matéria-prima a ser cortada. Este processo é aumentado como um resultado do efeito abrasivo das substâncias minerais dentro da madeira (tal como o óxido de silício, SiO) ou por objetos estranhos, tais como areia, casca, mistura de areia e resina, entre outros.

A este respeito, o desgaste pela abrasão pode ser expressado por uma equação que relaciona o número de percurso de um dente para produzir uma superfície cortada e, por conseguinte, uma função inversa da espessura do cavaco, como mostrado na Equação 5 (NININ, 1986):

$$D \cong N \cong h^{-1} \quad (5)$$

Onde,  $D$  = desgaste do gume,  $N$  = número de percursos do gume na madeira,  $h$  = espessura do cavaco.

Torkghashghaei *et al.* (2023), reportaram na pesquisa desenvolvida em condições reais de produção industrial que o principal mecanismo de desgaste encontrado nas serras durante o corte da madeira foi o desgaste pela abrasão, microtrincas, lascamento devido a evolução das microtrincas e deformação plástica.

Diniz *et al.* (2008) definem a vida de uma ferramenta como o tempo que ela trabalha efetivamente até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido.

Nesse sentido, Sales (1990) destaca que para minimizar os efeitos do desgaste, materiais de reforço são utilizados principalmente nas arestas dos dentes. Trejo *et al.* (2012) enfatiza que os principais materiais usados como reforço no corte da madeira são o *Stellite* (liga de cobalto-cromo-tungstênio), as ligas do níquel, o carboneto de tungstênio, cromo duro eletrolítico, ligas de titânio, diamante sintético policristalino. O objetivo de conferir propriedades de dureza em áreas específicas das ferramentas de corte, que deve preservar suas características em altas temperaturas, além de oferecer benefícios tribológicos ao diminuir o coeficiente de atrito.

Espessuras de cavaco reduzidas geram perfis com o desgaste distribuído predominantemente na superfície de folga, é um processo rápido, especialmente se a velocidade de corte for alta e se o tempo de resfriamento for insuficiente, resultando em uma incapacidade prematura de corte. Pelo contrário, com espessuras de cavacos suficientes ou grandes, são gerados perfis com desgaste distribuído favoravelmente na superfície de saída de cavacos.

Por outro lado, é importante notar que em espessuras de cavacos maiores, a superfície produzida em madeira serrada é maior do que para pequenas espessuras de cavacos em períodos compreendidos pela mesma unidade de tempo, o que não apenas contribui para a redução do desgaste, mas também afeta a produtividade geral da planta (TREJO *et al.*, 2015).

Na usinagem de metais, o fim de vida das ferramentas é definido pelo tamanho ou nível de desgaste pré-estabelecido dependendo do processo, operação e finalidades desejadas para a peça usinada. São considerações determinantes do fato, a largura da marca de desgaste de flanco, profundidade da cratera, deficiência no acabamento superficial da peça, formação de rebarbas, número de peças usinadas, variação dimensional da peça, entre outras (STEMMER, 2008 e FERRARESI, 2003).

Diniz *et al.* (2008) definem a vida de uma ferramenta como o tempo que ela trabalha efetivamente até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido.

Šustek e Siklienka (2012) afirmam que dos estudos dos métodos diretos de medição do desgaste das ferramentas de corte, vários autores têm tentado registrar a

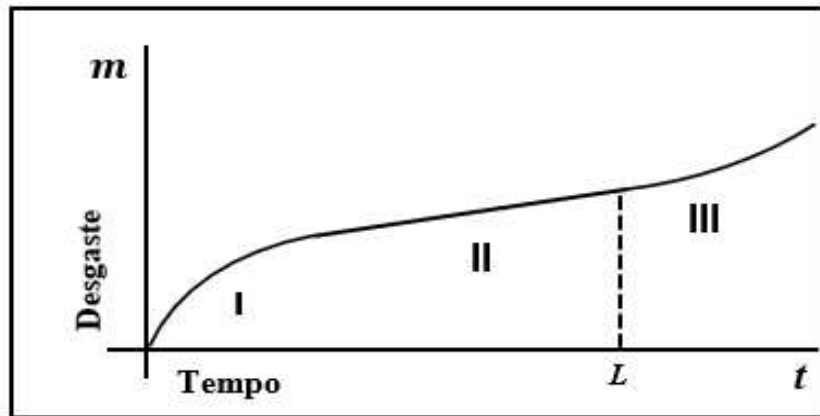
taxa de desgaste da ferramenta de corte, e fazer uso de diversas características para sua determinação, medindo as mesmas características em diferentes direções e os valores adquiridos não são comparáveis entre si. Uma característica nem sempre expressam a taxa global de desgaste do gume da ferramenta, e é necessário medir mais características, ou dar a descrição gráfica da aresta de corte antes e depois do desgaste da ferramenta. Como o desgaste é caracterizado por valores muito pequenos e transições pouco claras, tem sido complicado unificar métodos para esta medida. Isto é uma desvantagem e um problema do ponto de vista da comparação de resultados experimentais e ainda pior quando se estuda nas condições reais de produção nas indústrias.

Cristóvão (2013) e Torkghashghaei *et al.* (2023), enfatizam que existe uma variedade de parâmetros reportados na literatura com respeito da caracterização do desgaste de ferramentas no corte da madeira, como o desgaste de ponta pela face de saída, pela face de incidência, aumento da largura da ponta da ferramenta e aumento do raio da aresta.

Utilizar ferramentas com um desgaste excessivo é desaconselhável, pois provoca o lascamento e destruição total do gume sendo necessário um longo trabalho de reafiação com remoção de uma extensa camada de material, antes que se possa restabelecer um gume adequado (STEMMER, 2008 e FERRARESI, 2003).

O desgaste no corte da madeira é uma função do tempo efetivo de trabalho ou do trabalho específico realizado, o qual é representado por uma curva característica do tipo sigmoidal, conforme mostra a Figura 14, onde  $m$  é a perda de material devido ao desgaste dos gumes,  $t$  é o tempo efetivo de trabalho ou o trabalho realizado e  $L$  é o limite de uso antes de afiar, também conhecido como Limite Econômico de uso da ferramenta.

Figura 14 - Curvas de desgaste abrasivo em função do tempo de corte efetivo ou comprimento de corte.



Fonte: Adaptação de Machado (2009) e Ninin (1986).

A curva formada na Figura 14, corresponde ao comportamento típico de um processo de desgaste abrasivo. Neste caso,  $m$  é a função do desgaste que depende do tempo de corte efetivo (min), do comprimento de corte (m) ou volume de material produzido ( $m^3$ ).

A curva formada na Figura 14 está distribuída em três (3) regiões importantes. No início (zona I), ocorre nos primeiros cortes, quando o desgaste apresenta uma taxa decrescente (a pendente da curva apresenta valores decrescente). O desgaste é acelerado, com uma tendência de crescimento logarítmico (Equação 6), já que a cunha cortante se ajusta ao processo de forma natural ao sistema tribológico envolvido (MACHADO, 2009). É considerado como uma fase de assentamento de curto prazo.

$$m_T \sim \text{const } T^{1/2} \quad (6)$$

Perez (2011) ressalta que nesta etapa, a intensidade de desgaste específica pode ser definida como o desgaste ( $m$ ) derivado em função do tempo de trabalho de corte ( $T$ ) ou do percurso de corte ( $P$ ) (Equação 7 e 8).

$$\frac{dm}{dT} \quad (7)$$

Ou

$$\frac{dm}{dP} \quad (8)$$

Este valor tende a diminuir com a trajetória de trabalho específico, tempo ou trajetória do corte até alcançar um valor mais estável com tendência de crescimento linear (Equação 9), denominada zona de trabalho (zona II) (PEREZ, 2011).

$$m_T \sim \text{const } T \quad (9)$$

Caracteriza-se por uma taxa de desgaste constante ao longo do tempo (a inclinação da reta apresenta valor constante), já que a ferramenta se encontra

totalmente adequada ao processo e os mecanismos específicos de desgaste operam em uma taxa constante até atingir uma nova inflexão (MACHADO, 2009). Neste ponto, as dificuldades de corte são excessivamente aumentadas como um aumento da força de corte resultante. A partir desse momento (zona III), o desgaste aumenta de forma acelerada e alguns autores chamaram essa região de zona de desgaste catastrófico (Ninin 1986; Pérez 2011; Ghosh *et al.* 2015; Chauhan 2017), caracterizado por um aumento significativo na taxa de desgaste com tendência exponencial (Equação 10).

$$m_T \sim e^{const T} \quad (10)$$

É um estágio que deve ser evitado, pois não só afetará apenas a ferramenta de corte, mas também conjunto máquina/mecanismos e a qualidade dos produtos obtidos (MACHADO, 2009).

Analogamente Ghosh *et al.* (2015) descreveram os estágios de desgaste como corrida (*running*) ou desgaste acelerado, linear (período de estabilidade) e desgaste catastrófico (que pode ocasionar à falha da ferramenta). Etapas semelhantes da vida das ferramentas na usinagem de metais foram explicadas por meio das curvas de Taylor, onde a teoria de corte está relacionada com a função entre a vida da ferramenta  $T$  versus a velocidade de corte  $V_c$  (GHOSH *et al.*, 2015).

Como o desgaste é uma ação progressiva, aumenta progressivamente a força de corte e a ferramenta perde a capacidade de seccionar as fibras. Estas ferramentas desgastadas são submetidas a tensões de compressão fora da área do corte e para o caso das serras de fita comportam-se como uma coluna delgada produzindo a flambagem da ferramenta, o que resulta em desvios da linha de corte e, portanto, variações na espessura das peças serradas em seu comprimento (ORLOWSKI *et al.* 2022).

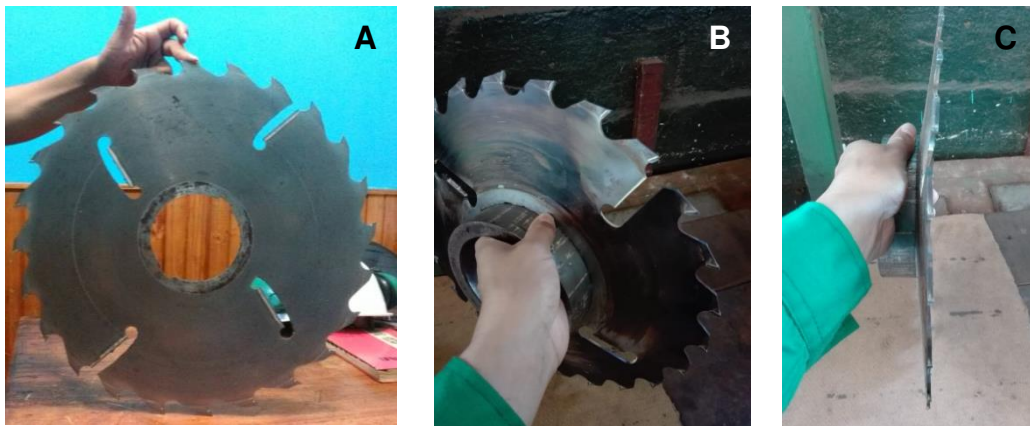
Torkghashghaei *et al.* (2023), reportaram resultados de desgaste das serras no corte de madeira em condições reais de operação com tendência similar com o descrito. Demonstraram um primeiro estágio de desgaste acelerado e à medida que aumentava o trabalho das serras a largura da ponta aumentou significativamente desde os primeiros minutos de trabalho até 255 min (predominantemente desgaste abrasivo) e de forma exponencial até os 900 min (observando dentes com presença de gume lascado) o que evidencia que as serras ultrapassaram o Limite de trabalho iniciando o estágio catastrófico.

No caso das serras circulares, sua rotação está sob uma força centrífuga, direcionada em sentido oposto a seu eixo de rotação. Esta força tem um

comportamento não constante ao longo do raio da ferramenta, já que seu módulo é inversamente proporcional. Por causa deste módulo não constante, as tensões relacionadas não são uniformes e são maiores quando se aproximam à borda da serra sendo mais fracas perto do seu eixo de rotação.

Após um tempo de trabalho da serra, a variação do módulo da força centrífuga em direção com à borda faz com que a ferramenta sofra uma expansão dimensional em direção à sua periferia, o que leva a uma eventual expansão dimensional maior na periferia em relação à sua parte central. A força de corte aumenta progressivamente à medida que a serra se desgasta, assim como a temperatura de corte, o que provoca deformações permanentes na serra (Figura 15).

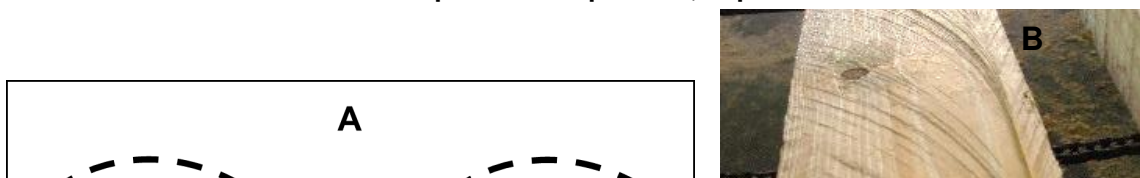
**Figura 15 - A: Serra circular em boa condição. B e C: Serra circular com deformação permanente por aquecimento.**



Fonte: Autoria própria (2023).

A expansão do perímetro da serra devido à força centrífuga incremental, os impactos sob as ferramentas devido ao corte interrompido e os eventos térmicos relacionados, quebram a relação  $Circunferência = \pi \times Diâmetro$ , deixando a serra deformada na forma de oito (8), sem a capacidade de se opor à resistência lateral, isso faz que durante o corte, ao descrever a circunferência, obter uma linha ondulatória, maior que a linear  $X - Y$  na direção do corte (Figura 16-A). Isso é conhecido como perda de tensão nos discos de corte (TREJO *et al.* 2018).

**Figura 16 - A: trajetória teórica de corte e trajetória real de uma serra com perda de tensão. B: madeira serrada com baixa qualidade superficial, superfícies com marcas de corte.**



**Fonte: Trejo *et al.* (2018).**

Isto tem como consequência que com o uso de serras que perderam tensão, a madeira serrada é produzida com variações dimensionais significativas na espessura e qualidade superficial muito baixa, caracterizada por superfícies arranhadas pela oscilação do disco na madeira durante sua trajetória de corte (Figura 16-B), gerando marcas de corte na madeira, temperaturas mais altas de corte, peças com marcas de queimaduras, aumento dos esforços de corte, maiores deformações na serras, consumo de potência excessiva, sobreaquecimento dos motores e da ferramenta de corte, podendo chegar até um processo de corte violento e perigoso.

Autores como Orłowski *et al.* (2013); Aguilera e Martin (2001); Kovač e Mikleš (2010); Cristóvão (2013); e Djurkovic *et al.* (2019), convergem que a força de corte tem relação direta com a energia necessária para cortar a madeira. Portanto, quanto maior a força de corte, maior a quantidade de energia necessária para cortar a madeira (potência de corte) e maior a energia total consumida no processo. Djurkovic *et al.* (2019) em seu artigo conclui que o desgaste da ferramenta, sem dúvida, afeta significativamente o força de corte e a qualidade da superfície processada, o que pode ser importante para determinar a taxa de corte e o intervalo de substituição das ferramentas de corte.

## **2.7 Vibrações na usinagem**

As vibrações referem-se a um estado tal que um objeto sofre deslocamento repetido e rápido (WANG, 2021). Este estado tem grande influência nas ferramentas de corte e no produto. A usinagem dos materiais é invariavelmente acompanhada de vibrações entre a peça e a ferramenta. O nível máximo das vibrações tolerável, ou seja, a máxima amplitude das vibrações em um processo de usinagem, depende da sua aplicação, bem seja, desbaste ou acabamento (LARA, 2017).



Neste contexto, um processo controlado pode ser caracterizado relativamente pela boa qualidade superficial e um desgaste controlado da ferramenta, enquanto um não controlado é associado a um acabamento de superfície deficiente e a um desgaste da ferramenta pronunciado e imprevisto.

No caso da usinagem da madeira, a madeira participa na dissipação das vibrações, devido a sua capacidade de amortecimento material que reduz tanto a aceleração como a velocidade de propagação da onda. Neste caso atende com a teoria do amortecimento material, onde a dissipação da energia é maior quanto maior heterogeneidade do material, por exemplo, a variabilidade da densidade na mesma peça de madeiras, a ortotropia do material e as singularidades presentes como diferentes tipos e quantidades de nós, bolsas de resinas e sentido da orientação das fibras, favorece a razão de amortecimento material a diferencia com materiais isotrópicos (OPAZO *et al.*, 2017).

As vibrações podem ter origem em uma ou mais fontes como as vibrações externas à máquina-ferramenta, vibrações geradas pela própria usinagem, falta de homogeneidade da peça, corte interrompido e vibrações causadas pela máquina-ferramenta (POLLI, 2005).

#### 2.7.1 Vibrações externas à máquina-ferramenta

Vibrações externas à máquina-ferramenta, geralmente geradas por outras máquinas associado ao sistema (prensa, motores, compressores, rolos de alimentação, e outras máquinas operatrizes), são transmitidas pelo solo e pelas suas fundações. Estas vibrações contêm um espectro de frequência muito amplo, de forma que a frequência natural de algum componente de uma máquina-ferramenta pode estar contida nesta ampla faixa de frequência. Assim, este componente pode apresentar níveis de vibrações muito altos e influenciar negativamente os resultados do processo (POLLI, 2005).

#### 2.7.2 Vibrações causadas pela máquina-ferramenta

Vibrações causadas pela máquina surgem tanto em acionamentos de componentes dotados de movimento rotativo quanto de acionamento de componentes com movimento de translação. Estas podem se apresentar sob duas formas, livres e forçadas. As vibrações forçadas são causadas por rotação de massas desbalanceadas, acionamentos por engrenagens e correias, rolamentos com

irregularidades e por forças periódicas nos próprios motores de acionamento (POLLI, 2005).

### 2.7.3 Vibrações causadas por corte interrompido

Na usinagem com corte interrompido, a ferramenta sofre impactos consideráveis que podem levar a níveis indesejáveis de vibrações (POLLI, 2005). No serrado da madeira, as vibrações forçadas são excitadas pela componente periódica da força de corte na frequência de passagem dos dentes no percurso do corte, que podem ser acrescentadas com o aumento da força de corte devido ao desgaste dos dentes.

### 2.7.4 Vibrações devido à falta de homogeneidade da peça

A presença de regiões de diferentes durezas em uma peça (como no caso da madeira) causa pequenos choques sobre a ferramenta, resultando em vibrações, sendo estes impactos absorvidos, os efeitos não são consideráveis, fazendo parte apenas do “ruído de fundo” da usinagem. Entretanto, se estes pequenos choques sobre a ferramenta não forem rapidamente amortecidos, originam vibrações de grande amplitude prejudiciais ao processo (POLLI, 2005).

### 2.7.5 Vibrações regenerativas

As vibrações regenerativas são geralmente classificadas em duas categorias: primárias e secundárias. As vibrações primárias podem ser causadas pelo processo de corte (isto é, pelo atrito entre a ferramenta e a peça, por efeitos termomecânicos na formação do cavaco ou pelo modo de acoplamento). As vibrações regenerativas secundárias podem ser causadas por ondas de regeneração da superfície da peça. Este efeito regenerativo é a mais importante causa das vibrações. Além disso, tem que ser mencionado que é possível distinguir entre vibrações devido ao atrito, vibrações termomecânicas, vibrações devido ao acoplamento de modos e vibrações regenerativas dependendo dos mecanismos de auto excitação que causam essas vibrações (LARA, 2017).

As vibrações devido ao atrito ocorrem quando existe contato entre a superfície usinada com a superfície de incidência da ferramenta de corte na direção da força de corte  $F_c$ . As vibrações termomecânicas ocorrem devido à temperatura e a taxa de deformação na zona de deformação plástica. No caso da madeira, por ser um material com elevado módulo de elasticidade em relação com sua massa, absorve deformações não permanentes (FUENMAYOR *et al.* 2022), causadas pela ação da

pressão dos gumes durante o corte e que sendo liberada a pressão logo do corte, o material experimenta uma regeneração que pode ocasionar contato e conseqüentemente atrito entre a face de incidência e a madeira promovendo vibrações e desgaste na superfície de contato.

## 2.8 Abordagem matemática usada no modelo

### 2.8.1 Aproximação polinomial não linear

Alguns dados de engenharia, embora mostrem um padrão predominantemente linear, são representados com pouca precisão por uma linha reta. Nesse contexto, esses modelos são melhor definidos por aqueles que têm uma dependência não linear de seus parâmetros. Frequentemente, é necessário estimar valores intermediários entre pontos de dados precisos. O método mais comum usado para esse fim é a interpolação polinomial. Lembrando que a fórmula geral para um polinômio de ordem  $n$  (Equação 11) (Chapra e Canale, 2015):

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (11)$$

Para  $n + 1$  pontos de dados, existe um polinômio de ordem  $n$  próximos aos pontos descritos.

Com a aproximação polinomial, é possível estimar um polinômio de ordem  $n$  que melhor se ajusta a  $n + 1$  pontos de dados em um modelo. Este princípio então fornece uma fórmula que pode ser usado com diferentes operações matemáticas para encontrar valores intermediários, propriedades, comportamento, entre outros. No caso do mecanismo de desgaste predominantemente abrasivo como visto na Figura 15, a representação polinomial mostrada é a clássica de um polinômio de terceira ordem, cuja forma padrão é (Equação 12):

$$f(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (12)$$

Onde  $a, b, c$  são os coeficientes polinomiais,  $d$  é o termo constante do polinômio,  $x$  a variável independente e  $f(x)$  a variável dependente.

Em várias situações, o valor de uma função  $f(x)$  em um conjunto de pontos  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{(n-1)}$  é conhecido, mas não possui a expressão analítica para  $f(x)$ , que permite a manipulação da função de acordo com a necessidade. Em alguns casos, tendo a expressão analítica da função  $f(x)$ , é possível obter um valor arbitrário de  $x$  contido entre o menor valor e o maior valor de  $x_i$ , para este caso o método é chamado de interpolação. Em outras situações, o problema vai além da interpolação, pois exige, por exemplo, determinar seções na função, conhecer o comportamento da curva

formada, sua concavidade, se está aumentando ou diminuindo, seu ponto de inflexão, entre outros. Para isso, é importante obter uma maneira suficientemente geral e facilmente computável para abordar uma variedade de funções que podem surgir na prática de maneira eficiente, confiável e prática (PRESS *et al.*, 2011).

### 2.8.2 Equações diferenciais

Em termos gerais, uma equação diferencial ordinária (abreviada como EDO) é uma equação onde existem algumas derivadas de uma função desconhecida. A função incógnita e a variável independente podem aparecer na equação, mas, de fato, quando as derivadas aparecem, a equação é referida como uma equação diferencial (BOULOS e ABUD, 2012).

A área da mecânica, diretamente inspirada na física, contém inúmeras aplicações de equações diferenciais, já que as leis físicas em grande número são expressas por elas e são naturalmente uma aproximação da realidade. Por exemplo, elas são comumente usadas para expressar taxas de variação (aumentando ou diminuindo) de um parâmetro como uma função de uma taxa de variação de uma variável independente (BOULOS e ABUD, 2012; MARTINS e MARTINS, 2014). Neste estudo, foram utilizadas considerando uma taxa de variação do consumo de energia do motor da serra em função de uma quantidade proporcional de trabalho específico realizado pelas serras (distância de corte acumulada e/ou volume de material produzido), isto como um indicador indireto do desgaste dessa serra.

### 2.8.3 Derivada primeira

Qualquer derivada pode ser interpretada como uma taxa de variação (MARTINS e MARTINS, 2014). Dada uma função  $y = f(x)$ , quando a variável independente varia de  $x$  para  $x + \Delta x$ , a variação correspondente de  $y$  será a Equação 13.

$$\Delta y = f_{(x+\Delta x)} - f_{(x)} \quad (13)$$

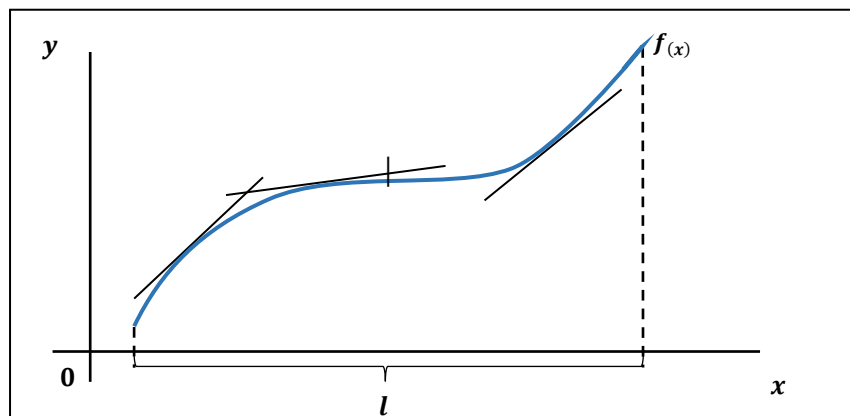
A equação  $\Delta y/\Delta x$  ou também denotada como  $dy/dx$  (Equação 14) representa a taxa média de variação de  $y$  em relação a  $x$ . A derivada de  $f_{(x)}$  (Equação 15), é a taxa de variação instantânea ou simplesmente a taxa de variação de  $y$  em relação a  $x$ .

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (14)$$

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (15)$$

Se uma função  $f(x)$  com uma derivada positiva em todos os pontos de um intervalo  $l$ , tal como  $f'(x)$  é a inclinação da reta tangente de  $f$  no ponto  $(x, f(x))$ , então a hipótese do ponto de vista geométrico, é que qualquer reta tangente na função no segmento correspondente ao intervalo  $l$ , tem uma inclinação positiva. Em outras palavras,  $f(x)$  está aumentando em  $l$  (Figura 18) de maneira similar àquela mostrada na Figura 14, só que começa na origem  $(0, 0)$ .

**Figura 17 - Interpretação geométrica da derivada de uma função.**



Fonte: Autoria própria (2023).

#### 2.8.4 Segunda derivada

Se  $f$  é uma função derivável em um intervalo  $(a, b)$  e  $c$  é um ponto de  $f$  neste intervalo (semelhante ao ponto L na Figura 2.15-A), então  $f'(c) = 0$ , com  $a < c < b$ . Se  $f$  admite a segunda derivada  $f''$  em  $(a, b)$ , tem-se que:

- 1) Se  $f''(c) < 0$ ,  $f$  tem um valor máximo relativo em  $c$ .
- 2) Se  $f''(c) > 0$ ,  $f$  tem um valor mínimo relativo em  $c$ .

A segunda derivada  $\frac{d^2y}{dx^2}$ , da função também denotada como  $f''(x)$ ,  $y = f(x)$  é a derivada de  $\frac{dy}{dx} \cdot \frac{dy}{dx}$  é uma função de  $x$  que descreve a inclinação da curva. Tomar sua derivada  $f''(x)$ , encontram-se os valores de  $x$  para os quais  $f''(x)$  é positivo ou negativo, pode-se determinar onde  $f'(x)$  está aumentando ou diminuindo. Isso pode ser usado para calcular a concavidade da curva ou como a curva se comporta (NICOLAS, 2004; BOULOS e ABUD, 2012).

### 2.8.5 Ponto de inflexão

Basicamente, um ponto  $P_{(c, f(c))}$  de uma função contínua  $f$ , é chamado ponto de inflexão, se houver um intervalo  $(a, b)$  que contenha  $c$  (semelhante ao ponto L na Figura 14), de tal forma que uma das seguintes situações ocorra:

- 1)  $f$  é côncava para cima  $(a, c)$  e côncava para baixo  $(c, b)$ .
- 2)  $f$  é côncava para baixo em  $(a, c)$  e côncava para cima em  $(c, b)$ .

Um ponto de inflexão ocorre em um ponto onde  $f_{(x)}'' = 0$ , porque há uma mudança na concavidade da curva nesse ponto (NICOLAS, 2004; BOULOS e ABUD, 2012).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido em duas etapas:

Etapa I: consistiu na formulação do modelo matemático que aproximou ao processo de desgaste abrasivo da ferramenta. Para isso, foram realizados ensaios de corte com serras circulares em painel duros à base de madeira (HDF) a fim de obter situações críticas em termos de corte de acordo com a direção das fibras (padrão aleatório de disposição das fibras) e da influência no comportamento do desgaste abrasivo produto do sulfato de amônio e a resina fenólica como aditivos nos painéis.

Etapa II: consistiu em testes de validação do modelo previamente formulado. Neste caso, os dados de corte foram coletados em condições reais de operação industrial em serrarias de madeira bruta (toras de pinus). Para isso, foram utilizadas serras circulares e serras de fita nas condições normais de trabalho de cada indústria (PROPULSO C.A., MADEM S.A., e TODESMADE Ltda.).

#### 3.1 Matéria-prima

A matéria-prima utilizada no estudo preliminar de corte (etapa I) foram painel HDF (*high density fiberboard*) não revestidos, produzidos na empresa PROPULSO C.A. (localizada no estado Bolívar, Venezuela), com a espécie *Pinus caribaea var hondurensis* de 25 a 28 anos de idade de plantações do sudeste da Venezuela. Os painéis foram fabricados com cavacos de madeira juvenil do ápice das árvores e de cavacos de madeira adulta (periferia das toras) como subproduto do picador perfilador (*chipper canter*) da serraria, na proporção de 2:1 (madeira jovem:madeira adulta). Os aditivos químicos utilizados na fabricação dos painéis HDF foram emulsão de parafina, sulfato de amônio e resina fenólica (fenol formaldeído).

Para os testes da validação do modelo (etapa II), a matéria-prima utilizada foi madeira em toras sem casca da espécie *Pinus elliottii* de plantios florestais oriundos do sul do Brasil com idades compreendidas entre os 22 e 38 anos processados na empresa MADEM S.A., e a empresa TODESMADE Ltda (empresas localizadas no estado de Paraná e no Rio Grande do Sul, Brasil).

#### 3.2 Propriedades físicas e mecânicas da matéria-prima utilizada

A densidade média e o teor de umidade médio dos painéis produzidos durante o estudo foram obtidas de acordo com a norma ANSI A135.4-2004 usado pela

empresa PROPULSO C.A., para o controle de qualidade de seus produtos (Tabela 1) determinados no teste 1, teste 2 e teste 3 definidos como T1, T2 e T3.

<b>Teste</b>	<b>Densidade aparente média (<math>kg.m^{-3}</math>)</b>
<b>T1</b>	1.190 <sup>(8%)</sup>
<b>T2</b>	1.015 <sup>(5%)</sup>
<b>T3</b>	1.028 <sup>(4%)</sup>

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Legenda: Valores entre parêntesis são os coeficientes de variação percentual.

O teor de umidade médio dos painéis foi de 5%, o qual foi determinado de acordo com a norma ANSI A135.4-2004, após do processo de climatização das placas-mãe e antes do corte.

As principais propriedades mecânicas dos painéis utilizados foram o módulo de ruptura de  $598 kg.cm^{-2}$  e a resistência à tração de  $9,1 kg.cm^{-2}$ , os quais foram determinados de acordo com a norma ASTM D1037-99.

A densidade média da madeira processada na etapa II, foi estimada através da norma ASTM D2395-17(2022) (*Test Method A—Volume by Measurement*). Os resultados obtidos mostram uma importante variabilidade na densidade tanto nas observações obtidas entre as mesmas peças como dentro do grupo de peças avaliadas. Isto faz referência com a heterogeneidade da madeira entre as espécies e entre a mesma espécie (Tabela 2).

<b>Tipo de madeira</b>	<b>Densidade média aparente (<math>kg.m^{-3}</math>)</b>
	<i>Pinus elliottii</i>
<b>Madeira jovem / central (zona de influência medular)</b>	502 <sup>(32%)</sup>
<b>Madeira transição / semi lateral (próximo com a zona de influência medular)</b>	517 <sup>(25%)</sup>
<b>Madeira adulta / lateral (radialmente afastada da zona de influência medular)</b>	571 <sup>(16%)</sup>

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Legenda: Valores entre parêntesis são os coeficientes de variação percentual. A densidade média aparente foi determinada em condição seca a 12% teor de umidade.



### 3.3 Espessura dos painéis

A espessura média dos painéis utilizados no estudo de corte foi de 4,0 mm, (de acordo com ASTM D 1037-99, Anexo B).

### 3.4 Ferramentas de corte

Foram utilizadas serras circulares marca Leuco novas para cada estudo e de acordo com as seguintes especificações (Tabela 3):

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro da serra (mm)	450
Espessura da serra (mm)	2,1
Largura do corte de serra (mm)	3,2
Inserções para serras circulares	Reforços de carboneto de tungstênio (K10 – ISO), com bisel trapezoidal plano
Número de dentes	72
Passo dos dentes (mm)	20
Ângulo de saída ( $\gamma_n$ )	15°
Ângulo de incidência ( $\alpha_n$ )	15°
Ângulo da cunha ( $\beta_n$ )	60°

Fonte: Autoria própria (2023).

Na validação do modelo foram utilizadas serras de fita marca Reval e Uddeholm novas, com as seguintes especificações (Tabela 4):

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Largura da serra (mm)	150
Espessura da serra (mm)	1,25
Largura do corte de serra (mm)	3,5
Material de reforço nas arestas dos dentes	Stellite T12
Altura do dente (mm)	16
Passo dos dentes (mm)	55
Ângulo de saída ( $\gamma_n$ )	30°
Ângulo de incidência ( $\alpha_n$ )	10°
Ângulo da cunha ( $\beta_n$ )	50°

Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.5 Equipamento de corte

Na etapa I, os cortes foram realizados em uma serra circular automática para painel, formada pela unidade de corte, uma serra circular para o corte transversal e

duas serras circulares para os cortes longitudinais das placas-mãe. O estudo de corte foi realizado só na unidade de cortes transversais, pois ofereciam as mesmas condições do corte longitudinal. A unidade de corte estava composta pela serra circular, a unidade de rotação (motor elétrico) e o sistema de alimentação da unidade de corte (motor elétrico independente da rotação da ferramenta de corte), sistema de aspiração de partículas e sistema de controle lógico programável PLC Siemens (*programmable logic controller*). O motor elétrico da unidade de rotação (unidade de corte) onde foi coletado o consumo de corrente tem as seguintes especificações: Marca do motor PERSKE D 68167 de construção alemã Mannheim, tipo K81.23-D (especial), trifásico de tensão alternada 440 V nominal com conexão estrela-triângulo, corrente nominal 20,5 A, potência nominal de 17 Hp, velocidade nominal de 3.470 rpm, fator de potência ( $\cos \varphi$ ) 0,9. Os parâmetros de corte utilizados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 - Parâmetros de corte utilizados na etapa I (corte de painéis HDF)**

Parâmetros	Valor
Velocidade rotacional ( $n$ )	3.470 rpm
Velocidade de corte ( $v_c$ )	81,76 m/s
Taxa de alimentação ( $v_f$ )	21 m/min
Velocidade de retração (sem corte)	35 m/min

Fonte: Autoria própria (2023).

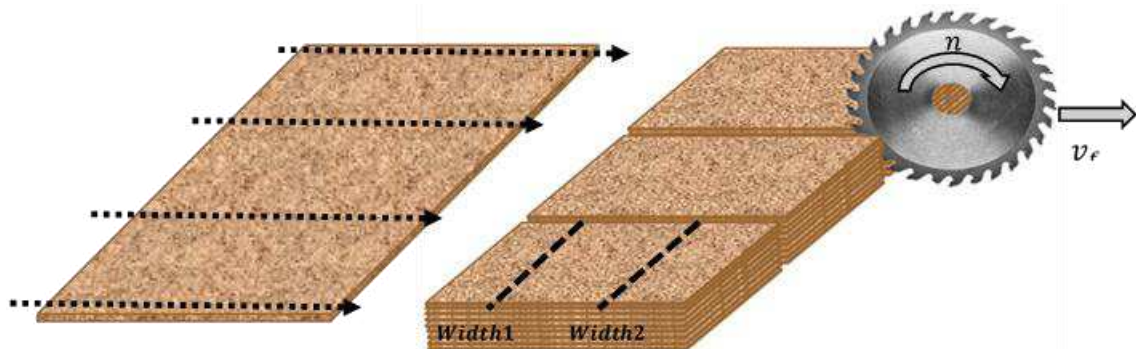
Na etapa II, os cortes foram realizados em um conjunto de serras de fita QUADRA 1200 de fabricação Brasileira, com diâmetro de volante de 1200 mm, deslocamento dos cabeçotes com guias lineares e fusos de esferas independentes acionados por servomotor vinculado à sistema de *scanner* de toras, com velocidade de posicionamento de 400 mm/s, com sistema automático de limpeza e refrigeração das serras e dos volantes durante os cortes. Também possui mesa de alimentação com tecnologia de servomotores que permite posicionamentos independentes. Com potência de motor de 4 cabeçotes de 55 kW.

### 3.6 Procedimento de corte

Na etapa I, os cortes foram realizados em camadas de placas-mãe de HDF, com dimensões padrão de 5,6 m de comprimento e 2,15 m de largura, de acordo com as dimensões da prensa multi-pratos disponível no sistema de produção (prensa

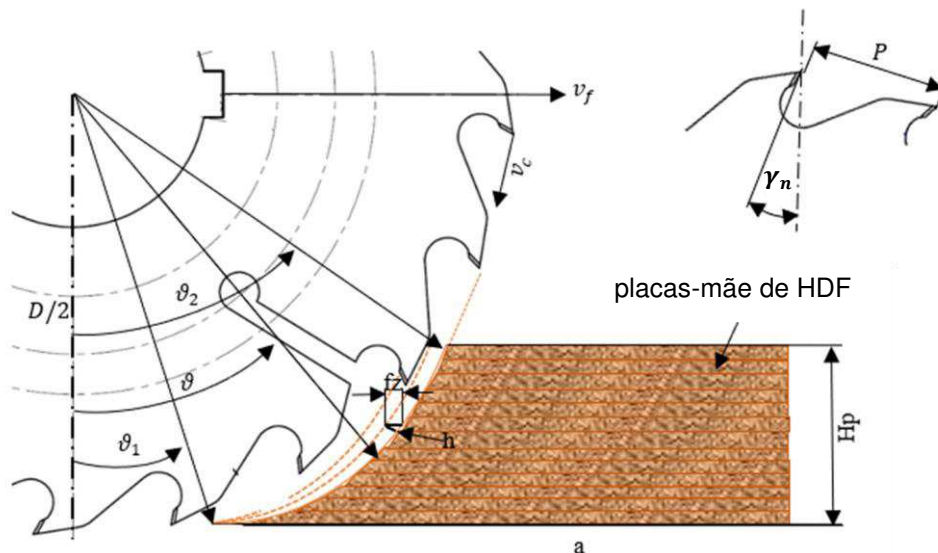
hidráulica de 28 pratos de pressão). Cada camada de placas-mãe correspondia a 10 unidades empilhadas uma sobre a outra e cortadas transversalmente para obter 3 lotes de 39 painéis com dimensões comerciais de 2,15 m de comprimento, 1,83 m de largura e 4 mm de espessura (Figuras 19 e 20).

**Figura 18 - Corte transversal de camadas de painéis com serra circular**



Fonte: Trejo *et al.* (2020).

**Figura 19 - Cinemática do corte dos painéis HDF em serra circular.**



Fonte: Trejo *et al.* (2020).

Legenda:  $D$ : diâmetro da serra,  $\vartheta_1$ : ângulo de entrada,  $\vartheta_2$ : ângulos de saída,  $\vartheta$ : posição angular do dente,  $f_z$ : avanço por dente,  $h$ : espessura do cavaco,  $v_c$ : velocidade de corte,  $v_f$ : velocidade de avanço,  $H_p$ : altura da peça de trabalho,  $a$ : posição da peça de trabalho,  $\gamma_n$ : ângulo de saída,  $P$ : passo dos dentes.

Na etapa II, os cortes foram realizados de acordo com a classificação de corte ortogonal 90-90 em toras sem casca com comprimento de 3.750 mm e ranges de

diâmetros classificadas nas seguintes classes: entre 160 e 240 mm; entre 250 e 340; entre 350 e 450 mm.

Os cortes foram realizados em condições normais de produção, correspondente a turnos de 8 horas 48 min (tempo total) de trabalho. A velocidade de avanço foi ajustada de forma autônoma seguindo o princípio da espessura de cavaco ótima (saturação das gargantas da ferramenta) de acordo com o diâmetro da tora em corte, ou seja, máxima velocidade de avanço admissível de acordo com as categorias de diâmetro das toras em corte, oscilando entre 38 m/min (para toras com diâmetros de 450 mm), 70 m/min (para toras com diâmetros de 250 mm) e 98 m/min (para toras com diâmetros de 160 mm), de acordo com as Equações 16 e 17.

$$h = V_f * P * V_c^{-1} \quad (16)$$

$$\frac{Hc_1}{Hc_2} = \frac{h_2}{h_1} \quad (17)$$

Onde  $h$ : é a espessura de cavaco ideal,  $V_f$ : velocidade de avanço,  $P$ : o passo dos dentes,  $V_c$ : velocidade de corte,  $Hc_1$ : altura de corte de referência 1,  $Hc_2$ : altura de corte de referência 2,  $h_1$ : espessura de cavaco ideal calculada para uma altura de corte de referência 1,  $h_2$ : espessura de cavaco ideal calculada para uma altura de corte de referência 2.

A altura de corte foi variável ao longo dos turnos de trabalho que dependeu da classe diamétrica processada e o plano de corte selecionado. As toras foram classificadas de acordo com os planos de corte para um processamento por lote (classificação por categoria de diâmetro das toras).

### 3.7 Coleta das informações

Os testes preliminares (etapa I), foram realizados em condições normais de produção da empresa e em diferentes turnos de trabalho de maneira contínua. O estudo do desgaste das ferramentas de corte foi realizado por métodos indiretos e foi necessário avaliar três parâmetros, dos quais dois foram quantitativos e um qualitativo. Os parâmetros quantitativos foram: 1) A intensidade de corrente consumida pelo motor da serra durante a vida útil das ferramentas de corte e 2) As variações dimensionais dos painéis durante a vida útil das serras. O parâmetro qualitativo foi: A qualidade superficial do corte durante a vida útil das serras. Para maior confiabilidade do estudo, três testes experimentais foram realizados nas mesmas condições.

Os testes de validação do modelo (etapa II), de igual forma foram realizados em condições reais de produção em turnos de trabalho consecutivos na indústria. Para avaliar o desgaste das ferramentas de corte, foi coletado o consumo de corrente de forma contínua em cada serra testada durante o tempo total de trabalho. Cada serra avaliada foi identificada, diagnosticada inicialmente e registrada com micrografias dos dentes (antes do trabalho). Durante cada troca de turno, foi avaliada cada serra e registrada uma nova micrografia dos dentes para relacionar o desgaste visível nos gumes com o incremento do consumo de corrente para logo continuar em serviço até finalizar o trabalho da serra.

### **3.8 Consumo de energia**

A informação referente ao consumo de energia do motor elétrico da serra durante o corte dos painéis foi realizada por meio de um registrador trifásico de potência marca Fluke modelo 1736, com uma intensidade de registro a cada 2 segundos durante o corte, ou seja, para a cada trajetória de corte nos painéis, foram coletados dois registros de consumo de potência por corte, portanto para cada camada de placas-mãe (correspondentes a dois cortes) foram coletados quatro registros/camada. A distância percorrida pelo disco durante o corte foi registrada, para relacionar o aumento no consumo de energia e o comprimento percorrido pelo disco durante o corte.

O registro do consumo de energia foi coletado do inversor de frequência através do CLP que envia as informações para um banco de dados de um servidor processado em um supervisório em tempo real. O sistema de coleta de informação do consumo de energia está integrado a um sistema inteligente que coleta dados do processo sempre que estiver ativada as correntes de avanço, portanto se reduz grande quantidade de dados desnecessários e só são coletados os dados quando há tora em movimentação pela linha de produção.

### **3.9 Variações dimensionais dos painéis**

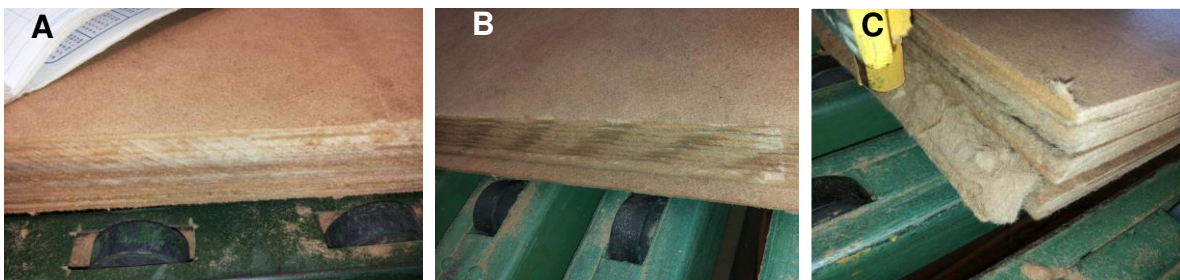
Para a avaliação dimensional dos painéis depois do corte, foram realizadas duas medições na largura dos painéis (dimensão formada por dois cortes sucessivos nos painéis) distribuídas em três partes iguais (Figura 19) e foram considerados dois parâmetros de comparação. Um parâmetro formado pela diferença de ambas as

medidas na mesma placa ( $\Delta L = Largura1 - Largura2$ ), que expõe o grau de paralelismo dos cortes na mesma placa e um parâmetro formado pela diferença de cada largura e a dimensão nominal ( $\Delta LN_1 = Largura1 - Largura\ nominal$ ,  $\Delta LN_2 = Largura2 - Largura\ nominal$ ), que representa o desvio do valor nominal para a largura dos painéis. Para este efeito, a norma ANSI A135.4-2004 foi tomada como referência, onde se expressa uma tolerância por metro linear de corte no painel de  $\pm 1,6$  mm/m. Avaliou-se a dimensão de 240 painéis de um total de 4.680 painéis, que corresponde a 5% do total.

### 3.10 Qualidade da superfície de corte nos painéis

A qualidade da superfície foi caracterizada nas camadas de placas de corte utilizando uma adaptação da ASTM 1666-11 (2011), através de avaliação subjetiva por 3 especialistas de forma independente, simultânea e separada. A avaliação superficial foi classificada em grupos: 1) Excelente: cortes retos e precisos, sem defeitos (Figura 21-A). 2) Aceitável: cortes retos e precisos, presença de queimadura (Figura 21-B). 3) Rejeitado: cortes imprecisos, rasgo nos painéis, levantamento de fibras (Figura 21-C). Na avaliação superficial das camadas foi mantido um registro da distância de corte acumulada. Foram avaliadas 24 camadas de placas de um total de 120 camadas de placas, o que corresponde a 20% do total.

**Figura 20 - Avaliação da qualidade da superfície de corte nos painéis. A: Produto Excelente. B: Produto Aceitável. C: Produto Rejeitado.**



Fonte: Autorial própria (2023)

### 3.11 Desgaste dos gumes

A caracterização quantitativa do desgaste foi realizada com um microscópio ótico V3.0 (20X-800X), analisando as imagens com o software Microcapture V2.0 (2.0 Mega Pixels interpolado a 2 m) (Figura 22). O parâmetro utilizado para quantificar o

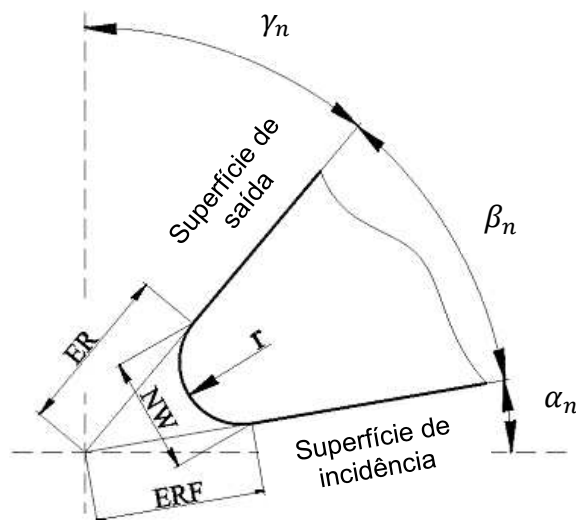
desgaste foi a largura da ponta da ferramenta definida por Cristóvão (2013) como NW (*nose width*) e por Torkghashghaei *et al.* (2023) como NW (*wear land*), em dentes selecionados aleatoriamente de cada serra (Figura 23).

**Figura 21 – Medição do desgaste por microscopia ótica**



Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 22 - Parâmetros usados para medir o desgaste da ferramenta**



Fonte: Adaptação de Cristóvão (2013) e Torkghashghaei *et al.* (2023).

Legenda:  $\gamma_n$ : ângulo de saída,  $\beta_n$ : ângulo da cunha,  $\alpha_n$ : ângulos de incidência,  $ER$ : desgaste de ponta pela face de saída,  $ERF$ : desgaste de ponta pela superfície de incidência,  $NW$ : largura da ponta,  $r$ : raio da aresta.

### 3.12 Processamento de dados

Para a análise do consumo de energia, foi necessário modelar por meio de uma equação matemática, que aproxima os valores ao comportamento do desgaste

abrasivo. Neste estudo, um modelo de ajuste não linear foi desenvolvido a partir dos pares de pontos  $x, y$ , de acordo com a teoria do desgaste abrasivo (curva sigmoideal). Como o modelo foca sua atenção no final da curva formada, foi necessário fazer um ajuste no modelo a partir dos dados experimentais, em que a função se estende desde a origem nas coordenadas 0,0.

A função foi modelada através de uma equação desenvolvida e composta por duas partes (Equação 18). A primeira parte reflete um comportamento exponencial de  $f(x)$  para os valores de  $x$ , que tem maior incidência no último estágio da curva formada pelo processo de desgaste abrasivo (Figura 14). A segunda parte que reflete o comportamento de crescimento de um pseudo logaritmo (estágios iniciais, zona I e II da Figura 14). Esta parte da equação perde efeito quando  $x$  aumenta seus valores, então a parte exponencial da equação começa a ser dominante.

$$f(x) = (e^{a(1)x^3}) + \left(\frac{a(2)x}{x+a(3)}\right) \quad (18)$$

Neste estudo, a importância se concentra na última etapa do modelo, perdendo o interesse nas etapas iniciais. Neste caso,  $f(x)$  corresponde ao consumo de potência ou energia (kW ou A);  $x$  o comprimento de corte acumulado (m) ou volume de madeira cortada (m<sup>3</sup>) e  $a$  é um vetor de coeficientes da equação (vetor de otimização).

Sabendo que a primeira derivada de  $f(x)'$ , é a taxa de variação instantânea ou simplesmente a taxa de variação de  $y$  em relação a  $x$ . Um ponto de inflexão ocorre em um ponto na função onde a segunda derivada  $f(x)'' = 0$ , porque há uma mudança na concavidade da curva nesse ponto (NICHOLAS, 2004; BOULOS e ABUD, 2012).

Para determinar o limite de trabalho das ferramentas de corte (serras circulares e serras de fita) tanto no corte dos painéis a base de madeira como da madeira em toras, foi necessário determinar o instante em que a função muda de côncava para convexa, ou seja, conhecer o ponto de inflexão da função, através da equação diferencial (segunda derivada da Equação 18). Para isto, foi desenvolvido um algoritmo utilizando o programa MATLAB® versão 2021, incorporando a Equação 18 para ajuste não linear. O algoritmo desenvolvido, importa um arquivo externo, descarrega o banco de dados e processa os valores, para mostrar os resultados da equação ajustada ao modelo, o ponto de inflexão, conforme com o pseudocódigo apresentado na Figura 24, que melhor sintetiza o algoritmo utilizado.



**Figura 23 - Pseudocódigo desenvolvido para o modelo.**

```

1:  $R(1, 2, 3)_{xy} = Read(data)$ 
2:  $N = 1 : 1035$ 
3: for n=1:3 do
4:    $a = (5e^{-9}, 5, 1); D = N$ 
5:   while  $D > \epsilon$  do
6:      $F_n(x) = e^{a(1)x^3} + \frac{a(2)x}{x+a(3)}$ 
7:      $min[D = \sum_{k=1}^N (R(n)_{xk} - F_n(x_k))]$ 
8:     Update(a)
9:   end while
10:   $F2(x) = \ddot{F}_n(x)$ 
11:   $R_n = solve(F2(x) = 0)$ 
12:  Plot( $F_n(x)$ )
13: end for

```

**Fonte: Autoria própria (2023).**

### 3.13 Análise estatístico dos dados

Os dados recolhidos foram analisados a nível exploratório através da estatística descritiva e gráficos de limites de controle. Para comparar as médias dos grupos de dados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de um fator, a fim de determinar se existem ou não diferenças estatísticas entre eles. Em cada caso e antes do ANOVA, foi necessário corroborar os pressupostos estatísticos de: Normalidade (através do teste de Kolmogorov-Smirnov ou Shapiro-Wilk dependendo do caso) e Homoscedasticidade ou Homogeneidade de variância (através do teste de Levene). Nos casos em que houve diferenças estatísticas significativas entre as médias, foi necessário realizar o teste paramétrico Post Hoc (através do teste Duncan) para avaliar os grupos semelhantes e os diferentes de cada caso. Nos casos que os pressupostos estáticos não foram atendidos (como distribuição não normal ou variância não homogêneas, o seja, com heterocedasticidade) foi necessário aplicar o teste não paramétrico de Duncan para agrupar as amostras estatisticamente similares. O programa IBM SPSS® Statistics versão 22 foi utilizado para a análise estatística.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de ensaios preliminares realizados na formulação do modelo desenvolvido na etapa I, são apresentados a continuação:

### 4.1 Etapa I: Ensaio preliminares

#### 4.1.1 Consumo de energia no corte

A Tabela 6, mostra a estatística descritiva da potência consumida pela serra nos cortes nos painéis durante a distância de corte acumulada. Com uma amostra total de 480 registros para cada teste, observou-se uma notável margem entre o valor mínimo e máximo do consumo de energia, o que evidencia que não é possível fazer inferências nem neste caso com simples estatísticas descritivas. O comprimento de corte limite foi de 1.032 m para uma altura de corte média de 40 mm (10 painéis empilhados), o que correspondeu a uma produção total acumulada de 61 toneladas de painel (120 placas-mãe cortadas em total), sendo decidido substituir as serras em cada teste, uma vez que a qualidade dos cortes nos painéis foi claramente afetada.

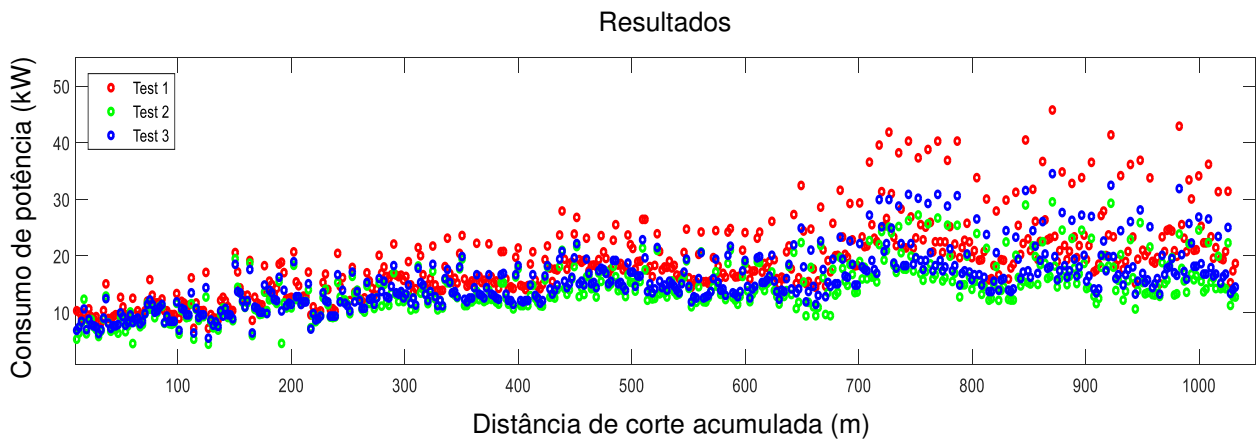
**Tabela 6 - Estatística descritiva para o consumo de energia em cada Teste, para uma distância total de corte de 1.032 m a uma altura média de corte de 40 mm.**

	Teste	N	Min.	Max.	Média	Desvio padrão
Teste 1	Consumo de potência (kW)	480	7,2	45,8	18,95	6,86
	N válido (da lista)	480				
Teste 2	Consumo de potência (kW)	480	4,4	29,5	14,22	4,37
	N válido (da lista)	480				
Teste 3	Consumo de potência (kW)	480	5,5	34,5	15,47	5,02
	N válido (da lista)	480				

**Fonte: Autoria própria (2023).**

A Figura 25, mostra a tendência crescente do consumo de potência tanto na magnitude quanto na dispersão dos valores em função da distância de corte, o que evidencia o desgaste da ferramenta de corte. Em estudo semelhante, Cristóvão *et al.* (2013) expressaram que os dados teóricos e experimentais de consumo elétrico obtidos no motor convergiam com o aumento do raio da aresta da ferramenta de corte, demonstrando em condições reais de operação em duas serrarias processando a espécie *Pinus sylvestris*, a relação direta entre o consumo de energia e o desgaste da ferramenta em função do tempo de trabalho.

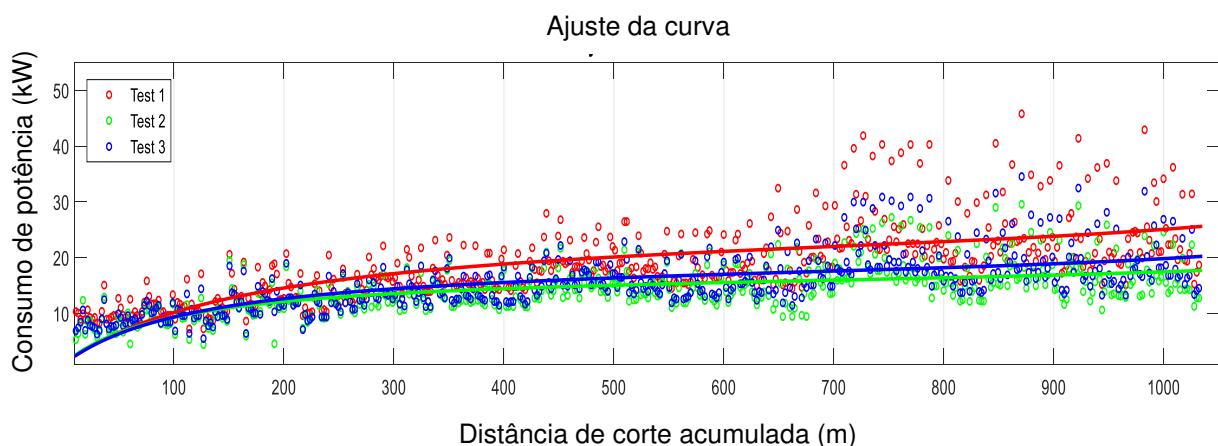
**Figura 24 - Consumo de potência no corte em função da distância de corte acumulada.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A Figura 26, mostra um primeiro estágio caracterizado por um aumento significativo com uma tendência quase-logarítmica, formando uma concavidade para baixo na função. Seguidamente a curva vai a um estágio de desaceleração da função, dominada por uma tendência quase-linear e com menor pendente que no estágio anterior, até atingir um estágio da função onde um aumento abrupto é observado com uma tendência quase-exponencial. Neste ponto, a função vai de côncava a convexa, região conhecida como estágio de desgaste catastrófico, semelhante ao comportamento descrito na Figura 14. Neste último estágio da curva, as dificuldades de corte são excessivamente aumentadas, caracterizadas por aumentos no consumo de potência e maior dispersão de seus registros.

**Figura 25 - Estágios na curva de consumo de potência e distância de corte acumulada.**



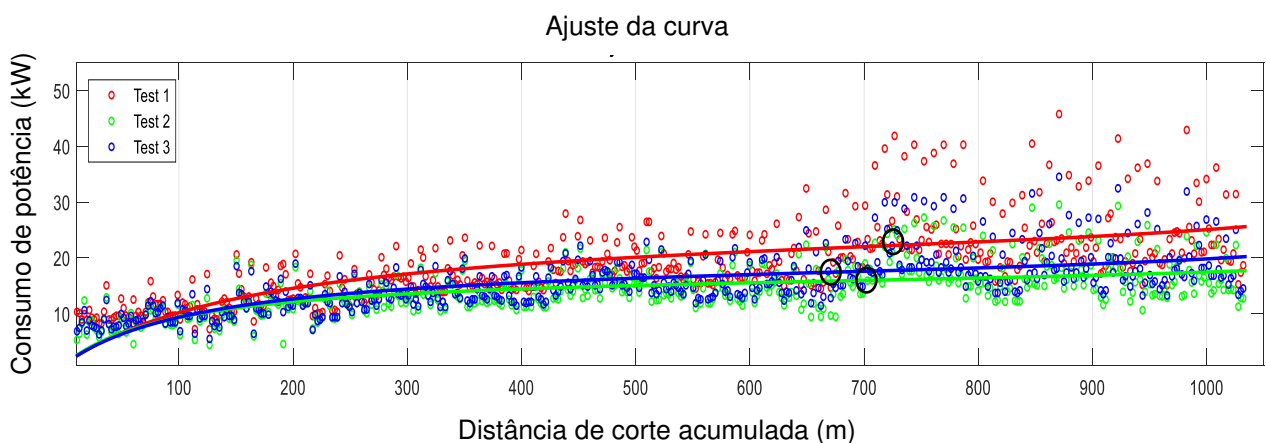
**Fonte: Autoria própria (2023).**

Analisando as especificações de projeto do motor da serra, observou-se que o valor da corrente nominal foi 20,5 A efetivo, que o motor requer na saída para gerar uma potência mecânica nominal de 17 Hp ou 12,68 kW (no eixo ou rotor). Devido às condições mecânicas e elétricas, parte dessa energia da entrada é perdida por atrito, calor e campos magnéticos.

Quanto à resposta do modelo, é possível obter a determinação do ponto de inflexão da função, que conseqüentemente é o limite de trabalho das ferramentas de corte em cada teste. Este foi obtido para uma altura média de corte de 40 mm e um comprimento de usinagem acumulado como limite de trabalho das serras de 720 m para o Teste 1, correspondendo a 84 camadas de placas-mãe cortadas (42,3 ton). Para o teste 2, 707 m correspondendo a 82 camadas de placas-mãe cortadas (41,5 ton); e 685 m para o Teste 3, que corresponde a 80 camadas de placas-mãe cortadas (40,3 toneladas/placas). Para este caso, pode ser considerado um valor médio de 704 m de comprimento de corte acumulado (ou limite de trabalho), para uma produção média de 41,4 toneladas/placas ou 82 camadas de placas-mãe cortadas.

A diferença entre a maior distância (Teste 1) e a menor (Teste 3) foi apenas de 35 m, o seja, 16 cortes (equivalente a apenas 4 camadas de placas-mãe), que são valores bastante próximos entre os três testes, apesar da variabilidade natural do processo industrial, como pode ser observado na Figura 27.

**Figura 26 - Limite de trabalho das serras circulares no corte nos diferentes testes desenvolvidos.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

#### 4.1.2 Qualidade da superfície cortada

A Tabela 7, mostra a relação percentual como resultado da avaliação da qualidade da superfície pelos especialistas, onde observa-se que, de um total de 144

registros, 53% correspondem a produtos excelentes, 16% produtos aceitáveis e 31% do total foram considerados como rejeitados, o que leva a um retrabalho ou uma reclassificação para um tipo marginal de produtos. Agrupando as categorias excelente e aceitável, resulta um total de 69% dos produtos que atendem aos padrões de exportação, sendo consistente em cada teste (Tabela 8). É importante lembrar que os testes de corte foram realizados de forma contínua e estendida para encontrar o ponto de inflexão da função do desgaste, é por isso que as serras trabalharam até ultrapassar o Limite de trabalho (inicialmente desconhecido) até entrar nos 31% de produtos rejeitados (condição atípica).

**Tabela 7 - Proporção percentual da avaliação da qualidade da superfície.**

<b>Registros totais</b>		144
<b>Qualidade da superfície</b>	Excelente	53%
	Aceitável	16%
	Rejeitado	31%

**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Tabela 8 - Proporção percentual da avaliação da qualidade superficial em cada teste.**

<b>Qualidade da superfície</b>	<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>
Total	24	24	24
Excelente	44%	56%	60%
Aceitável	18%	19%	11%
Rejeitado	38%	25%	29%

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Ao detalhar as categorias resultantes da avaliação da qualidade de superfície do corte de forma independente pelos expertos, pode-se observar na Tabela 9, que a qualidade das peças cortadas foi considerada Excelente até alcançar uma distância de corte acumulada de 479 m para o Teste 1 (T1), 561 m para o Teste 2 (T2) e 604 m para o Teste 3 (T3). A categoria Aceitável foi atendida numa distância de corte para T1 entre 479 e 737 m, para T2 entre 561 e 733 m e para T3 entre 604 e 692 m. A categoria Rejeitada foi alcançada a partir de uma distância de corte de 737 m para T1, para T2 a partir de 735 m e finalmente para T3 a partir de 692 m. Nos três casos, o limite da categoria Aceitável convergiu próximo ao ponto de inflexão calculado e apresentado na Figura 27 (100% das peças cortadas antes do ponto de inflexão são consideradas sem defeitos devido ao desgaste).

**Tabela 9 - Avaliação superficial do corte e seu respectivo comprimento de corte em cada teste.**

Qualidade superfície	Teste 1			Teste 2			Teste 3		
	Exc.	Aceit.	Rej.	Exc.	Aceit.	Rej.	Exc.	Aceit.	Rej.
Distância acumulada de corte (m)	0-479	<b>479-737</b>	737-1.032	0-561	<b>561-733</b>	733-1.032	0-604	<b>604-692</b>	692-1.032
Ponto de inflexão calculado		<b>720</b>			<b>707</b>			<b>685</b>	

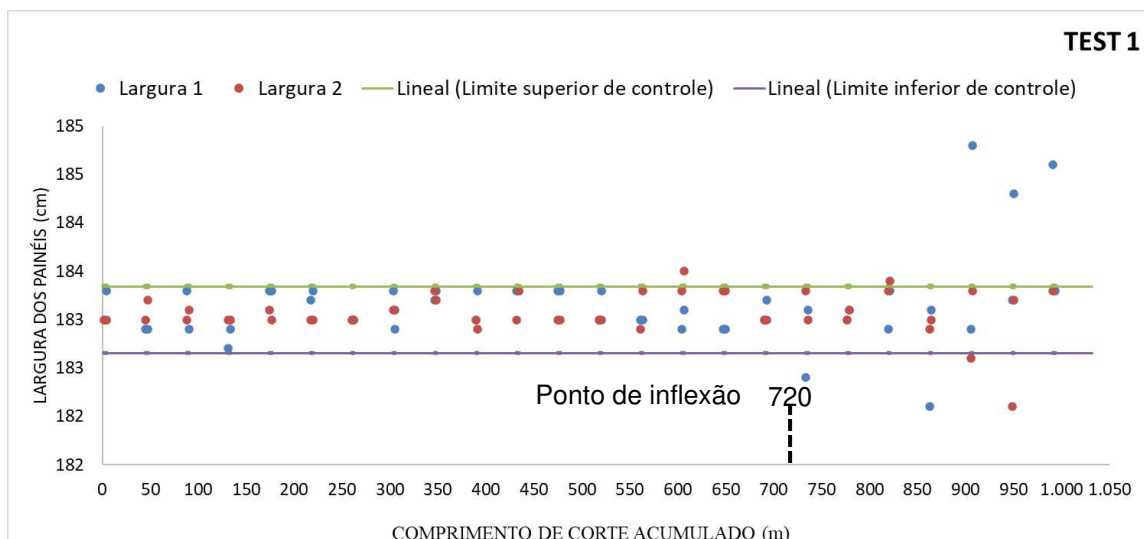
Legenda: Exc.: Excelente; Aceit.: Aceitável; Rej.: Rejeitado.

Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.1.3 Qualidade dimensional

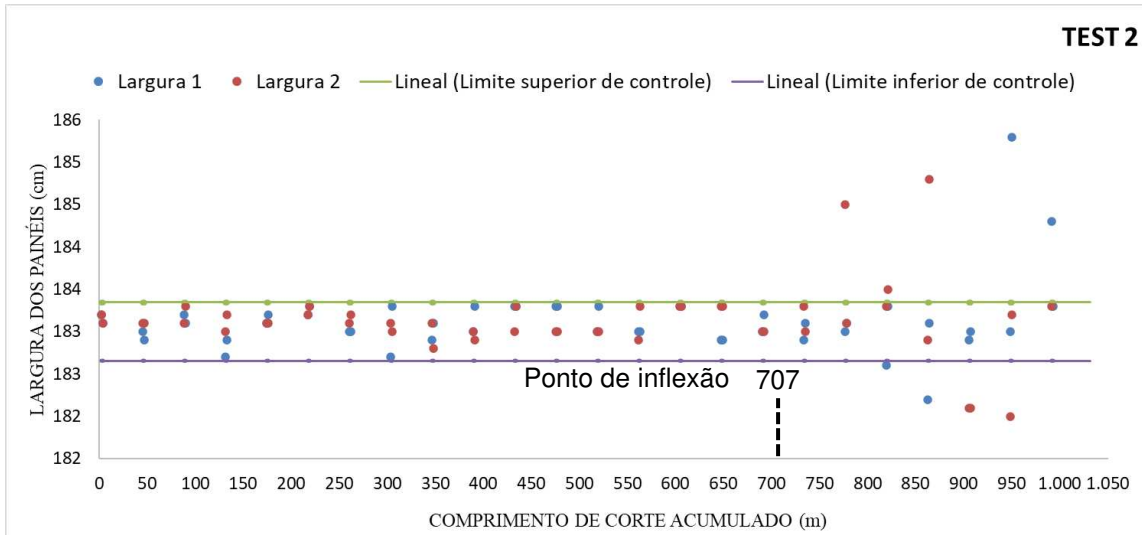
Podem ser observados nas Figuras 28, 29 e 30, os valores da largura dos painéis (largura 1 e largura 2) em função do comprimento de corte acumulado e como referência tem-se os limites de tolerância (limite superior de controle, limite inferior de controle) e a largura nominal. É evidenciado o aumento do número de registros fora dos limites de tolerância no final do gráfico, principalmente após o comprimento de corte acumulado de 800 m.

**Figura 27 - Largura dos painéis, comprimento de corte acumulado e limites de tolerância. Teste 1.**



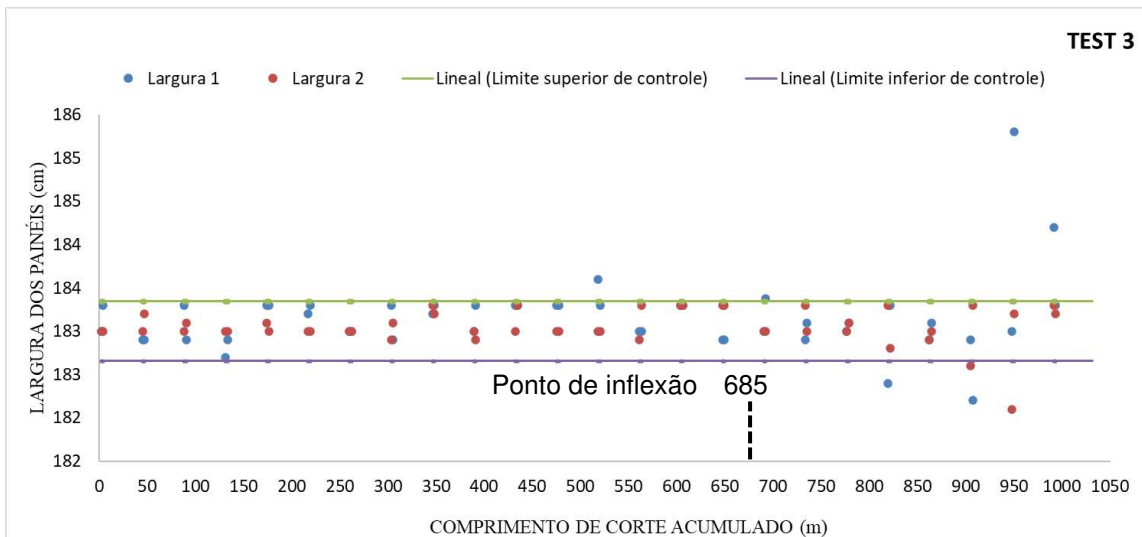
Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 28 - Largura dos painéis, comprimento de corte acumulado e limites de tolerância. Teste 2**



Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 29 - Largura dos painéis, comprimento de corte acumulado e limites de tolerância. Teste 3.**



Fonte: Autoria própria (2023).

Foi verificado que a porcentagem de registros fora da tolerância dimensional em relação ao ponto de inflexão calculado e para cada teste foi de apenas 3% antes do ponto de inflexão (Tabela 10), enquanto os 97% restantes permaneciam fora da tolerância dimensional após o ponto de inflexão (últimos metros cobertos pela ferramenta de corte).

**Tabela 10 - Porcentagem de registros fora da tolerância dimensional em relação ao ponto de inflexão calculado.**

<b>Registros fora da tolerância dimensional</b>	
Antes do ponto de inflexão em cada função	3%
Após o ponto de inflexão em cada função	97%
Registros totais	240

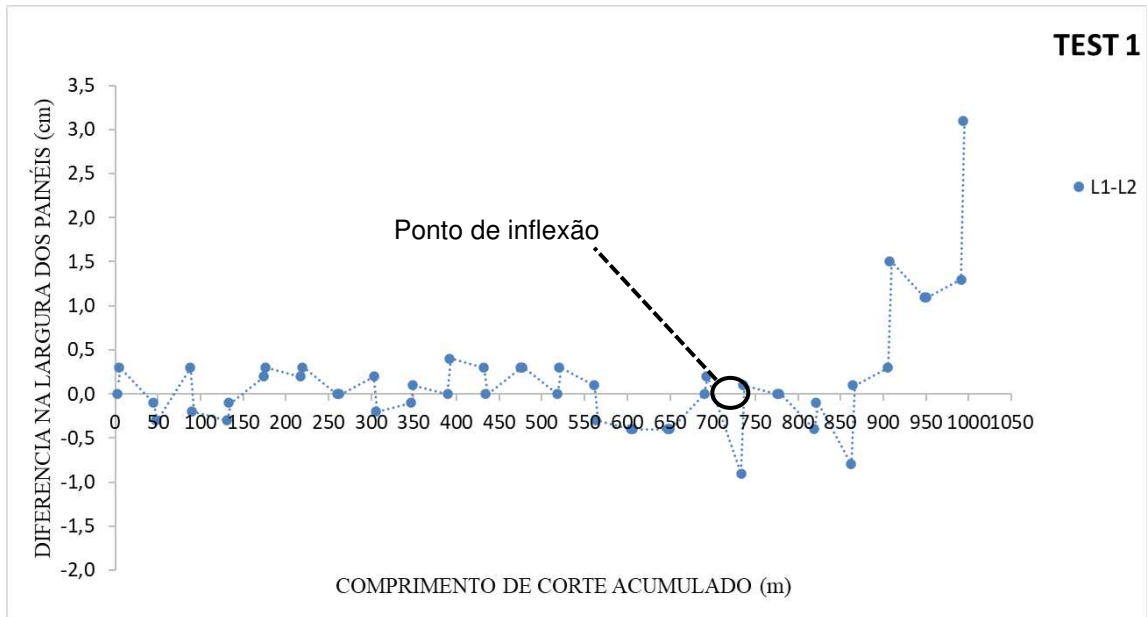
**Fonte: Autoria própria (2023).**

Observando as Figuras 31,32 e 33, pode-se apreciar como a diferença entre as dimensões da largura dos painéis é aumentada ao final do percurso das serras (próximo ao ponto de inflexão calculado) de maneira consistente nos três testes. Teoricamente, em um processo de usinagem isento de vibrações, essas diferenças devem ser zero. No entanto, a usinagem de materiais é invariavelmente acompanhada de vibrações entre a peça usinada e a ferramenta de corte. Como foi mencionado no estado da arte, as origens destas vibrações podem ser externas à máquina-ferramenta, por vibrações geradas pela própria usinagem, pela falta de homogeneidade da peça, vibrações de tipo regenerativas, como consequência do corte interrompido das serras e as vibrações causadas pela máquina-ferramenta (POLLI, 2005). Nesse caso, as vibrações são causadas pelo desgaste das ferramentas de corte, o que leva a progressivo aumento nas vibrações geradas pela própria usinagem.

Por estas razões, essas variações existem inevitavelmente e, para que o processo seja considerado controlado, devem ser minimizadas, uma dispersão menor no comprimento usinado, superfícies de boa qualidade relativa e um desgaste reduzido da ferramenta de corte; caso contrário, o processo de corte é considerado não controlado.

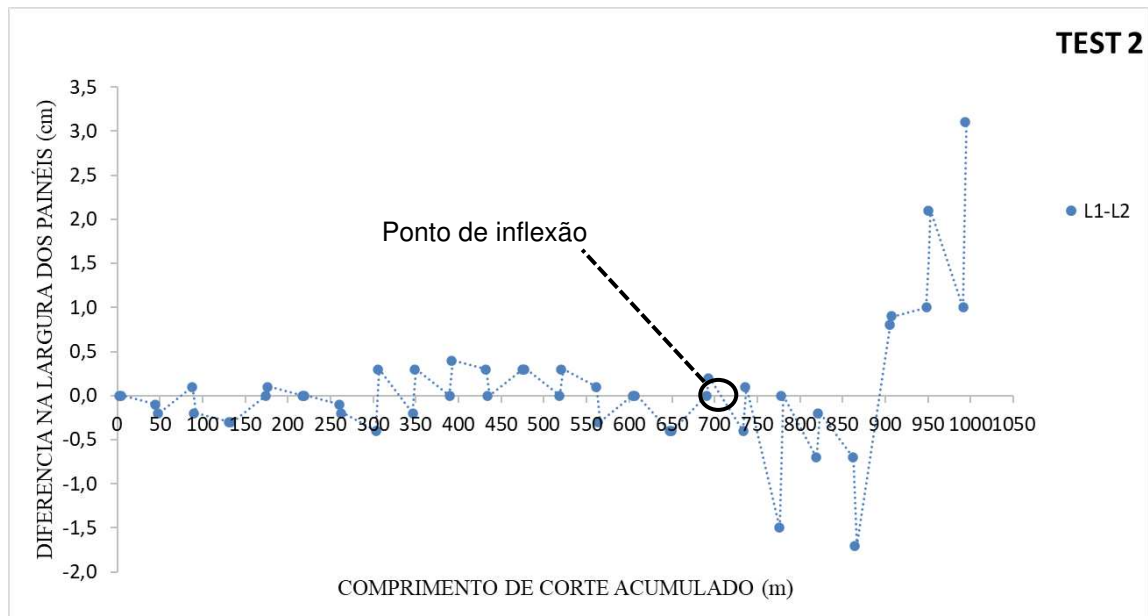


**Figura 30 - Diferença na largura dos painéis e comprimento de corte acumulado. Teste 1.**



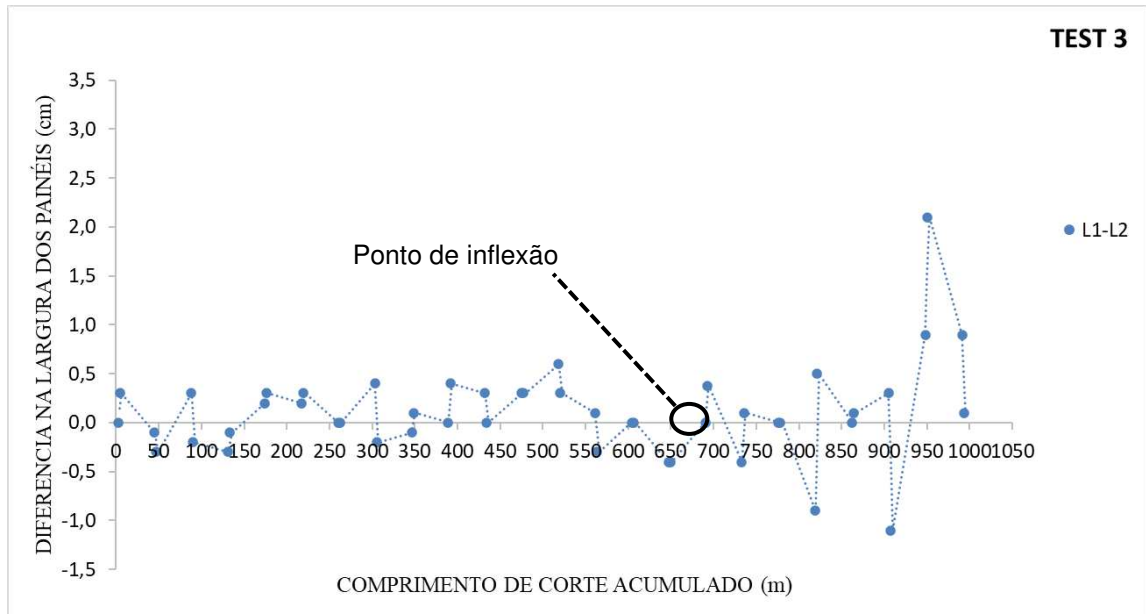
Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 31 - Diferença na largura dos painéis e distância de corte acumulada. Teste 2.**



Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 32 - Diferença na largura dos painéis e distância de corte acumulada. Teste 3.**



Quando as dimensões da largura em um mesmo painel começam a aumentar progressivamente no comprimento (Figura 33, 34 e 35), pode-se afirmar que as superfícies geradas pelos cortes perderam o paralelismo entre si, o que é uma situação desfavorável e, portanto, a qualidade da superfície pode ser um primeiro indicador de desgaste antes que os problemas dimensionais comecem a aparecer nos produtos.

Na continuação é apresentada a validação experimental do modelo desenvolvido para o processamento primário da madeira.

## 4.2 Etapa II: Validação do modelo

### 4.2.1 Consumo de energia no corte

Observa-se na tabela 11 da estatística descritiva da potência (kW) consumida pelas serras nos cortes da madeira em toras de forma acumulada em cada teste. Com uma amostra total por teste de 3.247 observações para os testes 1 e 2; 3.279 observações para os testes 3 e 4; e 3.363 observações para o teste 5. Observou-se importante dispersão do consumo de potência devido que a variável de resposta foi obtida em condições reais de produção na indústria (matéria-prima heterogênea, precisão na classificação nos diâmetros das toras, singularidades próprias da

madeira). O volume limite de madeira serrada produzida foi de 1.591 m<sup>3</sup> para o teste 1; 1.628 m<sup>3</sup> para o teste 2; 1.527 m<sup>3</sup> para o teste 3; 1.378 m<sup>3</sup> para o teste 4; e 1.339 m<sup>3</sup> para o teste 5. Cada teste correspondeu a 10 turnos de trabalho consecutivos com as serras sem afiar (aproximadamente 528 min totais disponível).

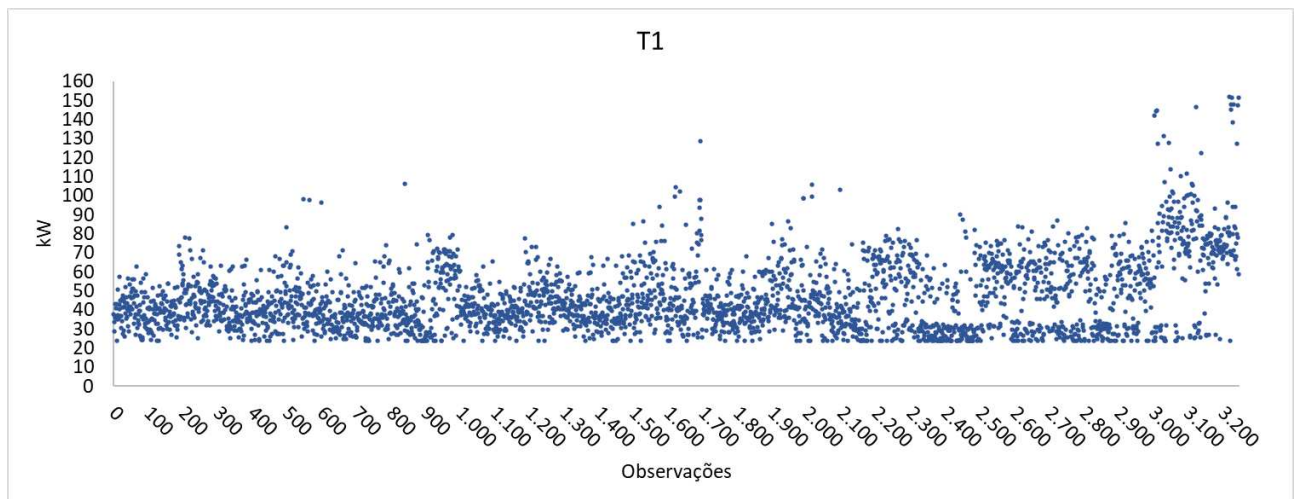
**Tabela 11 - Estatística descritiva do consumo de potência**

Consumo de potência (kw)	N	Min.	Max.	Média	Desvio padrão
Teste 1	3.247	24,01	152,15	46,06	17,91
Teste 2	3.247	24,01	162,43	51,50	18,45
Teste 3	3.279	24,01	156,95	53,81	18,87
Teste 4	3.279	24,01	120,08	53,65	16,49
Teste 5	3.363	24,01	146,66	46,23	17,89

**Fonte: Autoria própria (2023).**

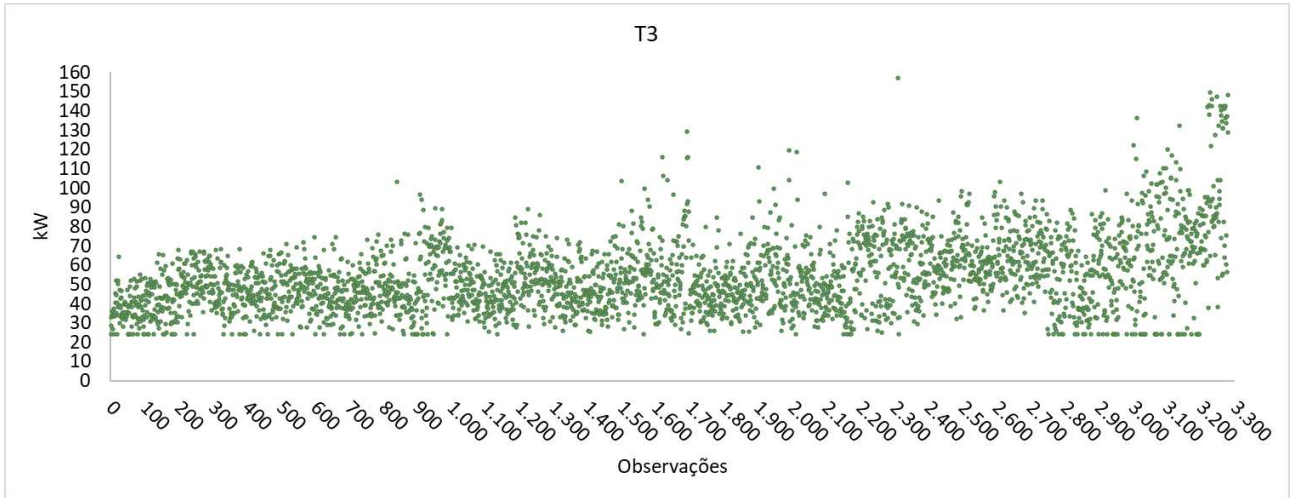
As Figuras 34, 35, 36, 37 e 38 mostram a tendência crescente do consumo de potência tanto na magnitude quanto na dispersão dos valores durante cada teste de corte, que é uma consequência do progresso do desgaste.

**Figura 33 – Consumo de potência no corte da madeira. Teste 1**



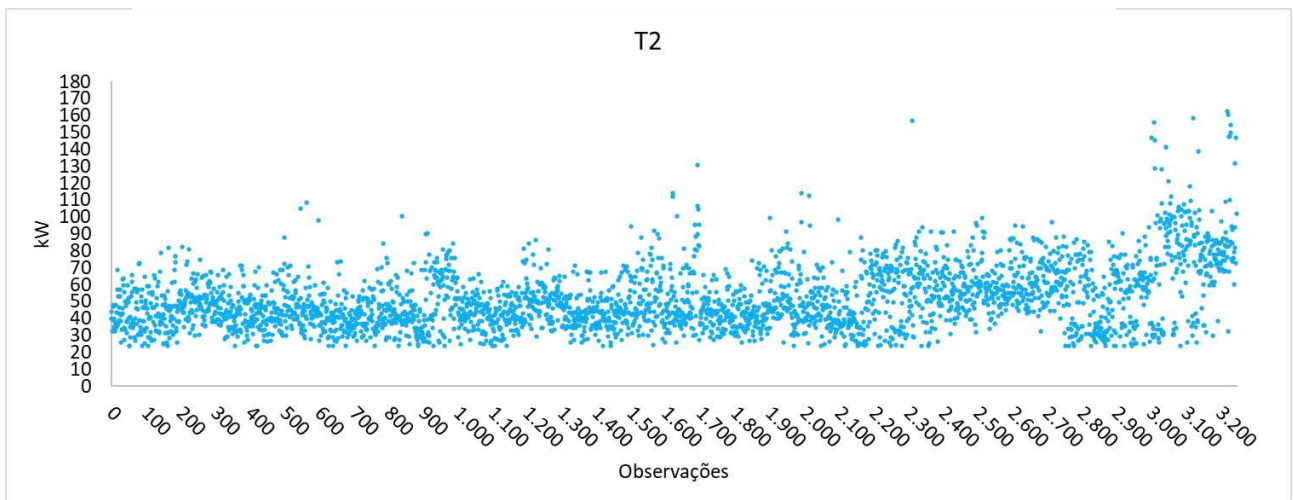
**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 34 - Consumo de potência no corte da madeira. Teste 2**



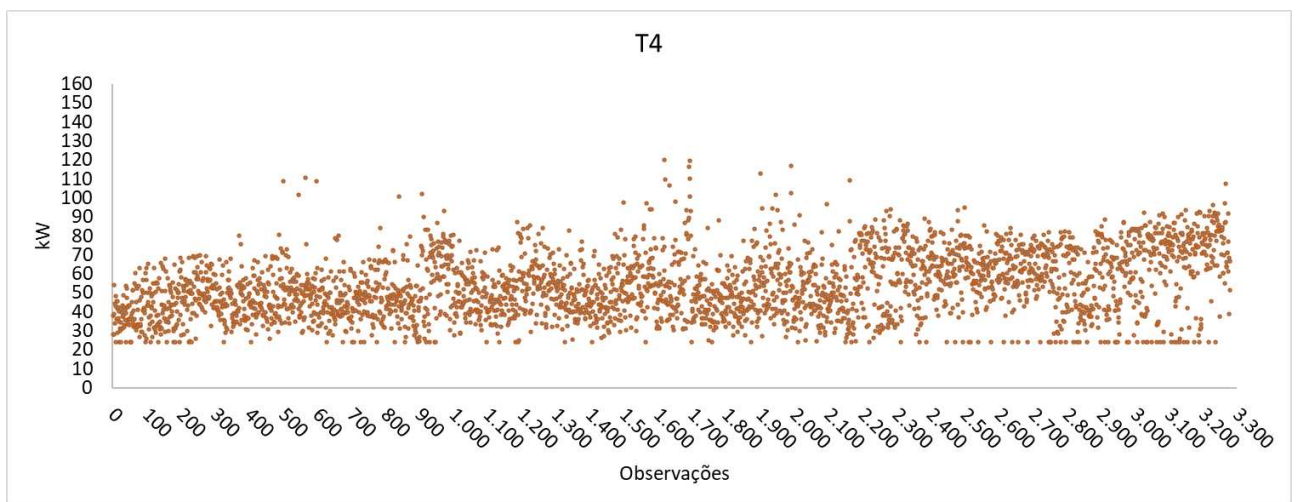
**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 35 - Consumo de potência no corte da madeira. Teste 3**



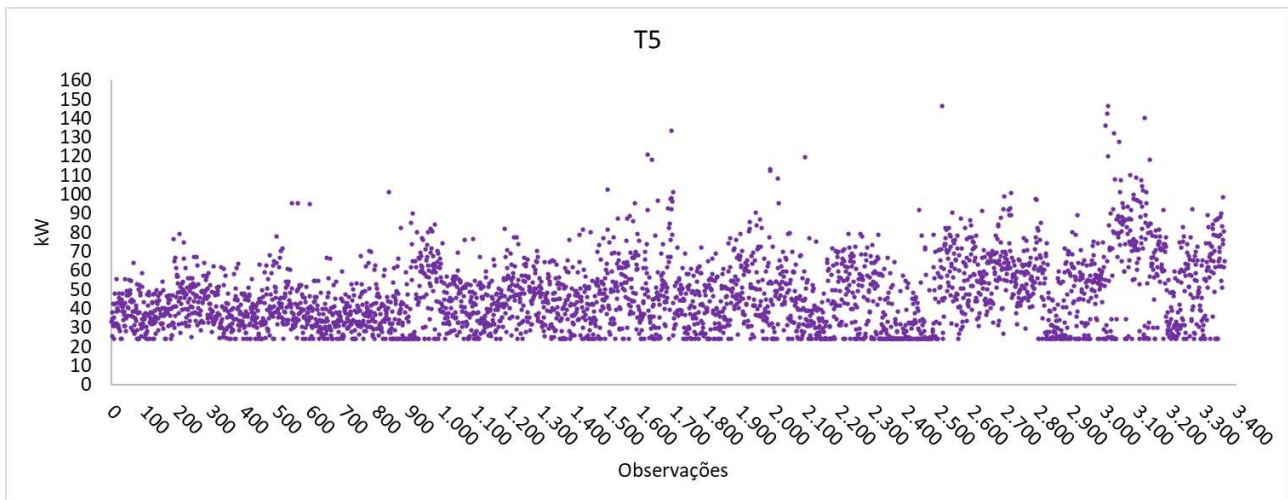
**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 36 - Consumo de potência no corte da madeira. Teste 4**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 37 - Consumo de potência no corte da madeira. Teste 5**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Ao analisar os dados do consumo de potência (kW) em cada teste de corte através de uma prova de hipóteses de diferença de médias (ANOVA), obtém-se que para uma amostra total de 16.414 observações, cada teste apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os dados com um nível de confiança de 95% (Tabela 12).

**Tabela 12 – Análise da variância (ANOVA) dos dados do consumo de potência (kW) nos testes**

	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>df</b>	<b>Média dos quadrados</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
Entre grupos	195.775,97	4	48.943,99	152,13	0,000
Dentro dos Grupos	5.279.548,20	16.410	321,73		
Total	5.475.324,17	16.414			

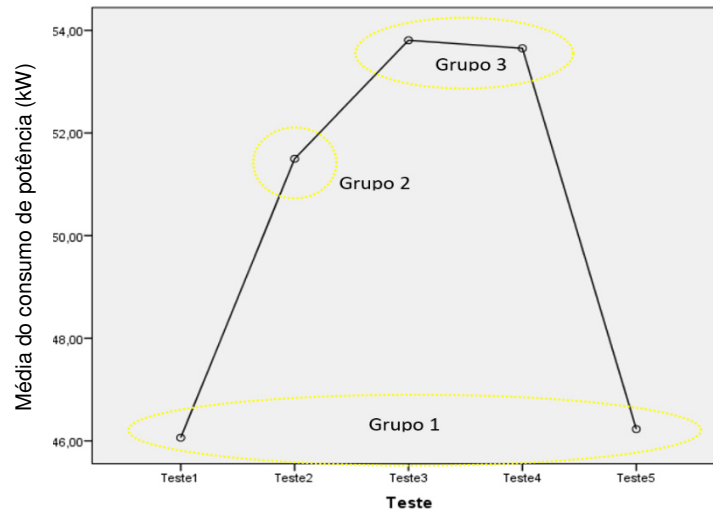
**Fonte: Autoria própria (2023).**

Realizando o teste paramétrico Post Hoc de Duncan, observou-se que os dados formaram 3 grupos diferentes: Grupo 1: Teste 1 e Teste 5; Grupo 2: Teste 2; e o Grupo 3: Teste 3 e Teste 4 (Tabela 13 e Figura 39). Isto implica que cada grupo apresentou resposta ao corte diferente entre eles, mas com comportamento similar entre os testes pertencente ao mesmo grupo. Isto quer dizer que cada teste demonstrou comportamento (tendência) similar devido ao desgaste, mas as magnitudes como valores absolutos foram diferentes entre os grupos, que pode ser atribuído a diferenças de categorias diamétricas processados em cada teste.

**Tabela 13 – Teste Duncan dos dados do consumo de potência (kW) nos testes**

Teste	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Teste1	3.247	46,06		
Teste5	3.363	46,23		
Teste2	3.247		51,50	
Teste4	3.279			53,65
Teste3	3.279			53,81
Sig.		0,71	1,00	0,72

Fonte: Autoria própria (2023).

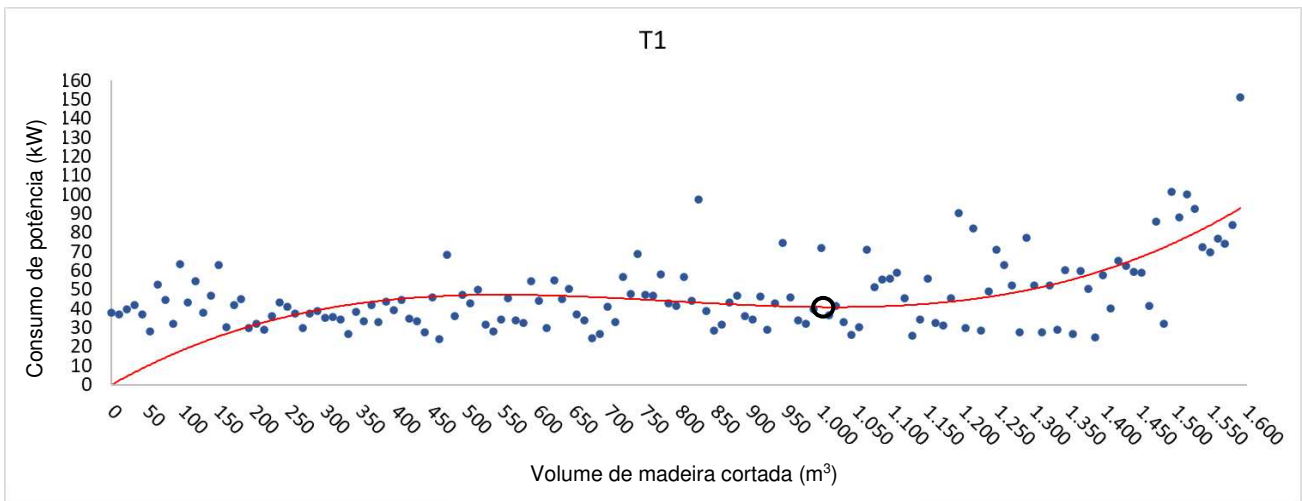
**Figura 38 – Comparativa das médias do consumo de potência no corte da madeira nos testes**

Fonte: Autoria própria (2023).

Esta informação cobra valiosa importância, já que evidencia que o comportamento do desgaste nos 5 testes apresentou mesmo comportamento independente da categoria diamétrica processada. Observando a Figura 39, pode inferir graficamente que os grupos estatisticamente iguais como o grupo 1 (teste 1 e teste 5), grupo 2 (teste 2) e o grupo 3 (teste 3 e 4) compreenderam toras com diâmetros similares entre se.

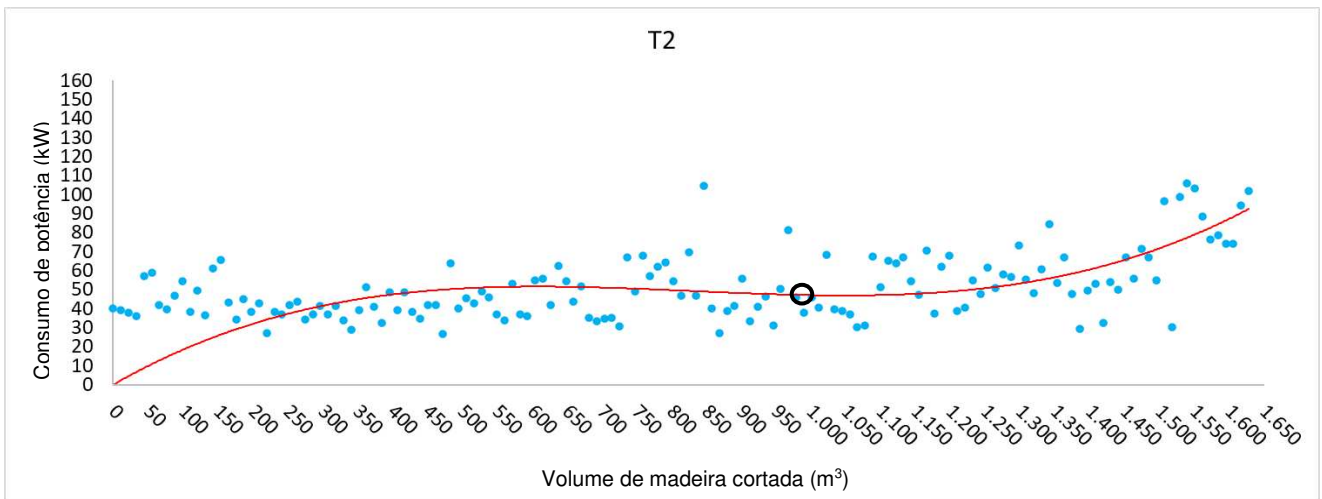
Observando as Figuras 40, 41, 42, 43 e 44 correspondentes ao consumo de potência versus o volume de madeira serrada, em cada teste se evidenciou tendência similar crescente e o comportamento foi modelado de forma não linear de acordo com o modelo matemático desenvolvido para o desgaste abrasivo no corte da madeira. Observou-se um primeiro estágio caracterizado por um aumento significativo com uma tendência quase-logarítmica, formando uma concavidade para baixo na função, posteriormente a curva vai mudando para um estágio de desaceleração da função com tendência quase-linear e com pendente reduzida, até atingir um estágio da função onde um aumento abrupto é observado com uma tendência quase-exponencial, onde a função muda de côncava a convexa.

**Figura 39 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 1.**



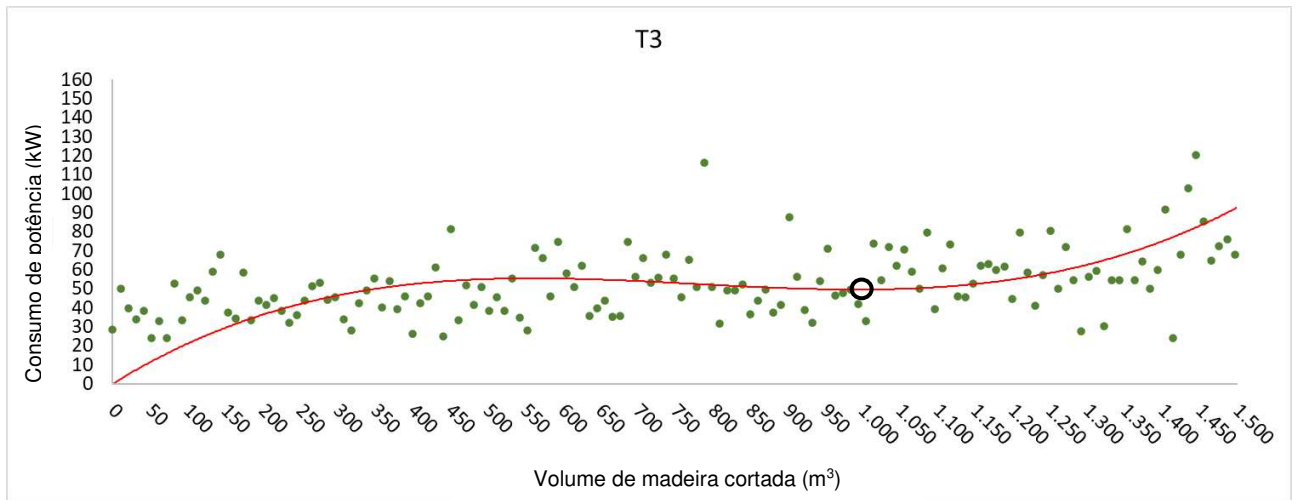
**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 40 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 2.**



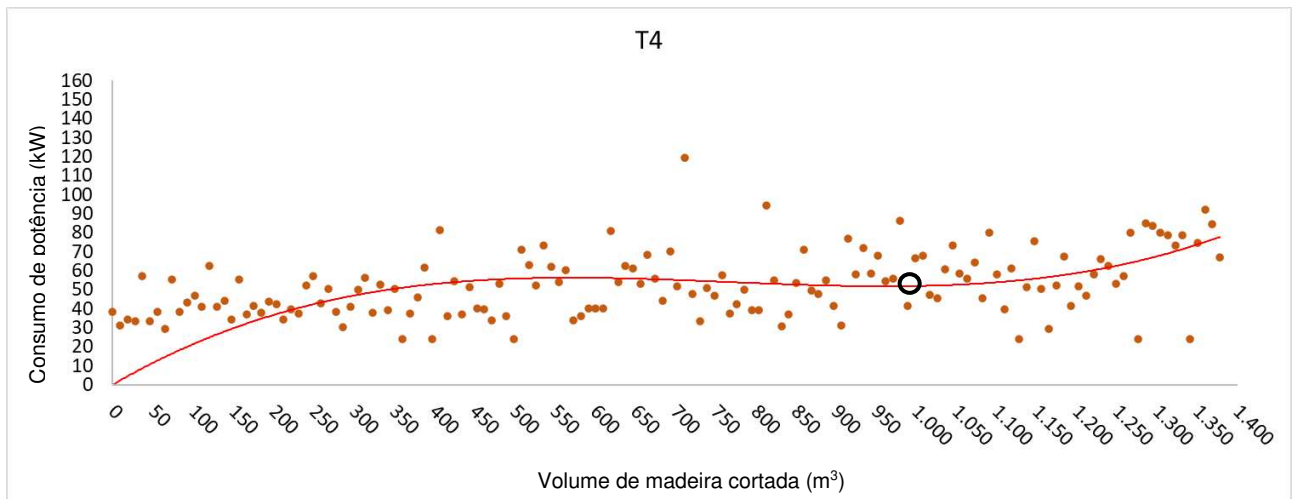
**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 41 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 3.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

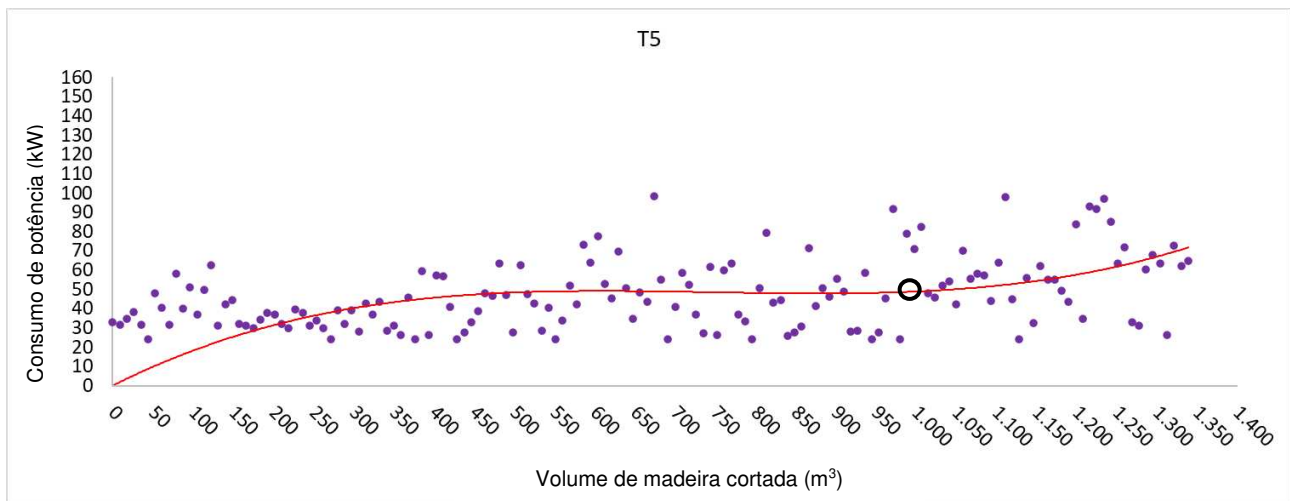
**Figura 42 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 4.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**



**Figura 43 - Modelamento não linear do consumo de potência e volume de madeira produzida versus o Limite de trabalho das serras estimado pela equação diferencial proposta para o Teste 5.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

A resposta do modelo desenvolvido mostra a determinação do ponto de inflexão calculado na função do desgaste, o que corresponde ao limite de trabalho das ferramentas de corte em cada teste. Nos cinco testes realizados com uma duração total de 10 turnos de trabalho contínuo sem afiar (ultrapassando intencionalmente o limite de trabalho das serras), alcançou-se um volume total acumulado de madeira serrada diferente em cada teste, devido a diferentes condições específicas de trabalho em cada turno (OEE, disponibilidade, performance, taxa de produção por hora de trabalho, toras processadas por minuto). Entretanto a resposta do modelo convergiu para o mesmo resultado nos cinco testes, ou seja, o ponto de inflexão calculado foi quando as serras atenderam aproximadamente os 1.000 m<sup>3</sup> de madeira serrada de forma acumulativa. Isto implica que apesar que as diferentes serras chegarem a quantidades total de madeira cortada diferentes entre si e em categoria diamétricas diferentes, o ponto do desgaste abrupto inicia quando ultrapassam os 1.000 m<sup>3</sup> de madeira cortada, o que para este modelo proposto deve ser considerado como o Limite de Trabalho das serras para novamente serem afiadas e corrigidas as arestas de corte de cada dente.

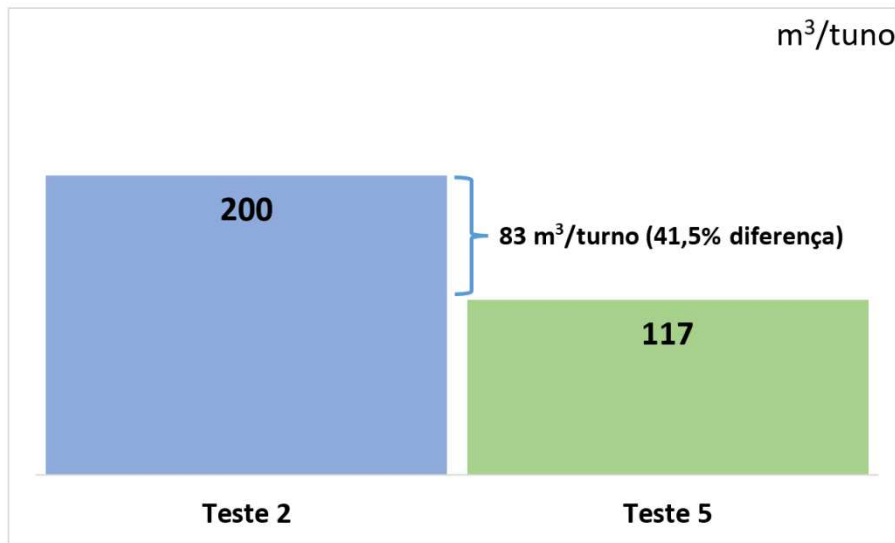
Comparando o Limite de trabalho de cada teste versus o tempo de trabalho das serras verifica-se que para o Teste 1 foram atingidos 1.000 m<sup>3</sup> logo de 5,5 turnos de trabalho contínuo (aproximadamente 44 horas de trabalho), o que traduz em uma produção média de 181 m<sup>3</sup>/turno equivalente a uma taxa de produção média de 22,7

m<sup>3</sup>/hora. O teste 2 alcançou 1.001 m<sup>3</sup> logo de cinco turnos de trabalho contínuo (aproximadamente 40 horas de trabalho), o que representa em uma produção média de 200 m<sup>3</sup>/turno equivalente a uma taxa de produção média de 25,0 m<sup>3</sup>/hora.

Neste sentido, o teste 3 alcançou 1.005 m<sup>3</sup> logo de 6,5 turnos de trabalho contínuo (aproximadamente 52 horas de trabalho), o que representa em uma produção média de 155 m<sup>3</sup>/turno equivalente a uma taxa de produção média de 19,3 m<sup>3</sup>/hora. O teste 4 alcançou 999 m<sup>3</sup> logo de 7 turnos de trabalho contínuo (aproximadamente 56 horas de trabalho), o que corresponde com uma produção média de 143 m<sup>3</sup>/turno equivalente a uma taxa de produção média de 17,9 m<sup>3</sup>/hora. Finalmente o teste 5 alcançou 998 m<sup>3</sup> logo de 8,5 turnos de trabalho contínuo (aproximadamente 68 horas de trabalho), o que representa em uma produção média de 117 m<sup>3</sup>/turno equivalente a uma taxa de produção média de 14,7 m<sup>3</sup>/hora.

Ao comparar os extremos, Teste 2 versus o Teste 5 (Figura 45), evidencia-se que se o Teste 2 teve uma produção média de 200 m<sup>3</sup>/turno e o Teste 5 teve uma produção média de 117 m<sup>3</sup>/turno, resulta em uma diferença de 83 m<sup>3</sup>/turno, equivalente a 41,5% de diferença para o mesmo tempo de operação, o seja, a serra utilizada no teste 2 trabalhou uma produção média 41,5% superior que a serra do teste 5 em um turno. Considerar o tempo de operação como metodologia de troca de serras em cada turno, é evidente o desbalanço no trabalho das serras. O limite de trabalho estimado para a serra do Teste 2 foi 1.001 m<sup>3</sup> em 40 horas de trabalho contínuo e o limite de trabalho estimado para a serra do Teste 5 foi 998 m<sup>3</sup> em 68 horas de trabalho contínuo, o seja, a serra do Teste 2 trabalhou 28 horas menos (aproximadamente 3,5 turnos) que a serra do Teste 5 para atender os mesmos 1.000 m<sup>3</sup> aproximados.

Figura 44- Comparativa da produção média por turno dos testes extremos. Teste 2 vs. Teste 5.



Fonte: Autoria própria (2023).

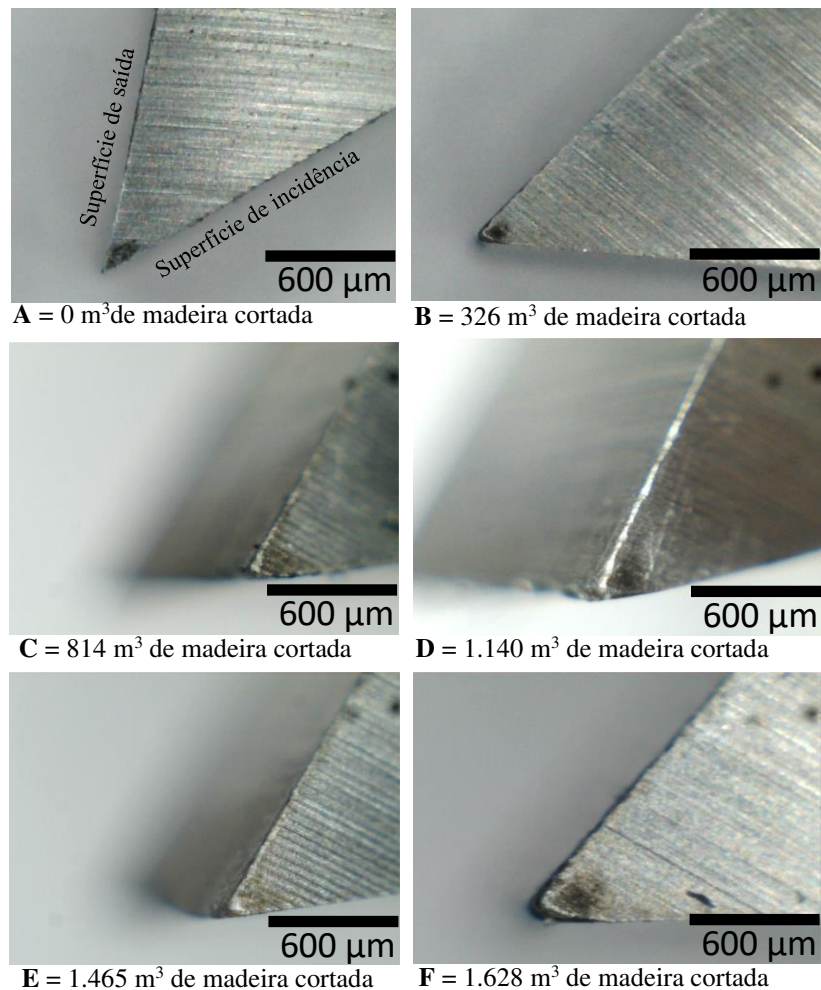
Esta informação corrobora que o indicador de turno de trabalho não é o melhor parâmetro a utilizar para definir o limite de trabalho das ferramentas de corte como também não é o melhor para definir o momento de afiar novamente as serras.

O modelo desenvolvido evidencia que o melhor parâmetro, sendo objetivo e adaptativo com as duras condições trabalho real e a variabilidade dos processos industriais é o trabalho realizado por cada ferramenta de corte, que pode estar representado pelo comprimento de corte ou pelo volume de madeira cortada.

#### 4.1.1. Desgaste nos gumes

Os resultados do desgaste foram caracterizados pela microscopia ótica até atingir os 528 min de trabalho total acumulado (até 1.628 m³ de madeira cortada). Na Figura 46 observa-se a evolução do desgaste de um dente de referência em função do volume de madeira cortada correspondente ao Teste 2. A Figura 46-A corresponde ao dente da serra antes de iniciar o trabalho, serra afiada (0 m³ de madeira cortada). Na Figura 46-B não houve desgaste perceptível. A partir da Figura 46-C (814 m³ de madeira cortada) foi possível mensurar o desgaste.

**Figura 45 – Comparação do desgaste da aresta versus o volume de madeira cortada. Serra referência do Teste 2.**



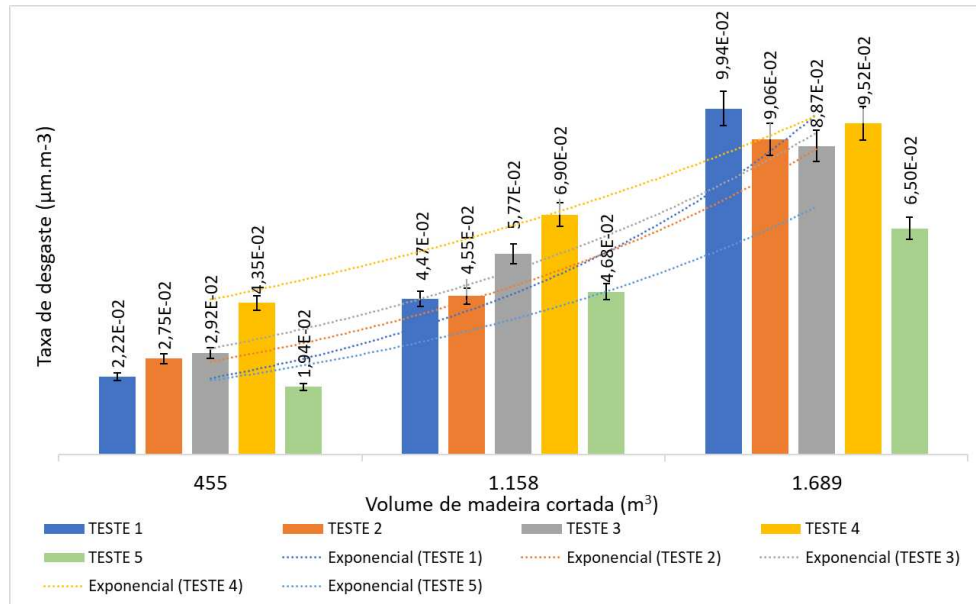
**Fonte: Autoria própria (2023).**

Comparando as figuras 46-C e 46-D, evidencia-se uma diferença de 7,25 µm como incremento de desgaste em um diferencial de produção de 326 m<sup>3</sup> de madeira cortada. Isto corresponde com uma taxa de desgaste de  $2,2 \times 10^{-2} \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ , ou seja,  $2,2 \times 10^{-2} \mu\text{m}$  de desgaste da aresta por cada m<sup>3</sup> de madeira cortada. Ao passar ao estágio de 46-D para 46-E se tem uma diferença de desgaste de 14,54 µm em um diferencial de produção de 325 m<sup>3</sup> de madeira cortada, que corresponde a uma taxa de desgaste de  $4,4 \times 10^{-2} \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ . Finalmente comparando o estágio compreendido entre as figuras 46-E e 46-F se tem uma diferencia de desgaste de 16,21 µm em um diferencial de produção de 163 m<sup>3</sup> de madeira cortada, o seja, uma taxa de desgaste de  $9,9 \times 10^{-2} \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ .

É evidente o incremento progressivo do desgaste por volume de madeira serrada (taxa de desgaste) nos cinco testes de forma consistente com tendência quase exponencial (Figura 47), o que corrobora o ponto de inflexão calculado de

acordo com o modelo proposto como o limite de trabalho ou vida útil das serras antes de afiar novamente.

**Figura 46 - Desgaste das serras vs. Volume de madeira cortada**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

Torkghashghaei *et al.* (2023), reportaram resultados de desgaste com tendência similar em testes desenvolvidos em condições industriais de produção em uma serraria de Quebec-Canadá. Demonstraram um primeiro estágio de desgaste acelerado e à medida que aumentava o trabalho das serras a largura da ponta aumentou significativamente desde os primeiros minutos de trabalho até 255 min e de forma exponencial até os 900 min.

Neste mesmo sentido, Torkghashghaei *et al.* (2023) evidenciaram de forma análoga com o reportado neste trabalho, um progresso do desgaste desde o dente afiado (0 min de trabalho) até os 255 min de trabalho (predominantemente desgaste abrasivo). Quando atingiu os 900 min de trabalho, observaram dentes com presença de gume lascado, o que evidencia que as serras ultrapassam o Limite de trabalho (ponto de inflexão) iniciando o estágio de desgaste catastrófico.

Cristóvão *et al.* (2013) afirmou que em sua pesquisa, o modelo linear teórico desenvolvido como preditor do consumo de energia nas serrarias, apresentou diferenças com a avaliação experimental e atribuiu essas diferenças à possível intervenção no corte dos limpadores nas serras (*wiper slots*), recuo no corte (*back sawing*), eficiência do motor e outras perdas entre a interação da ferramenta de corte

e a peça de trabalho, que não foram consideradas nesse estudo. É provável que, ao modificar a suposição de um desgaste linear por um modelo de desgaste não linear, como o utilizado neste estudo e de acordo com a teoria do desgaste abrasivo, permite-se obter uma melhor aproximação do modelo preditivo de consumo de energia nas serrarias.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados sobre o consumo de potência, as variações dimensionais, de qualidade superficial do corte e o trabalho de corte realizado pelas serras (comprimento de corte e/ou volume de madeira serrada), podem-se afirmar que:

- O modelo não linear desenvolvido apresentou uma confiabilidade de 97%, representado por uma função composta por um pseudo logaritmo e uma parte exponencial representando a curva Sigmoidal típica do desgaste abrasivo. O ponto de inflexão determinado foi aceitavelmente associado com a limite de trabalho ou vida útil das serras.
- Na avaliação do desgaste das serras em função do trabalho realizado (volume de madeira cortada) observou-se um incremento constante nos primeiros estágios de corte até alcançar uma etapa em donde o desgaste das arestas é magnificado com uma tendencia exponencial. A taxa de desgaste foi evoluindo de  $2,2 \times 10^{-2} \mu m. m^{-3}$  para  $4,4 \times 10^{-2} \mu m. m^{-3}$  até atingir  $9,9 \times 10^{-2} \mu m. m^{-3}$ .
- Tanto a qualidade superficial do corte como a estabilidade dimensional dos produtos cortados foram consideravelmente afetadas como consequência da ação progressiva do desgaste das serras. Com a determinação do ponto de inflexão e atribuição com a vida útil da ferramenta, conseguiu-se otimizar o uso das serras com uma probabilidade de 3% de aceitar peças com defeitos dimensionais como consequência do desgaste. Enquanto a qualidade superficial do corte, se conseguiu obter uma precisão de 100% de peças consideradas como aceitáveis (cortes retos, precisos e limpos sem levantamento de fibras, nem superfícies notavelmente queimadas).
- O algoritmo desenvolvido para a modelagem não lineal e determinação do ponto de inflexão através da EDO na função consumo de energia e percurso de corte ou volume de madeira cortada, ofereceu uma assistência importante na determinação da vida útil das ferramentas de corte em condições reais de produção industrial, já que permitiu mudar de uma metodologia tradicional e empírica de afiar as serras em cada troca de turno para uma metodologia objetiva em função do trabalho específico realizado pelas serras. A taxa de produção de madeira serrada por turno é variável de acordo com a natureza do processo industrial, atendendo em este caso até um 41,5% de diferença entre turnos. No

caso da madeira serrada, o momento de afiar as serras foi estimado em 1.000 m<sup>3</sup> de madeira cortada, o que em alguns testes foi atendido depois de 5 turnos de trabalho consecutivo e em outros testes foi depois dos 8,5 turnos de trabalho. Ao associar o valor do ponto de inflexão como o limite de trabalho das ferramentas de corte, é possível evitar todas as consequências negativas descritas num processo de usinagem não controlado. Este ponto de inflexão ou limite de trabalho da ferramenta, pode servir como um valor referencial, o que permite conhecer a proximidade da fronteira de um processo de corte controlado.

Em virtude das etapas anteriores alcançadas, os resultados obtidos e o grande interesse apresentado pelas indústrias madeireiras visitadas, pode-se afirmar que a proposta desenvolvida é factível de implantação. Portanto, foram cobertas as expectativas iniciais enquanto a contribuição científico-acadêmica, bem como o aporte prático para as indústrias e a hipótese de pesquisa.

Como sugestões de trabalhos futuros recomenda-se:

- Desenvolver um estudo que integre o modelo apresentado com um modelo preditivo estruturado por redes neurais artificiais e enfoque de *Deep Learning* no corte da madeira.
- Analisar a perda de laminação no corpo das serras de fita e o volume de madeira cortada como parte do desgaste por fadiga que experimentam as ferramentas no corte na madeira.
- Estudar a correlação entre as vibrações nas serras de fita, as emissões acústicas e a temperatura do corte em função do desgaste no corte da madeira.



## 6 REFERÊNCIAS

AGUILERA, A.; MARTIN, P. Machining qualification of solid wood of *Fagus sylvatica* L., and *Picea excels* L., cutting forces, power requirements and surface roughness. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 59(6), p. 483-488, 2001.

ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS DE BASE FLORESTAL (APRE). Estudo setorial 2022. Disponível em: <http://www.apreflorestas.com.br/> Acesso em: 18 novembro 2022.

BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; LOUZADA, J.L.P.C; RODRIGUES, J.C.; ASTOLPHI, J.R.S. Pilot study for MDF manufacture from sugarcane bagasse. *Holz als Roh- und Werkstoff (Print) / European Journal of Wood and Wood Products (Print)*. v.70, p.537 - 539, 2012.

BOULOS, P.; ABUD, Z. I. Cálculo diferencial e integral. Volume 2. Pearson Education do Brasil. Brasil. 2012.

BROWN. T. D. Quality control in lumber manufactory. Ed. Miller Freeman Publications. EUA. 1982.

CARDILLO, J.; CHACÓN, E.; CHACÓN, R. Janus Methodology: Integrated automation in industry 4.0, an approach for the digital transformation of enterprise. *Revista Ciencia e Ingeniería*. 43(1), p. 23-32, 2022.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. Numerical methods for engineers. 7th Edition. McGraw-Hill. EEUU. 2015.

CHAUHAN, M. A study of increase tool life of milling machine using dynamic milling. *IJARIE*, 3(2), p. 5336- 5343, 2017.

COSTES, J.; LARRICQ, P. Towards high cutting speed in wood milling. *Annals of Forest Science*, v. 59, p. 857-865, 2002.

CRISTÓVÃO, L. Machining properties of wood tool wear, cutting force and tensioning of blades. Doctoral Thesis. Lulea University, Sweden, 2013.

CRISTÓVÃO, L.; EKEVAD, M.; GRÖNLUND, A. Industrial sawing of *Pinus sylvestris* L.: Power consumption. *BioResources* 8(4), 6044-6053, 2013.

DHATTERWAL, J.; KASWAN, K.; OJHA, R. (2022). The Role of Multiagent System in Industry 4.0. In *A Roadmap for Enabling Industry 4.0 by Artificial Intelligence*. Chapter 13. 2022. <https://doi.org/10.1002/9781119905141.ch13>

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da Usinagem dos Materiais. Art Líber Ltda. 6ª Ed., São Paulo. 2008.

DJURKOVIĆ, M.; MILOSAVLJEVIĆ, M.; MIHAILOVIĆ, V.; DANON, G. Tool wear impacts on cutting power and surface quality in peripheral wood milling. *International Journal - Wood, Design & Technology*, 8(1), 9-17, 2019.

FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Ed. Eddgard Blucher, São Paulo, 2003.

FRANZ, N. C. *An analysis of the wood cutting process*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. 1958.

CARDOSO, F. *Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil. 2004.

FUENMAYOR, C.; DA SILVA, D.; KLOCK, U.; LENGOWSKI, E.; DE ANDRADE, A.; BONFATTI, E.; TREJO, J.; NUNES, Y.; PALMA, O.; DECADEMARTORI, P.; DE MUNIZ, G. Tribological behavior of cellulose nanostructured films. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 10(2022). 2022.

GHOSH, S. C.; HERNÁNDEZ, R. E.; BLAIS, C. Effect of knife wear on surface quality of Black Spruce cants produced by a Chipper-Canter. *Wood and Fiber Science*, 47(4), p. 1-10, 2015.

GÜNTEKIN, E.; AYDIN, T. Y.; NIEMZ, P. Prediction of compression properties in three orthotropic directions for some important Turkish wood species using ultrasound. *BioResources* 10(4), 7252-7262, 2015.

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ARVORES (IBA). *Relatório anual 2022*. Disponível em: [www.iba.org](http://www.iba.org) Acesso em: 20 novembro 2022.

JUNAC. *Junta del Acuerdo de Cartagena. Manual del Grupo Andino para el aserrío y afilado de sierras de cintas y sierras circulares*. Perú. 1989.

KIVIMAA, E. *Cutting force in woodworking*. Publ. Nº 18. Finland's Institute of Technology. 1950.

KOCH, P. *Wood machining process*. Ronald Press Co, New York. 1964.

KOVÁČ, J.; and MIKLEŠ, M. Research on individual parameters for cutting power of woodcutting process by circular saws. *Journal of Forest Science*, 56(6), p. 271-277, 2010.

LARA, A. P. *Análise das vibrações no processo de torneamento interno da liga de alumínio 6351-T6*. (Dissertação de Mestrado) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil. 2017.

LOPES, C. S.; NOLASCO, A. M.; FILHO, M. T.; DIAS, T. S. Avaliação da rugosidade superficial da madeira de *Eucalyptus* sp submetida ao fresamento periférico. *Cerne*, v. 20, n. 3, p. 471-476, 2014.

LUNDAHL, C. *Optimized Processes in Sawmills*. (Dissertação de Mestrado). Luleå University of Technology. Sweden. 2007.

LUNDAHL, C. *Total Quality Management in Sawmills*. (Tese de Doutorado). Luleå University of Technology. Sweden. 2009.

MARTINS, H.; MARTINS, J. L. *Elementos de cálculo diferencial e integral*. Ouro Preto: UFOP. Brasil. 2014.

MARTINS, M.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; GONÇALVES, M. T. T.; FILIPE, A. P. Simulação em uso dos pisos de madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia maculata*. *Cerne*, v. 19, n. 1, p. 151-156, 2013.

MARTINS, S. A.; FERRAZ, J. M.; SANTOS, C. M. T.; MENEZZI, C. H. S. D.; SOUZA, M. R. Efeito da usinagem na rugosidade da superfície da madeira de *Eucalyptus benthamii*. *Floram*, v. 18, n. 2, p. 135-143, 2011.

MCKENZIE, W. M. *Fundamental analysis of the wood cutting process*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI. 1961.

MEULENBERG, V.; EKEVAD, M.; SVENSSON, M.; AND BROMAN, O. Minor cutting edge force contribution in wood band sawing. *Journal of Wood Science*, v. 68, n. 18, 2022. DOI: 10.1186/s10086-022-02023-8

NASIR, V.; COOL, J. A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process. *Wood Material Science & Engineering*. 2018. DOI: 10.1080/17480272.2018.1465465

NASIR, V.; MOHAMMADPANA, A.; COOL, J. The effect of rotation speed on the power consumption and cutting accuracy of guided circular saw: Experimental measurement and analysis of saw critical and flutter speeds. *Wood Material Science & Engineering*. 2018. DOI: 10.1080/17480272.2018.1508167

NAYLOR, A.; HACKNEY, P. A review of wood machining literature with a special focus on sawing. *BioResources*, v. 2, n. 8, p. 3122-3135, 2013.

NICHOLAS, J. *The second derivative and points of inflection*. Mathematics Learning Centre. University of Sydney. Australia. 2004.

NININ, L. *Manual de Aserrado y afilado*. Primera Edición. Universidad de Los Andes. Venezuela. 1986.

OPAZO, A.; BENEDETTI, F.; SALINAS, A.; ALARCON, S. Experimental study of material damping of dimensional lumber for cross laminated panels. II Congreso Latinoamericano de estructuras con madera. T3-24, 2017.

ORLOWSKI, K.; OCHRYMIUK, T.; ATKINS, A.; AND CHUCHALA, D. Application of fracture mechanics for energetic effects predictions while wood sawing. *Wood Science and Technology*, 47(5), p. 949-963, 2013.

ORLOWSKI, K. A.; OCHRYMIUK, T.; ATKINS, A. An innovative approach to the forecasting of energetic effects while wood sawing. *DRVNA INDUSTRIJA* 65(4), p. 273-281, 2014.

ORLOWSKI, K. A.; OCHRYMIUK, T.; SANDAK, J; SANDAK, A. Estimation of fracture toughness and shear yield stress of orthotropic materials in cutting with rotating tools. *Engineering Fracture Mechanics* 178(2017), p. 433-444, 2017.

ORLOWSKI, K.; CHUCHALA, D.; SZCZEPANSKI, M.; MIGDA, W.; WOJNICZ, W.; SANDAK, J. Lateral forces determine dimensional accuracy of the narrow-kerf sawing of wood. *Scientific Reports* 12:86 (2022).

PÉREZ, M. *Tribología Integral*. México. Editorial Limusa. 2011.

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. *Métodos numéricos aplicados. Rotinas em C++*. 3era Edição. Bookman. Brasil. 2011.

POLLI, M. Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte. (Tese de doutorado) Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil. 2005.

RUTHES, H. C.; RESENDE, F. J.; ZANINI, L. S.; DE MOURA, V. B.; NASCIMENTO, F.; FRAGA, I. F.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO, F. A. Influence of moisture content on physical and mechanical properties of *Vatairea SP.* wood. *Árvore*;46:e4606, 2022. Doi.org/10.1590/1806-908820220000006

SALES, C. *La scie à ruban. Théorie et pratiqué du sciage des bois en grumes*. Centre Technique Forestier Tropical. Département du CIRAD. France. 1990.

SILVA, J. R. M; MARTINS, M.; OLIVEIRA, G. M. V.; BRAGA, P. P. B. Parâmetros de qualidade da usinagem para determinação dos diferentes usos da madeira de Eucalyptus. *Cerne*, v. 15, n. 1, p. 75-83, 2009.

SILVA, F. A.; SILVA, J. R.; MOULIN, J. C.; NOBRE, R. C.; ANRADE, A. C.; CASTRO, J. P. Qualidade da superfície usinada em pisos de madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus*. *Floresta*, v. 46, n. 3, p. 397-403, 2016.

SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F. Usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* em diferentes regiões da medula à casca. *Cerne*, v. 13, n. 1, p. 25-31, 2007.

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte II. 4a Ed. Editora da UFSC, Santa Catarina. 2008.

ŠUSTEK, J.; SIKLIENKA, M. Effect of saw blade overlap setting on the cutting wedge wear. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 54(1): p. 73-79, 2012.

SVRZIC, S.; DANON, G. The comparative analysis of two methods for the power consumption measurement in circular saw cutting of laminated particleboard. *Wood Research*, 60(1): p. 125-136, 2015.

TORKGHASHGHA EI, M.; SHAFFER, W.; UGULINO, B.; GEORGES, R.; HERNÁNDEZ, R.; BLAIS, C. Improvement of the Wear Resistance of Circular Saws Used in the First Transformation of Wood through the Utilization of Variable Engineered Micro-Geometry Performed on PVD-Coated WC-Co Tips. *Appl. Sci.* 2022, 12, 12213. <https://doi.org/10.3390/app122312213>

TORKGHASHGHA EI, M.; SHAFFER, W.; GEORGES, R.; UGULINO, B.; HERNÁNDEZ, R.; BLAIS, C. Effect of variable engineered micro-geometry of the cutting edges of circular saws on the surface quality of SPF boards. *Eur. J. Wood Prod.* 2023. [Doi.org/10.1007/s00107-023-01961-4](https://doi.org/10.1007/s00107-023-01961-4).

TORKGHASHGHA EI, M.; SHAFFER, W.; UGULINO, B.; GEORGES, R.; HERNÁNDEZ, R. Improved life of circular saws used in primary wood processing. *BioResources* 18(1), 2024-2044. 2023.

TREJO, J.; NININ, P.; NININ, F.; ARAQUE, H. Incremento de la productividad en el aserrado de maderas como resultado de la calidad del filo de sierras de cinta. *Revista Forestal Venezolana*. v. 59, pp. 47-61. 2015. Disponível em: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/43581> Acesso em: 22 maio 2019.

TREJO, J.; TOLOSA, R.; NININ, P.; BLOEM, C.; GIL, R. La ingeniería de materiales. Síntesis documental aplicada al procesamiento primario de la madera con énfasis en las sierras de cintas. *Revista Forestal Latinoamérica*. v. Único, n 27. 157-191. 2012. Disponível em: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/44937> Acesso em: 12 dezembro 2018.

TREJO, J.; KOZLOWISKI, H. B.; DE CARVALHO, M. A. Troca de ferramentas e redução do aquecimento em serras circulares na serraria de madeira sob a abordagem da Teoria da Resolução Inventiva de Problemas (TRIZ). *Anais do VIII*

Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção CONBREPRO 2018. Disponível em: [aprepro.org.br/conbrepro/2018/down.php?id=5118&q=1](http://aprepro.org.br/conbrepro/2018/down.php?id=5118&q=1)

TREJO, J.; POLLI, M.; DA ROCHA, M.; TORRES, A.; BELINI, U.; NININ, P. Working limit of the circular saws in the cutting of High Density Fiberboard (HDF) through a nonlinear model and differential equations. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2020. Doi.org/10.1007/s00107-020-01596-9

TREJO, J.; TOLOSA, R.; RUIZ, N.; NININ, P.; FUENMAYOR, C.; ZAMBRANO, M.; PALMA, O.; NUNES, Y. Comparative study of the main properties associated with thin layers of coatings with the cobalt-chromium-tungsten alloy (stellite) and hard chromium plating used as reinforcements for wood sawing. *Mechanics of Materials*. 2021. Doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103637

WANG, Y. Finite element analysis of the effects of the Cu:CNx nano-composite multilayer coating onto the improvement of cutting tool life. (Dissertação de Mestrado). Royal Institute of Technology, Stockholm - Sweden. 2021.

WILLISTON, E. M. *Lumber manufacturing: the design and operation of sawmills and planer mills*. Ed. Miller Freeman Publications. 1988.

**APÊNDICE A - Algoritmo desenvolvido para o modelo não linear para o controle adaptativo**

### Algoritmo:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% MODELO DE OTIMIZAÇÃO NÃO-LINEAR E EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA ...
%%% O PONTO DE INFLEXÃO DA FUNÇÃO
%%% Desenvolvido por: Jhonattan Trejo
%%% Data da última adaptação: 05/11/2021
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all;
close all

% Importando o arquivo do Excel%

filename='Dados_Julio2019.xlsx';
[valores]= xlsread(filename);

%% Dados de Entrada
% Teste 1
REP1=zeros(481,2);
REP1(:,1)=valores(1:481,2);
REP1(:,2)=valores(1:481,7);
Xa=REP1(:,1);
Ya=REP1(:,2);

% Teste 2
REP2=zeros(481,2);
REP2(:,1)=valores(1:481,10);
REP2(:,2)=valores(1:481,15);
Xb=REP2(:,1);
Yb=REP2(:,2);

% Teste 3
REP3=zeros(481,2);
REP3(:,1)=valores(1:481,18);
REP3(:,2)=valores(1:481,23);
Xc=REP3(:,1);
Yc=REP3(:,2);

%% Ajuste da curva à um polinômio de otimização %
X=linspace(0,1035,5000);
f1=@(b,Xa) exp(b(3).*Xa.^3)+b(1)*Xa./(b(2)+Xa);
b0=[5,1,5E-9];
af=nlinfit(Xa,Ya,f1,b0);
g1=@(Xa) f1(af,Xa);
%%
f2=@(b,Xb) exp(b(3).*Xb.^3)+b(1)*Xb./(b(2)+Xb);
af=nlinfit(Xb,Yb,f2,b0);
g2=@(Xb) f2(af,Xb);
%%
f3=@(b,Xc) exp(b(3).*Xc.^3)+b(1)*Xc./(b(2)+Xc);
af=nlinfit(Xc,Yc,f3,b0);
g3=@(Xc) f3(af,Xc);

%% Preparando a plotagem dos gráficos
subplot(2,1,1);
plot(REP1(:,1),REP1(:,2),'ro', ...
      REP2(:,1),REP2(:,2),'go', ...
      REP3(:,1),REP3(:,2),'bo', ...

```



```

        'LineWidth',2,'MarkerSize',4)
xlabel('Accumulated cutting distance (m)')
ylabel('Power consumption (kW)')
legend('Test 1','Test 2','Test 3','Location','northwest')
title('Results')
axis([0,1050,0,55])
subplot(2,1,2);
plot(REP1(:,1),REP1(:,2),'ro', ...
      REP2(:,1),REP2(:,2),'go', ...
      REP3(:,1),REP3(:,2),'bo', ...
      'LineWidth',1,'MarkerSize',4)
hold on
plot(X,g1(X),'r-',X,g2(X),'g-',X,g3(X),'b-', ...
      'LineWidth',2,'MarkerSize',4)
xlabel('Accumulated cutting distance (m)')
ylabel('Power consumption (kW)')
legend('Test 1','Test 2','Test 3','Location','northwest')
title('Adjustment of curve')
hold off
axis([0,1050,0,55])

% Encontrando o ponto crítico através de equações diferenciais
% e impressão dos Resultados
syms X
disp(['O polinômio de otimização TESTE 1'])
TEST1=matlabFunction( g1(X) )
D1=matlabFunction( diff(g1(X),2) );
disp(['O limite de trabalho da ferramenta de corte é [m]:'])
r1=solve(D1)

disp(['O polinômio de otimização TESTE 2'])
TEST2=matlabFunction( g2(X) )
D2=matlabFunction( diff(g2(X),2) );
disp(['O limite de trabalho da ferramenta de corte é [m]:'])
r2=solve(D2)

disp(['O polinômio de otimização TESTE 2'])
TEST3=matlabFunction( g3(X) )
D3=matlabFunction( diff(g3(X),2) );
disp(['O limite de trabalho da ferramenta de corte é [m]:'])
r3=solve(D3)

```

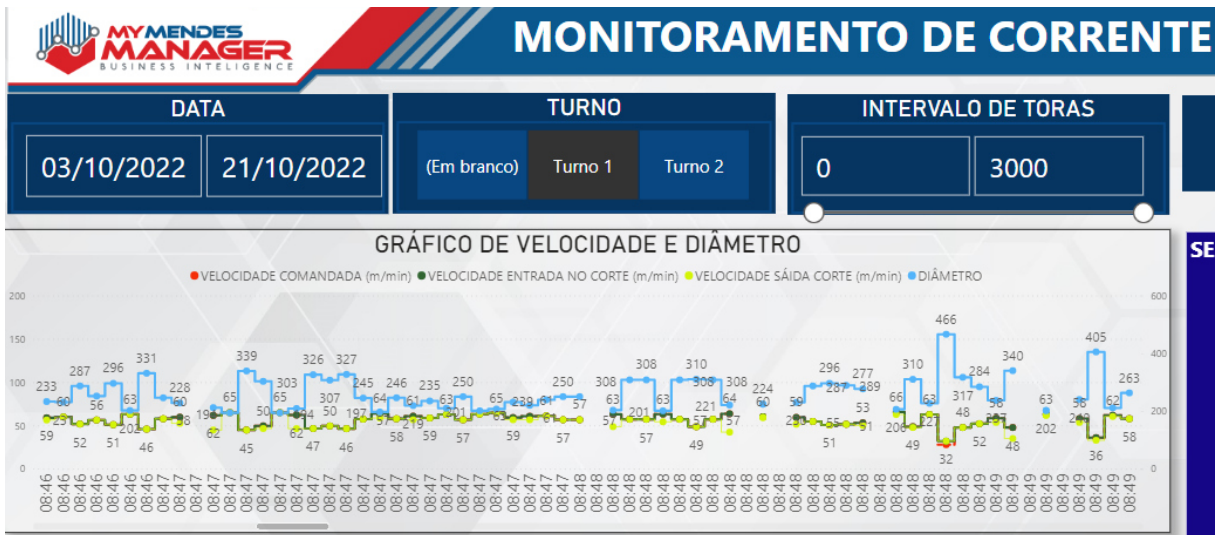
**APÊNDICE B - Aplicação do modelo desenvolvido na indústria madeireira brasileira**

### Consumo de energia vs. desgaste no corte da madeira

De acordo dos resultados obtidos e apresentados nas Etapa I e II deste trabalho, a empresa que forneceu apoio para a coleta de dados em conjunto com o fabricante das maquinarias instaladas, aplicaram no sistema supervisorio parte do modelo proposto. Foi desenvolvida uma tela de controle em tempo real disponível em diversos aplicativos com o apoio das ferramentas do Microsoft Power BI (Figura 51 e 52), o consumo de energia no corte de cada tora durante os turnos de trabalho, atribuindo-lhe um número de identificação a cada tora (*ID tracking*) relacionando o diâmetro da tora identificada, a velocidade de avanço no momento do corte, o consumo de energia de cada serra durante toda a linha de forma acumulativa com todas as toras processadas durante o turno.

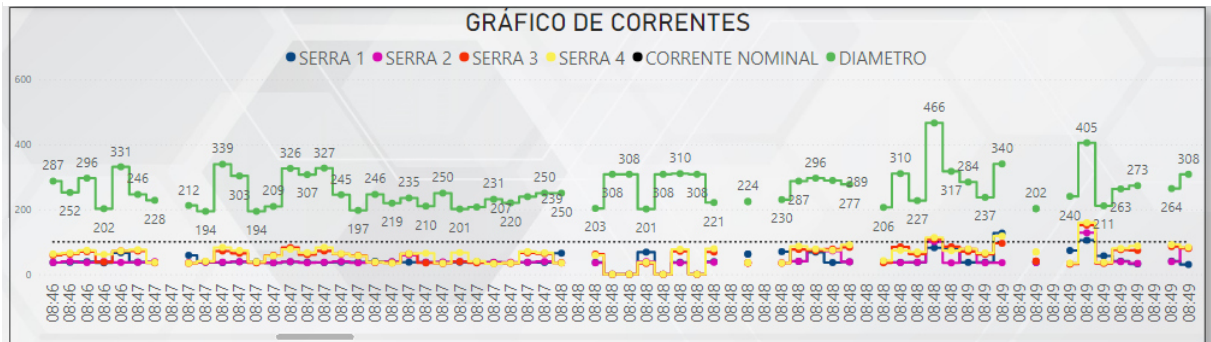
Com esta informação é possível monitorar o avanço do desgaste de cada serra, e realizar um diagnóstico a posteriori de qualquer quebra de serra acontecida durante o turno, para entender as causas e tomar medidas corretivas efetivas de forma mais precisa e ágil.

**Figura 47 - Supervisorio de seguimento e controle do consumo de corrente no corte aplicado na indústria.**



Fonte: Cortesia de Mendes Máquinas e Todesmade Ltda. (2023).

**Figura 48 - Supervisório aplicado na indústria para o monitoramento do consumo de corrente por cada serra.**



**Fonte: Cortesia de Mendes Máquinas e Todesmade Ltda. (2023).**

Da mesma forma, o sistema desenvolvido permite descarregar os dados do consumo de energia de cada serra vinculado com o corte de cada tora identificada com o *tracking* (Figura 53), o que facilita a corroboração do modelo proposto sempre que precisar através da aplicação do algoritmo desenvolvido em MatLab e apresentado neste trabalho. Para o momento da culminação deste trabalho, o sistema está 100% implantado na serraria e forma parte do sistema de monitoramento e controle de rotina nas operações diárias, seguindo os princípios das indústrias 4.0 (*Smart sawmill*).

**Figura 49 - Banco de dado armazenado do consumo de corrente vs. tora cortada pelo supervisório aplicado na indústria.**

	A	C	D	E	F
1	ID Tora	SERRA 1(Amp)	SERRA 2(Amp)	SERRA 3(Amp)	SERRA 4(Amp)
2	46	33,78	34,29	64,49	61,10
3	48	36,90	35,17	37,37	36,52
4	49	33,12	35,28	37,59	36,79
5	50	34,73	34,92	71,71	66,43
6	51	36,30	36,64	37,08	37,75
7	52	34,62	33,03	37,11	34,55
8	53	36,80	35,19	75,71	65,23
9	54	34,83	35,14	37,26	36,50
10	55	36,85	34,31	66,25	35,67
11	57	36,67	34,95	60,09	59,09
12	58	35,45	35,56	82,98	74,03
13	60	36,92	37,00	81,16	77,65
14	62	36,90	36,98	80,06	74,65
15	63	38,92	36,93	72,30	73,37
16	64	36,69	37,03	79,18	74,97
17	66	36,88	37,16	36,96	71,19
18	69	37,13	37,09	70,71	65,87
19	70	35,48	35,88	80,59	76,96
20	72	38,42	36,36	72,28	72,95
21	73	37,67	36,12	36,59	37,16
22	74	37,11	34,00	82,81	33,33

**Fonte: Cortesia de Mendes Máquinas e Todesmade Ltda. (2023).**