

**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

**AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS DE PROCESSO NO  
TORNEAMENTO DE MADEIRAS TRATADAS  
TERMICAMENTE**

**Guaratinguetá**  
**2015**

LUCIANO ROSSI BILESKY

AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS DE PROCESSO NO  
TORNEAMENTO DE MADEIRAS TRATADAS  
TERMICAMENTE

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

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá  
2015

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B595a | <p>Bilesky, Luciano Rossi</p> <p>Avaliação dos aspectos de processo no torneamento de madeiras tratadas termicamente / Luciano Rossi Bilesky.- Guaratinguetá , 2015</p> <p>132 f.: il.</p> <p>Bibliografia: f. 122-132</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves</p> <p>1. Termorretificação 2. Madeira I. Título</p> <p>CDU 624.011.1</p> |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**LUCIANO ROSSI BILESKI**

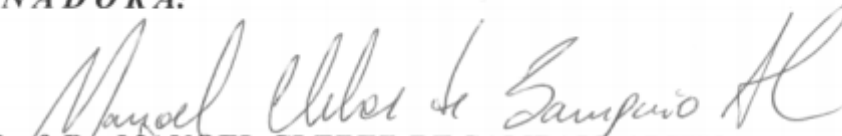
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

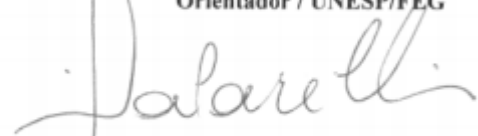
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS**

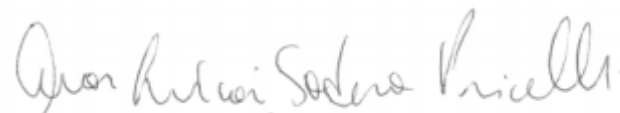
**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

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

  
Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI  
UNESP/BAURU

  
Prof. Dr. ANA LÚCIA PIEDADE SODERO  
MARTINS PINCELLI  
FATEC/Capão Bonito

  
Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA  
UNES/PFEG

*Julho de 2015*

## **DADOS CURRICULARES**

**LUCIANO ROSSI BILESKY**

|            |                                                                                                                                                                     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NASCIMENTO | 09.06.1983 – ITAPEVA / SP                                                                                                                                           |
| FILIAÇÃO   | Luiz José Bilesky<br>Maria Guilhermina Rossi                                                                                                                        |
| 2001/2004  | Curso de Graduação<br>Licenciatura em Física – Faculdades Integradas da<br>Região de Avaré                                                                          |
| 2007/2010  | Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,<br>nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do<br>Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual<br>Paulista. |

Dedico de modo especial à minha família, pilar e estrutura de toda esta batalha.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por nos possibilitar e dar ferramentas para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador *Prof. Dr. Manoel Cléber Sampaio Alves* pelo empenho e disponibilidade e em ajudar, compreender e me capacitar, este agradecimento é de forma muito especial, pois sem a sua figura este trabalho e as nossas dificuldades não seriam superadas.

A minha família de forma muito especial que colaborou sempre com o seu apoio irrestrito nesta caminhada, na pessoa de meu pai *Luiz José Bilesky*, minha mãe *Maria Guilhermina Rossi*, meu irmão *Paulo Rossi Bilesky*, Minha avó Conceição pelas orações e minha esposa *Carolina M. Kasemodel Bilesky*, que de forma especial aguentou e superou todas as tempestades ao meu lado.

A família *Kasemodel* pelo apoio irrestrito.

Aos amigos que colaboraram de alguma forma com a tese, *Cleverton Pinheiro* e *Priscila Roel de Deus* pela força e incentivo nas horas mais difíceis.

Aos técnicos de laboratório do Departamento de Materiais e Tecnologia da Unesp Guaratinguetá, pela presteza e paciência.

Aos técnicos de laboratório da FATEC Capão Bonito pelo apoio e ajuda.

Aos amigos *Renato Rezende*, *Fábio Henrique Antunes Vieira*, *Vanessa Tavares*, *Ivan Santos*, *Cláudio De Conti*, *Andrea Cressoni De Conti* e *Francisco Mateus Varasquim* sempre presentes e um grande ombro de apoio.

À UNESP por propiciar o ambiente e o incentivo à pesquisa.

A todos os envolvidos que de uma forma ou outra contribuíram de forma direta ou indireta para este trabalho.

“Há três maneiras de agir sabiamente:  
a primeira pela meditação, que é a mais sábia  
a segunda pela imitação, que é a mais fácil  
a terceira pela experiência, que é a mais amarga”

Confúcio

**BILESKEY, L. R. Avaliação dos Aspectos de Processo no Torneamento de Madeiras Tratadas Termicamente.** 2015. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## **RESUMO**

A termorretificação é o processo pelo qual a madeira é submetida a temperaturas entre 100°C e 250°C com a finalidade de alterar as propriedades da madeira devido a degradação de alguns de seus constituintes pelo processo da pirólise. O tratamento térmico da madeira aparece como alternativa na alteração das propriedades, colorimétricas, higroscópicas e da densidade. Inúmeros são os trabalhos encontrados na literatura sobre o tema, porém poucos tratam da usinagem deste tipo de material. Este trabalho tratou termicamente as madeiras de *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora* nas temperaturas de 100°C, 140°C, 160°C, 180°C e 200°C e avaliou o desempenho da usinagem deste material em torneamento com as ferramentas de corte de metal duro, metal duro polido e metal duro com revestimento de TiB<sub>2</sub>. Foram analisados os parâmetros da potência de corte efetiva, vibração, temperatura da ferramenta durante a usinagem, rugosidade, superfície por MEV e formação dos cavacos. A madeira termicamente tratada demonstrou diminuição de sua rugosidade com o aumento da temperatura de tratamento térmico, com o uso da ferramenta de metal duro com recobrimento de TiB<sub>2</sub> e espécie de *Corymbia citriodora*. Menor potência de usinagem para *Pinus elliotti*. Maior temperatura de usinagem com o aumento da temperatura do tratamento térmico. Com o aumento da temperatura do tratamento térmico o material se tornou mais friável produzindo cavacos menores. Na análise da superfície com a microscopia de varredura verificou-se o defeito de arrancamento de fibras e uma superfície mais uniforme quando tratado a termicamente 160°C.

**PALAVRAS-CHAVE:** Termorretificação, Corymbia, Pinus, Torneamento, Rugosidade.

BILESKY, L. R. Assessment of Aspects in Wood Heat-Treated Turning. 2015. 135 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ. Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2010.

## ABSTRACT

Wood has awakened every day more interest for its renewable character and application versatility. Several methods have been developed in order to change some of the existing properties of wood and adapt it for their use and application, especially in reforested wood that often do not have these features. The heat treatment is the process by which the timber is subjected to temperatures between 140 ° C and 220 ° C in order to change the properties of wood due to degradation of some of its constituents by the pyrolysis process. The heat wood treatment appears as an alternative to changing the properties, colorimetric, hygroscopic and density. There are countless studies on the subject, but few address the machining of this type of material. This paper did a heat treatment on the wood *Pinus elliottii* and *Corymbia citriodora* at temperatures of 100°C, 140°C, 160°C, 180°C and 200°C and evaluated the performance of machining in three different material cutting tools, carbide, polished carbide and carbide with TiB<sub>2</sub> coating. The parameters analyzed were effective power, vibration, tool temperature during machining, roughness and the formation of chips. The heat-treated timber showed a good machining performance and the quality of their surface, showing a decrease of roughness with increasing heat treatment temperature. The heat-treated timber showed a decrease of roughness with increasing heat treatment temperature, with the use of carbide tool with TiB<sub>2</sub> coating and kind of *Corymbia citriodora*. Lower power machining for *Pinus elliottii*. Higher machining temperature with increasing heat treatment temperature. In the surface analysis by scanning microscopy there was the defect of fiber pullout and a more uniform surface when thermally treated at 160 ° C.

**KEYWORDS:** Thermoretification, *Corymbia*, *Pinus*, Turning, Roughness.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Estrutura de uma árvore e suas diferentes partes.....                                                                                                                               | 25 |
| Figura 2 - Caule em corte transversal e suas regiões.....                                                                                                                                      | 26 |
| Figura 3 - Anéis de crescimento em madeira de conífera. ....                                                                                                                                   | 27 |
| Figura 4 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de conífera.....                                                                                                               | 28 |
| Figura 5 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de folhosas. ....                                                                                                              | 29 |
| Figura 6 - Diagrama de produção de madeira termorretificada através do processo ThermoWood®.....                                                                                               | 32 |
| Figura 7 - Perda de massa da madeira de <i>Pinus pinaster</i> tratada termicamente em função do tempo e temperatura. ....                                                                      | 34 |
| Figura 8 - Fluxograma dos mecanismos de reação da madeira tratada termicamente. ....                                                                                                           | 35 |
| Figura 9 - (a) Parede celular com grupos OH (hidroxilas) não tratados termicamente, (b) ligação de moléculas de água H <sub>2</sub> O aos grupos OH, (c) parede celular tratada termicamente.. | 38 |
| Figura 10 - Madeira de <i>Tectona grandis</i> ; (A) madeira original, (B) tratada a 180°C e (C) tratada a 200°C. ....                                                                          | 40 |
| Figura 11 - Variação da resistência à flexão, módulo de elasticidade (MOE) teor de celulose de <i>Pinus pinaster</i> em função da perda de massa. ....                                         | 42 |
| Figura 12 - Resistência ao cisalhamento em função da temperatura/tempo de tratamento de <i>Juniperus virginiana</i> L. ....                                                                    | 43 |
| Figura 13 - Principais operações executadas no torno. ....                                                                                                                                     | 45 |
| Figura 14 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo torneamento.....                                                                                                              | 45 |
| Figura 15 - Cunha de corte da ferramenta. ....                                                                                                                                                 | 47 |
| Figura 16 - Elementos da cunha de corte de uma ferramenta de torneiar. ....                                                                                                                    | 48 |
| Figura 17 - Rede hexagonal de átomos de boro na matriz de titânio ....                                                                                                                         | 51 |
| Figura 18 - Mecanismo de formação de cavaco. ....                                                                                                                                              | 55 |
| Figura 19 - Tipos de cortes ortogonais. ....                                                                                                                                                   | 56 |
| Figura 20 - Formação do cavaco Tipo I. ....                                                                                                                                                    | 57 |
| Figura 21 - Formação do cavaco Tipo II. ....                                                                                                                                                   | 58 |
| Figura 22 - Formação do cavaco Tipo III.....                                                                                                                                                   | 59 |
| Figura 23 - Defeitos encontrados após a usinagem de madeira termorretificada.....                                                                                                              | 60 |
| Figura 24 - Ranking de qualidade das superfícies de madeiras termorretificadas aplainadas. ....                                                                                                | 61 |
| Figura 25 - Rugosidade R <sub>a</sub> da superfície de madeira termorretificada submetida ao lixamento. ....                                                                                   | 62 |
| Figura 26 - Ataque da ferramenta à superfície da madeira.....                                                                                                                                  | 63 |
| Figura 27 - Principais ondulações e rugosidades produzidas por ferramentas.....                                                                                                                | 64 |
| Figura 28 - Comprimentos para a avaliação da rugosidade.....                                                                                                                                   | 65 |

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 29 - Linha média e áreas inferiores e superiores. ....                                                 | 65 |
| Figura 30 - Rugosidade média $R_a$ . ....                                                                     | 66 |
| Figura 31 - Altura total do perfil $R_t$ . ....                                                               | 66 |
| Figura 32 - (a) fibras de madeira sem tratamento térmico, (b) fibras com tratamento térmico a 200°C, 2h. .... | 68 |
| Figura 33 - Rugosidade $R_a$ da superfície de madeiras tratadas termicamente. ....                            | 68 |
| Figura 34 - Preparação do corpo de prova, peça paralelepípedica. ....                                         | 72 |
| Figura 35 - Preparação do corpo de prova. ....                                                                | 72 |
| Figura 36 - Preparação final do corpo de prova em formato cilíndrico. ....                                    | 73 |
| Figura 37 - Estufa marca Quimis modelo QS19V12. ....                                                          | 74 |
| Figura 38 - Fases do tratamento térmico. ....                                                                 | 75 |
| Figura 39 - Conjunto de acessórios de usinagem: ferramenta, suporte e cabeçote. ....                          | 76 |
| Figura 40 - Ferramenta de metal duro. ....                                                                    | 77 |
| Figura 41 - Ferramenta de metal duro polida. ....                                                             | 78 |
| Figura 42 - Ferramenta de metal duro com recobrimento de diboreto de titânio ( $TiB_2$ ). ....                | 78 |
| Figura 43 - Torno CNC utilizado nos ensaios. ....                                                             | 79 |
| Figura 44 - Posicionamento do corpo de provas no torno CNC. ....                                              | 79 |
| Figura 45 - Uniformização da superfície do corpo de provas. ....                                              | 80 |
| Figura 46 - Corpo de prova após a uniformização da superfície de usinagem. ....                               | 80 |
| Figura 47 - Regiões de usinagem do corpo de prova. ....                                                       | 81 |
| Figura 48 - Usinagem do corpo de prova em diferentes regiões. ....                                            | 81 |
| Figura 49 - Tela do software Labview utilizado para a aquisição de dados da usinagem. ....                    | 82 |
| Figura 50 - Sensor de vibração utilizado nos ensaios. ....                                                    | 82 |
| Figura 51 - Dispositivo de aquisição de dados de vibração. ....                                               | 83 |
| Figura 52 – Sensor de potência utilizado. Marca LEM, modelo AT5B10. ....                                      | 83 |
| Figura 53 – Placa de aquisição de dados. ....                                                                 | 84 |
| Figura 54 - Câmera termográfica utilizada para aquisição da temperatura. ....                                 | 84 |
| Figura 55 - Regiões de coleta e análise da temperatura. ....                                                  | 85 |
| Figura 56 - Rugosímetro modelo MarSurf M 300. ....                                                            | 86 |
| Figura 57 - Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15. ....                                         | 87 |
| Figura 58 - Gráfico dos efeitos principais das médias da potência efetiva. ....                               | 91 |
| Figura 59 - Gráfico dos efeitos principais da relação S/N da potência efetiva. ....                           | 92 |
| Figura 60- Gráfico dos efeitos principais das médias da rugosidade $R_t$ . ....                               | 93 |
| Figura 61 - Gráfico dos efeitos principais da relação S/N da rugosidade $R_t$ . ....                          | 94 |
| Figura 62 - Gráfico dos efeitos principais das médias da rugosidade $R_a$ . ....                              | 96 |

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 63 - Gráfico dos efeitos principais da relação S/N da rugosidade $R_a$ .                                                                     | 97  |
| Figura 64 - Termográfica da usinagem da madeira de <i>Pinus elliottii</i> termorretificada.                                                         | 98  |
| Figura 65 - Termografia da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> termorretificada.                                                                  | 99  |
| Figura 66 - Gráfico dos efeitos principais para as médias da temperatura na ponta da ferramenta.                                                    | 100 |
| Figura 67 - Gráfico dos efeitos principais para a razão S/N da temperatura na ponta da ferramenta.                                                  | 100 |
| Figura 68 - Gráfico dos efeitos principais para as médias da temperatura de usinagem.                                                               | 102 |
| Figura 69 - Gráfico dos efeitos principais para a razão S/N da temperatura de usinagem.                                                             | 103 |
| Figura 70 - Gráfico dos efeitos principais para as médias da vibração na operação de usinagem.                                                      | 104 |
| Figura 71 - Gráfico dos efeitos principais para a razão S/N da vibração na operação de usinagem.                                                    | 105 |
| Figura 72 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 1-1-1 (madeira temperatura ambiente, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro).        | 106 |
| Figura 73 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 1-1-1 (madeira temperatura ambiente, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro).        | 107 |
| Figura 74 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 4-1-3 (termorretificação a 180°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro revestida). | 107 |
| Figura 75 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 4-1-3 (termorretificação a 180°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro revestida). | 108 |
| Figura 76 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-1-3 (termorretificação a 200°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro revestida). | 109 |
| Figura 77 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-1-3 (termorretificação a 200°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro revestida). | 110 |
| Figura 78 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-1-2 (termorretificação a 200°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro polida).    | 110 |
| Figura 79 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-1-2 (termorretificação a 200°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro polida).    | 111 |
| Figura 80 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 1-2-2 (temperatura ambiente, madeira de pinus, ferramenta de metal duro polido).            | 112 |
| Figura 81 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 1-2-2 (temperatura ambiente, madeira de pinus, ferramenta de metal duro polido).            | 113 |
| Figura 82 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 4-2-1 (termorretificação a 160°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).              | 113 |
| Figura 83 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 4-2-1 (termorretificação a 160°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).              | 114 |
| Figura 84 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 5-2-1 (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).              | 114 |
| Figura 85 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 5-2-1 (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).              | 115 |

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 86 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-2-2 (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro polido). ..... | 115 |
| Figura 87 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-2-2 (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro polido). ..... | 116 |
| Figura 88 - Cavacos da usinagem do corpo de prova da madeira de <i>Corymbia citriodora</i> ...                                                      | 117 |
| Figura 89 - Cavacos da usinagem do corpo de prova da madeira de <i>Pinus elliottii</i> . .....                                                      | 119 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Matriz L 18 mista utilizada nos ensaios. ....                                                                                     | 88  |
| Tabela 2 - Densidade média básica e aparente das madeiras de <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Pinus Elliottii</i> . ....                      | 89  |
| Tabela 3 - Análise de Variância para Médias da Potência Efetiva. ....                                                                        | 90  |
| Tabela 4 - Análise de Variância para Médias da Rugosidade $R_t$ . ....                                                                       | 93  |
| Tabela 5 - Análise de Variância para Médias da Rugosidade $R_a$ . ....                                                                       | 95  |
| Tabela 6 - Análise de Variância para Médias das temperaturas na ponta da ferramenta em contato com o corpo de prova durante a usinagem. .... | 99  |
| Tabela 7 - Análise de Variância para Médias das temperaturas de usinagem. ....                                                               | 101 |
| Tabela 8 - Análise de Variância para Médias da Vibração. ....                                                                                | 104 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Média da composição química da madeira de coníferas e folhosas. ....                                | 30 |
| Quadro 2 - Composição da madeira de <i>Spruce</i> em função da temperatura e tempo de tratamento térmico. .... | 36 |
| Quadro 3 - Classificação das ferramentas de metal duro.....                                                    | 50 |
| Quadro 4 - Propriedades físicas e mecânicas típicas do TiB <sub>2</sub> à temperatura ambiente. ....           | 52 |
| Quadro 5 - Comprimento da amostragem <i>le</i> para perfis de usinagem não periódicos. ....                    | 65 |
| Quadro 6 - Dureza e rugosidade de madeiras tratadas termicamente. ....                                         | 67 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|      |                                                |
|------|------------------------------------------------|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas       |
| CCB  | Borato de Cobre Cromatado                      |
| CVD  | Chemical Vapour Deposition                     |
| CNC  | Comando Numérico Computadorizado               |
| DOE  | Projeto de experimentos                        |
| ISO  | International Organization for Standardization |
| MDF  | Medium density fiberboard                      |
| MOE  | Módulo de elasticidade                         |
| NBR  | Norma Brasileira Registrada                    |
| MEV  | Microscópio Eletrônico de Varredura            |
| PVD  | Physical Vapour Deposition                     |
| S/N  | Sinal-ruído                                    |
| UV   | Ultra-violeta                                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |                                                     |                        |
|------------|-----------------------------------------------------|------------------------|
| $A_y$      | Superfície da cunha                                 | [mm]                   |
| $A_\alpha$ | Superfície de folga principal                       | [mm]                   |
| $D_a$      | Densidade da água a 25°C                            | [kg.m <sup>-3</sup> ]  |
| $D_{ap}$   | Densidade aparente 12% de umidade                   | [kg.m <sup>-3</sup> ]  |
| $D_b$      | Densidade básica                                    | [kg.m <sup>-3</sup> ]  |
| $L_e$      | Comprimento de amostragem (cut-off ou $\lambda_c$ ) | [mm]                   |
| $L_m$      | Comprimento de medição                              | [mm]                   |
| $L_n$      | Comprimento para parada do apalpador                | [mm]                   |
| $L_t$      | Comprimento total de medição                        | [mm]                   |
| $m_i$      | Massa saturada e imersa em água                     | [kg]                   |
| $m_v$      | Massa saturada em água                              | [kg]                   |
| $m_s$      | Massa seca                                          | [kg]                   |
| $R_a$      | Rugosidade média                                    | [ $\mu$ m]             |
| $R_t$      | Rugosidade total                                    | [ $\mu$ m]             |
| $m_{12\%}$ | Massa a 12% de umidade                              | [kg.m <sup>-3</sup> ]  |
| $V_{12\%}$ | Volume a 12% de umidade                             | [m <sup>3</sup> ]      |
| $V_f$      | Velocidade de avanço                                | [m.min <sup>-1</sup> ] |
| $V_c$      | Velocidade de corte                                 | [m.min <sup>-1</sup> ] |
| $W$        | Potência                                            | [Watts]                |

## SUMÁRIO

|       |                                                          |    |
|-------|----------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introdução.....                                          | 21 |
| 2     | Objetivos .....                                          | 23 |
| 3     | Revisão bibliográfica.....                               | 24 |
| 3.1   | Madeira .....                                            | 24 |
| 3.1.1 | Estrutura Anatômica da Madeira .....                     | 24 |
| 3.1.2 | Composição Química da Madeira.....                       | 30 |
| 3.1.3 | <i>Corymbia citriodora</i> .....                         | 31 |
| 3.1.4 | <i>Pinus elliottii</i> .....                             | 31 |
| 3.2   | madeira termorretificada.....                            | 31 |
| 3.2.1 | Propriedades Químicas da Madeira Termorretificada .....  | 33 |
| 3.2.2 | Propriedades Físicas de Madeira Termorretificada.....    | 37 |
| 3.2.3 | Propriedades Mecânicas de Madeira Termorretificada. .... | 41 |
| 3.3   | Usinagem .....                                           | 44 |
| 3.3.1 | Ferramentas .....                                        | 46 |
| 3.3.2 | Materiais das Ferramentas de Corte.....                  | 48 |
| 3.3.3 | Usinagem de Madeira .....                                | 52 |
| 3.3.4 | Usinagem de Madeira Termorretificada .....               | 60 |
| 3.3.5 | Rugosidade da Superfície da Madeira .....                | 62 |
| 3.4   | Projeto de Experimentos (DOE) .....                      | 69 |
| 4     | Materiais e métodos .....                                | 72 |
| 4.1   | Preparação do Corpo de prova.....                        | 72 |
| 4.2   | Determinação da densidade .....                          | 73 |
| 4.3   | Termorretificação.....                                   | 74 |
| 4.4   | Ferramentas de Corte Utilizadas.....                     | 76 |

|       |                                                                                                                     |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5   | Torno CNC .....                                                                                                     | 78  |
| 4.6   | Sistema de Aquisição de Dados .....                                                                                 | 82  |
| 4.7   | Análise das Rugosidades .....                                                                                       | 85  |
| 4.8   | Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....                                                         | 86  |
| 4.9   | Planejamento Experimental – Método de Taguchi .....                                                                 | 87  |
| 5     | Resultados e Discussão.....                                                                                         | 89  |
| 5.1   | Densidade Básica e Densidade Aparente .....                                                                         | 89  |
| 5.2   | Análise da Potência Efetiva de Corte .....                                                                          | 90  |
| 5.3   | Análise da rugosidade superficial.....                                                                              | 92  |
| 5.3.1 | Rugosidade $R_t$ .....                                                                                              | 92  |
| 5.3.2 | Rugosidade $R_a$ .....                                                                                              | 95  |
| 5.4   | Temperatura na ferramenta .....                                                                                     | 98  |
| 5.5   | Temperatura De usinagem.....                                                                                        | 101 |
| 5.6   | Vibração .....                                                                                                      | 103 |
| 5.7   | análise das superfícies usinadas dos corpos de prova utilizando o microscópio de eletrônico de varredura (Mev)..... | 106 |
| 5.8   | Cavacos .....                                                                                                       | 116 |
| 6     | Conclusões.....                                                                                                     | 121 |
| 7     | Referências Bibliográficas.....                                                                                     | 122 |

## 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais utilizados pelo homem, com as mais diversas aplicações, seja como biomassa, polpa de celulose para a produção de papel, construção civil, indústria alimentícia, indústria farmacêutica, indústria moveleira entre tantas outras aplicações.

A busca pela sustentabilidade, coloca a madeira como um dos principais materiais a serem explorados, por se tratar de um material versátil e renovável. No Brasil a exploração de florestas naturais tem sido substituída por áreas de reflorestamento com destaque para as madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus* que se destacam entre aquelas que melhor se adaptaram ao clima e solo do país.

Com a crescente demanda das espécies exóticas de madeiras em reflorestamentos, se faz necessário o conhecimento de suas propriedades anatômicas, químicas, físicas e mecânicas para o uso racional do recurso e aplicação tecnológica.

Alguns métodos tecnológicos têm sido utilizados com o objetivo de modificar e obter diferentes propriedades nas madeiras reflorestadas, um desses métodos que têm sido muito explorado é o tratamento térmico da madeira também conhecido como termorretificação.

O processo termorretificação da madeira consiste em submetê-la a temperaturas entre 100°C e 250° por determinados períodos de tempo, de forma que ocorra o fenômeno da pirólise, o qual consiste em degradar alguns constituintes físicos da madeira como a hemicelulose, celulose e lignina, de forma que confira novas propriedades à este lenho, como alteração de sua coloração, menor absorção de água e maior resistência a degradação biológica.

As alterações que ocorrem na madeira pelo processo de termorretificação, conferem a este material maior valor agregado, pois por exemplo, com a alteração de sua coloração, as madeiras de reflorestamento passam a ter coloração parecida com madeiras nativas.

As modificações que ocorrem no lenho da madeira termorretificada, permitem novas aplicações a este material na construção civil e indústria moveleira. Hoje na literatura encontra-se muitos trabalhos no qual o objetivo de estudo são as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira termorretificada, porém são poucas as informações encontradas sobre o seu comportamento aos processos de usinagem.

A usinagem consiste na retirada de materiais de uma peça com o auxílio de uma ferramenta com o objetivo de lhe conferir forma dimensional, um processo muito importante e bastante utilizado para a madeira, pois a usinagem se faz necessária para dar forma a madeira na construção civil para tábuas, pisos, portas, batentes, etc. Na indústria de mobiliário, na

confecção de sarrafos, tábuas, peças roliças, entre outras que são utilizadas para a confecção e montagem de móveis.

Embora a usinagem seja uma operação bastante antiga, ainda há muito para ser desenvolvida para madeiras, pois devido à variabilidade e heterogeneidade do material, para cada espécie, diversos parâmetros se fazem necessários serem alterados para se obter bons resultados.

Na literatura são escassas as informações sobre o comportamento da madeira termicamente tratada submetida ao processo de usinagem, estas informações são tão importantes quanto o conhecimento das propriedades físicas, químicas e mecânicas, para o uso racional e aplicado do material.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo a avaliação do comportamento da madeira de *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* termicamente tratadas pelo processo de termorreificação nas temperaturas de 100°C, 140°C, 160°C, 180°C, 200°C em relação ao controle na temperatura ambiente, com o uso de três diferentes tipos de ferramenta de corte, sendo de metal duro, metal duro polido e metal duro com recobrimento de TiB<sub>2</sub> (diboreto de titânio)

Foram avaliados os parâmetros da potência de usinagem, rugosidade da superfície R<sub>a</sub>, rugosidade da superfície R<sub>t</sub>, temperatura da ferramenta durante a usinagem, temperatura de usinagem no corpo de prova, vibração, análise qualitativa da superfície por microscopia de varredura eletrônica e tipos de cavacos formados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 MADEIRA

A madeira é material vegetal renovável, por estas características vem se acentuando o interesse neste material, de forma que se encontram grandes áreas de reflorestamento com diversas espécies. No reflorestamento brasileiro são predominantes as espécies de *Eucalyptus* e *Pinus* por terem se adequadamente melhor ao clima e por serem madeiras de alto rendimento.

A madeira por ser um material biológico, apresenta grande variabilidade, pois suas características são alteradas de uma espécie para a outra, em uma mesma espécie quando comparamos lenho proveniente de diferentes regiões de altitude, relevo e clima, e até mesmo na mesma árvore, dependendo do local em que o lenho é retirado.

##### 3.1.1 Estrutura Anatômica da Madeira

O estudo da estrutura anatômica e sua complexidade de partes se faz necessário para que se possa aplicar cada vez melhor este material nas mais diversas tecnologias e usos. Devido a sua variabilidade, são encontradas características específicas para cada espécie que permite uma aplicação racional deste recurso renovável.

De forma simplificada as madeiras podem ser classificadas em dois grupos, as angiospermas e as gimnospermas, conforme as suas características em comum.

As gimnospermas são espécies mais primitivas, pois foram desenvolvidas no período jurássico, se destacam por apresentar as características de serem resinosas e lenho relativamente macio o que leva a denominação de "softwood" (ESAU, 2002). As gimnospermas também são conhecidas como coníferas, por possuírem um desenvolvimento monopodial em formato cônico.

O bioma predominante das coníferas é de regiões frias, mas muito se tem desenvolvido no sentido de se obter reflorestamentos em regiões mais quentes devido a sua grande aplicabilidade industrial.

As angiospermas foram desenvolvidas no período cretáceo, e podem ainda ser divididas em duas classes, as monocotiledôneas e as dicotiledôneas (CALIL JUNIOR, LAHR; DIAS, 2003).

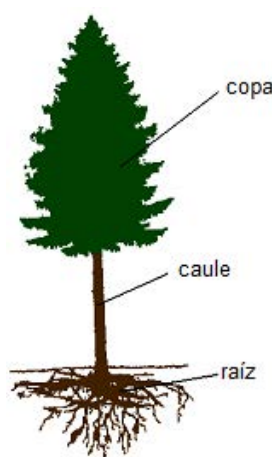
Esau (2002) afirma que as monocotiledôneas são assim denominadas por possuírem sementes de apenas um cotilédono. Sua madeira é pouco utilizada industrialmente não possui propriedades tecnológicas desejáveis.

As dicotiledôneas têm a sementes com dois cotilédones, são encontradas em biomas de climas tropicais e quente (BURGER; RICHTER, 1991), possuem grande área reflorestada para utilização em indústrias de celulose e papel, biomassa, construção civil e moveleira (CALIL JUNIOR, LAHR; DIAS, 2003).

As angiospermas dicotiledôneas apresentam um crescimento simpodial, com estrutura lafoliadas, também são conhecidas como "folhosas" ou "hardwoods" por apresentarem lenhos relativamente mais duro e pesado em relação às coníferas (ESAU, 2002).

As árvores são constituídas por três partes, sendo as raízes, a copa e o caule, representados na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura de uma árvore e suas diferentes partes.



Fonte: Adaptado de Esau (2002)

As raízes têm a função de sustentar mecanicamente a árvore no solo e ainda realizar a extração de água e sais minerais (BURGER; RICHTER, 1991). Seu desenvolvimento é caótico, sem padrão definido e por estar localizada a maior parte no subsolo torna-se inviável economicamente a sua retirada pois possui um valor baixo no mercado, embora algumas raízes sejam utilizadas na área farmacêutica, mas a sua maior parte é utilizada no segmento de biomassa (WITSCHORECK; SCHUMACHE; CALDEIRA, 2003).

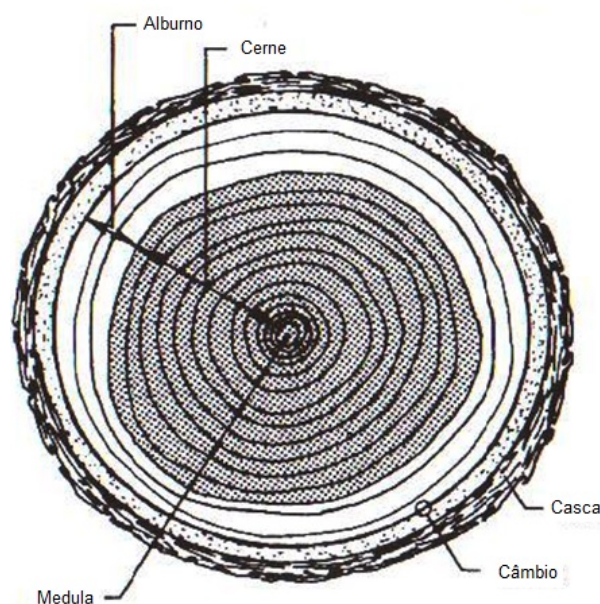
A copa da árvore promove a transpiração e a fotossíntese através de suas folhas, sendo estes fenômenos fisiológicos vitais para o desenvolvimento da planta (ESAU, 2002). O

aproveitamento comercial da copa está ligado à utilização das folhas para a produção de óleo, essências e produtos farmacêuticos e os galhos utilizados para biomassa.

O caule é a parte da árvore de maior interesse comercial, pois nele está o lenho que tem diversas aplicações comerciais como produção de celulose e papel, biomassa, construção civil e mobiliários. A função do caule em uma árvore é a sustentação da copa e o transporte e armazenamento de nutrientes (GONÇALVES, 2000).

Quando observamos o caule em corte transversal na Figura 2, podemos observar as regiões com funções específicas na sequência de fora para dentro sendo a casca, câmbio, xilema (composto por alburno e cerne) e a medula (PFEIL; PFEIL, 2003).

Figura 2 - Caule em corte transversal e suas regiões.



Fonte: Adaptado de Pfeil e Pfeil (2003).

Segundo Gonçalves (2000) a casca tem como função proteger o xilema de choques mecânicos, combustão, intempéries e ataques biológicos.

A casca apresenta funções apenas durante o desenvolvimento da árvore e não interfere nas propriedades do lenho disponível para ser usinado, sendo na maioria das vezes retirado do fuste (BURGER; RICHTER, 1991).

O câmbio é uma camada de células meristemáticas responsáveis pelo crescimento longitudinal do fuste. Estas células se dividem formando novas células de xilema. O câmbio não interfere nas propriedades da madeira depois de colhida, apenas durante seu desenvolvimento (GONÇALVES, 2000).

O xilema é a região mais importante da árvore quando se trata de usinagem, pois é composta pela maior parte do lenho disponível para utilização comercial. Segundo Gonçalves (2000) o xilema é dividido em duas regiões como pode ser observada na Figura 2, a mais clara que é denominada de alburno e a mais escura denominada cerne.

O alburno é a região em que o xilema possui células fisiologicamente ativas, com as funções de armazenamento e condução de nutrientes na árvore. Trata-se uma região muito suscetível ao ataque biológico de fungos e bactérias por armazenar nutrientes (GONÇALVES, 2000).

O cerne possui células fisiologicamente mortas, as quais não exercem função no desenvolvimento da árvore, ficando apenas com a função de sustentação (BURGER; RICHTER, 1991).

Em relação ao alburno o cerne possui maior densidade e maior resistência à ataques biológicos, pois possui maior teor de lignina e menor teor de celulose.

As condições climáticas influenciam no desenvolvimento do lenho, conforme a disponibilidade de luz, água e temperatura do ambiente. Essas condições são cíclicas se tomarmos como referência as estações do ano, em que primavera-verão possui maior incidência de luz, mais chuvas e temperaturas elevadas em relação ao outono-inverno, colaborando para o desenvolvimento do lenho. Esta periodicidade, leva a árvore desenvolver os anéis de crescimentos, que podem ser observados na Figura 3. Os anéis mais claros são denominados de primaveril (lenho inicial) e os mais escuros de outonal (lenho tardio) (ESAU, 2002).

Figura 3 - Anéis de crescimento em madeira de conífera.



Fonte: Adaptado de Esau (2002)

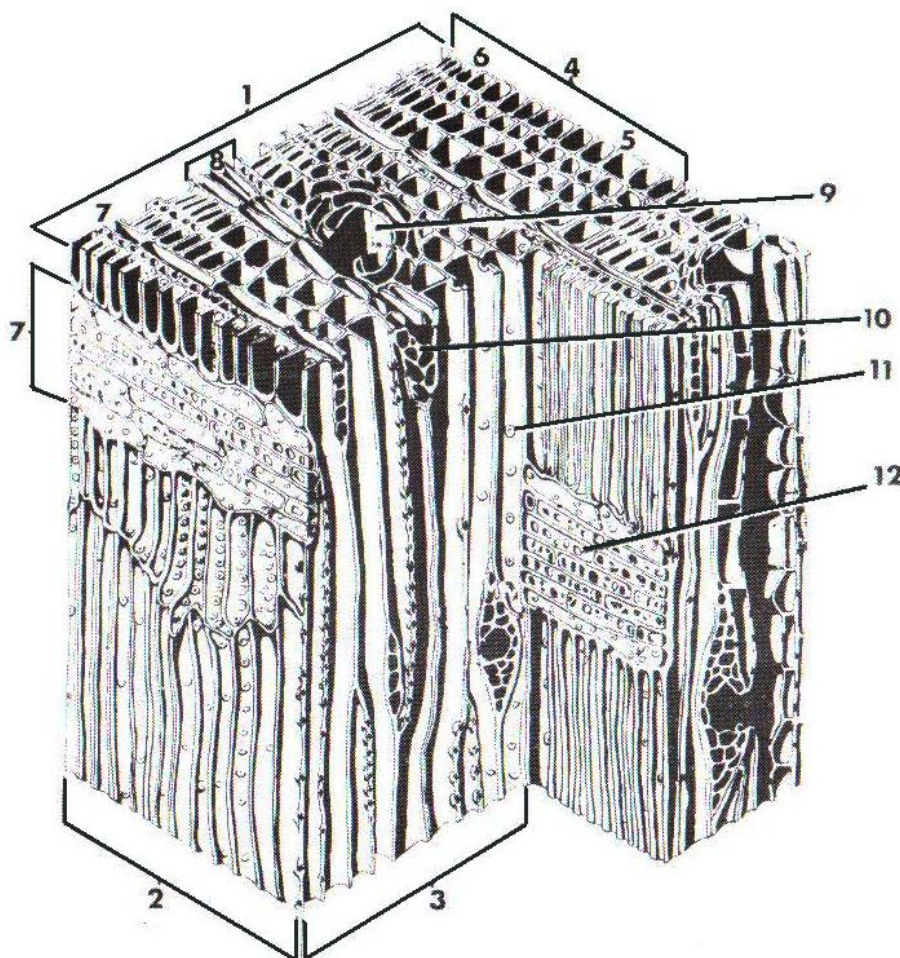
Comparando o anel primaveril em relação ao outonal Esau (2002) afirma que ele possui, menor densidade, fibras mais largas e menos longas, menor espessura da parede das fibras, menor teor de celulose e lignina e maior teor de extrativos.

A medula é formada por células meristemáticas primárias, está localizada bem ao centro do caule estendendo-se deste o topo até a base do fuste. Sua quantidade de madeira é insignificante comercialmente e importante apenas durante o desenvolvimento da árvore.

O lenho de uma conífera pode ser considerado homogêneo, pois é constituído apenas por células de parênquima, canais de resina e 93% do lenho por traqueídes (BODIG; JAYNE, 1982).

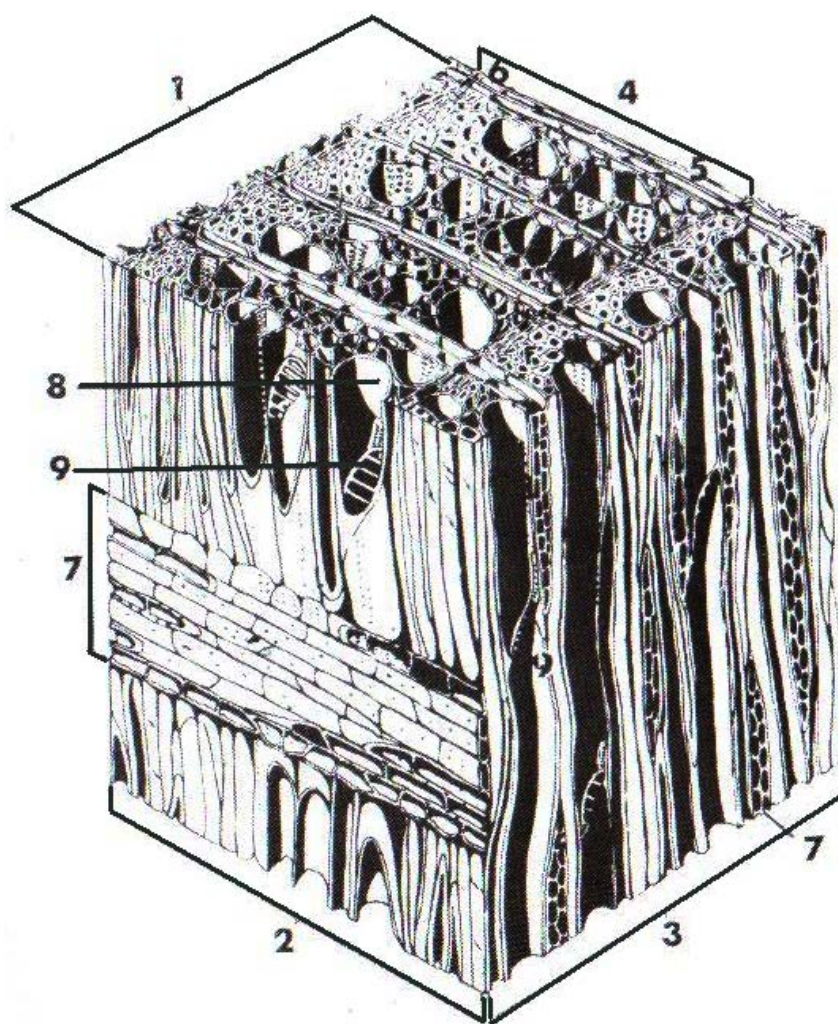
Segundo Esau (2002) os traqueídes são fibras responsáveis pela condução de água e nutrientes através de pontoações areoladas, e também pela sustentação, pois são dispostos no lenho, lado a lado formando o lenho, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de conífera (1) seção transversal, (2) seção radial, (3) seção tangencial, (4) anéis de crescimento, (5) lenho inicial, (6) lenho tardio, (7) raios, (8) raios fusiformes, (9) canal de resina vertical, (10) canal de resina horizontal, (11) pontoação, (12) pontoação.



A constituição do lenho de folhosa é mais complexo, pois são estruturas com formações caóticas de parênquimas, traqueídes, elementos de vasos e fibras, como mostrado na Figura 5 (ESAU, 2002).

Figura 5 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de folhosas: (1) seção transversal, (2) seção radial, (3) seção tangencial, (4) anéis de crescimento, (5) lenho inicial, (6) lenho tardio, (7) raios, (8) vasos, (9) pontoações.



Fonte: (BODIG; JAYNE, 1982).

### 3.1.2 Composição Química da Madeira

A composição química da madeira varia de uma espécie para outra, porém os principais elementos presentes são o Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e pequenas quantidades de Nitrogênio. Estes elementos formam as denominadas estruturas macromoleculares Celulose, Hemicelulose e Lignina, que juntas constituem a parede celular. Outras substâncias minerais como Cálcio, Potássio e Magnésio, são encontrados em pequenas quantidades e são denominados de constituintes inorgânicos (KLOCK; et al, 2005).

As composições químicas das madeiras de folhosas e coníferas variam consideravelmente entre uma espécie e outra, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 - Média da composição química da madeira de coníferas e folhosas.

| Componentes               | Coníferas | Folhosas |
|---------------------------|-----------|----------|
| Celulose                  | 42%       | 47%      |
| Hemicelulose              | 25%       | 30%      |
| Lignina                   | 28%       | 20%      |
| Constituintes inorgânicos | 5         | 3        |

Fonte: (KLOCK; et al, 2005).

A celulose pode ser brevemente definida como um polímero linear de alto peso molecular, constituído por cadeias de glicose, organizada e parcialmente cristalina. É responsável pela constituição de quase a metade de toda a madeira de folhosas e coníferas, pois tem como função constituir a parede celular dos vegetais (KLOCK; et al, 2005).

As hemiceluloses tem função estrutural parecida com a da celulose, são constituídas de estruturas ramificadas amorfas, sendo encontradas em dois principais tipos, as xilanas e glucomananos (GONÇALVES, 2000).

A lignina destaca-se pela função de ligar com rigidez uma célula à outra como um "agente cimentante", é definida como um polímero aromático, heterogêneo, ramificado e amorfo (KLOCK; et al, 2005).

### 3.1.3 *Corymbia citriodora*

A madeira de *Eucalyptus* (antigo gênero no qual a espécie *Corymbia citriodora* se enquadrava) tem sido uma alternativa às madeiras nativas na indústria madeireira (PALMA; LEONELLO; BALLARIN, 2010), também possui potencial para utilização em movelaria, porém devido à grande variedade de espécies, deve-se relacionar um método para cada variedade (DIAS JUNIOR, 2013).

A densidade aparente de *Corymbia citriodora* determinada por Benjamin (2006) é de 980 kg/m<sup>3</sup> até 1180 kg/m<sup>3</sup> e a densidade básica média de 769 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.1.4 *Pinus elliottii*

A madeira de *Pinus* devido à sua característica de conífera, é indicada para aplicação na construção civil interna, para construção de forros, painéis e lambris (ZENID, 2009).

Com alto índice de reflorestamento, a madeira de *Pinus elliotti* tem sido cada vez mais empregado na substituição de madeiras nativas, pois possui características de baixa densidade, grã direita, e corte fácil, com facilidade para a sua usinagem e bom acabamento.

Segundo Pinheiro (2014) sua densidade aparente se apresenta em 480 kg/m<sup>3</sup> a 15% de umidade e densidade básica de 420 kg/m<sup>3</sup>.

## 3.2 MADEIRA TERMORRETIFICADA

Termorretificação é o processo no qual a madeira é submetida a temperaturas entre 100°C e 250°C com o objetivo de alterar algumas de suas características e diferenciá-la de sua madeira original em algumas propriedades com a finalidade de aplicações específicas (BRITO; GARCIA, 2006).

As aplicações das madeiras tratadas termicamente podem ser estruturais, acústicas, em compósitos, embalagens e também para a preservação da madeira. Sua comercialização e produção ocorre principalmente na Europa, com destaque à Holanda, Alemanha, França e Finlândia (XIE; LIU; SUN, 2002), (HILL, 2011).

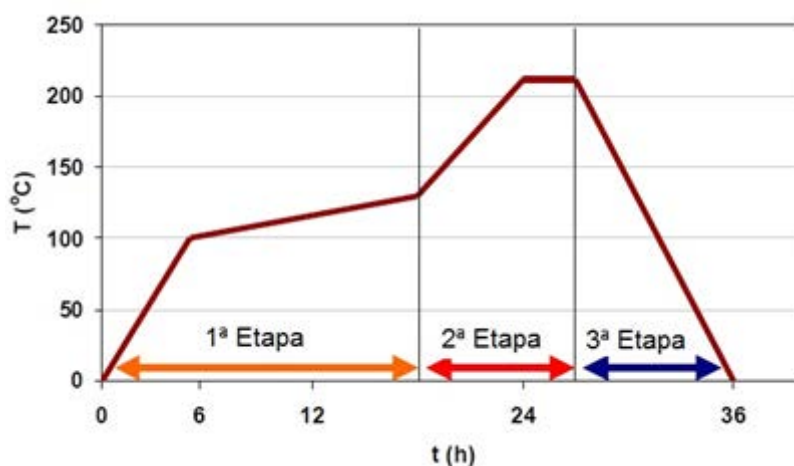
Os estudos do processo de termorretificação da madeira foram iniciados na década de 1930, mas podemos considerar como uma técnica nova, pois somente no final da década de

1990 que o processo industrial foi desenvolvido e aprimorado para escala industrial (CONFEDERATION OF FINNISH INDUSTRIES, 2007).

Calenonego (2009) afirma que os processos de termorretificação comerciais mais utilizados são o ThermoWood® Process na Finlândia, Retification® e Le Bois Perdure® na França, Plato-Process na Holanda e Oil-Heat-Treatment na Alemanha.

Segundo Finish ThermoWood Association (2003) o processo finlandês ThermoWood® Process consiste em três etapas. A primeira consiste no aumento gradual da temperatura até 100° C, é importante para a secagem residual de modo que não gere tensões internas na madeira que venham causar deformações no lenho. A segunda etapa consiste no tratamento intenso, ao qual a temperatura pode variar de 185°C a 225°C dependendo de sua utilização, juntamente com a adição de vapor para evitar que a madeira entre em combustão e evitar rachaduras. A terceira etapa consiste em refrigerar a madeira até atingir a temperatura e umidade ambiente para evitar tensões internas com a perda de temperatura. As etapas e a sua duração podem ser observadas no gráfico da Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de produção de madeira termorretificada através do processo ThermoWood®.



Fonte: Adaptado de Finish ThermoWood Association (2003).

Retification® é um dos processos franceses de termorretificação em apenas uma etapa, que consiste em usar madeira com teor de umidade de 12% e submeter a temperaturas entre 200°C e 240°C conforme a espécie e aplicação em câmaras de atmosfera controlada com nitrogênio e teor de oxigênio de 2% (ESTEVES; PEREIRA, 2009), (VERNOIS, 2001),

(MILITZ, 2002). É um processo bastante utilizado, mas devido a sua patente e segredo de produção, poucas informações são encontradas na literatura sobre este processo.

O outro processo francês é o Le Bois Perdure® que segundo Esteves e Pereira (2009) e Vernois (2001) permite utilizar madeira verde na primeira etapa, que consiste na secagem desse lenho em estufa, em seguida, a madeira é aquecida até a temperatura de 230°C sob a atmosfera do vapor gerado pela própria água da madeira. O tratamento pode ocorrer entre as temperaturas de 210°C a 240°C dependendo da qualidade preterida entre resistência mecânica (menor temperatura) ou durabilidade (maior temperatura).

O processo holandês denominado Plato-Process, segundo Esteves e Pereira (2009) e Militz e Tjeerdsma (2001) consiste em combinar a etapa de hidrotermólise com a etapa de cura a seco. A etapa de hidrotermólise a madeira é submetida a temperaturas de 160°C a 190°C com duração de três a cinco dias. Já a etapa de cura a seco, a madeira é submetida à temperaturas entre 170°C e 190°C em um tempo de quatorze a dezesseis horas, continuando o processo no condicionamento que leva de dois a três dias.

Segundo Esteves e Pereira (2009) o processo alemão é bastante diferente dos demais, pois utiliza óleo no processo, denominado de Oil-Heat-Treatment. Segundo Rapp e Sailer (2001), o processo é operado em temperaturas de 180°C a 220°C conforme a espécie da madeira, durabilidade e resistências pretendidas e ainda o consumo de óleo (quanto maior a temperatura, menor o consumo de óleo). Neste processo pode ser utilizado madeira verde que fica em contato com o óleo em um tempo de tratamento entre duas e quatro horas, podendo durar um total de até dezoito horas incluindo o tempo de limpeza e resfriamento.

### **3.2.1 Propriedades Químicas da Madeira Termorretificada**

O processo de submeter a madeira à ação do calor de forma que provoque transformações na estrutura da madeira é denominado de pirólise (BRITO; GARCIA, 2006).

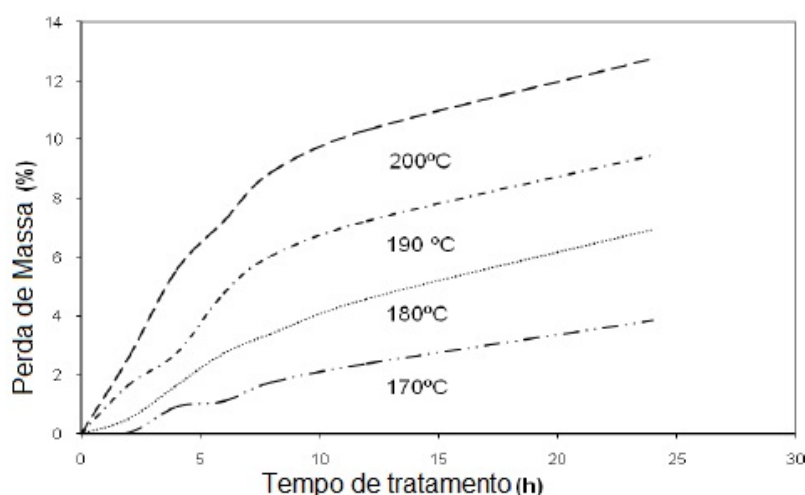
Durante o processo de pirólise a composição química de elementos de constituição do lenho, como as hemiceluloses, celulose e lignina são alteradas e degradadas, podendo ser verificado com a perda de sua massa (redução) que ocorre durante o processo de termorretificação.

Silva (2012) afirma que a madeira submetida à altas temperaturas, a estrutura da parede celular formada por camadas de celulose, hemiceluloses e ligninas passa a sofrer modificações,

onde observa-se que as hemiceluloses reagem formando ácido acético e as cadeias de celulose se dividem em partes menores, além de reações de desidratação e oxidação da celulose.

A perda de massa, varia conforme a espécie, a temperatura e o tempo de tratamento da madeira, como pode ser observado na Figura 7. Palermo (2010) determinou uma perda de massa de cerca de 13,90% na madeira termorretificada de *Eucalyptus grandis* a 180°C. Soratto (2012) constatou que a perda de massa no processo de termorretificação segue a mesma tendência independente do processo que seja utilizado. Calonego, Severo e Furtado (2008) verificaram uma perda de massa significativa para a madeira de *Eucalyptus grandis* quando submetido a temperaturas de tratamento térmico de 180°C a 220°C.

Figura 7 - Perda de massa da madeira de *Pinus pinaster* tratada termicamente em função do tempo e temperatura.



Fonte: Adaptado de Esteves, Domingos e Pereira (2008).

Guedira (1998) e Vovelle (1982) apud Brito e Garcia (2006) classificam a redução da madeira por pirólise em 5 fases, sendo que:

1ª - da temperatura ambiente a 100°C corresponde a fase onde há a saída de água livre e água da parede da célula retida no lúmen da parede celular.

2ª - 100°C a 250°C ainda há eliminação de água e parte dela denominada de higroscópica na parede celular junto as hidroxilas das cadeias de polissacarídeos e da lignina. Perde parte da água de constituição com degradação irreversível da madeira dos grupos hidroxílicos.

3ª - 250°C a 330°C degradação da hemicelulose

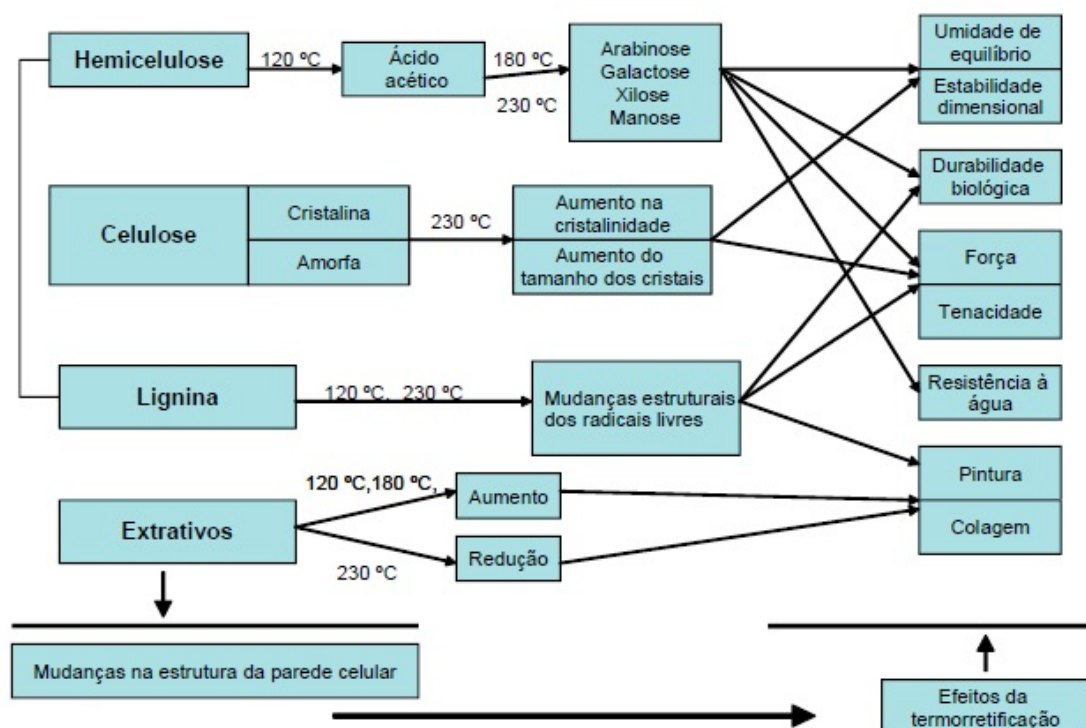
4ª - 330°C a 370°C se supõe a degradação da celulose

5ª - acima de 370°C ligada a degradação da lignina, produção de carvão vegetal

A temperatura utilizada no processo de termorretificação está na faixa entre 100°C e 250°C (PINCELLI, 2011), o qual resulta em um produto sólido com características diferenciadas em relação a madeira original a partir da pirólise.

Soratto (2012) apresenta no fluxograma da Figura 8 uma relação geral da temperatura com as alterações químicas que ocorrem quando a madeira é submetida ao tratamento térmico, relacionando com as propriedades físicas e tecnológicas da madeira.

Figura 8 - Fluxograma dos mecanismos de reação da madeira tratada termicamente.



Fonte: Soratto (2012).

Poubel (2011) verificou que o processo de termorretificação promoveu alterações químicas na madeira, apresentando maior teor de lignina e menor teor de celulose e hemicelulose, devido a degradação dos polímeros durante o processo.

Kocaefe et al. (2010) realizaram análise termogravimétrica (análise da variação de massa com atmosfera e temperatura controladas) em madeira de *Jack Pine*, onde observou que as hemiceluloses são propensas à degradação durante o tratamento térmico, enquanto a celulose e lignina são pouco degradadas. A degradação das hemiceluloses causa a liberação de ácidos orgânicos que influenciam a redução em grupos de hidroxilas (OH) e a clivagem da lignina. A diminuição nos grupos hidroxilas resulta na redução da absorção de água pela madeira.

O teor de extrativos da madeira termorretificada é aumentado em temperaturas entre 120°C a 180°C e sofre decréscimo quando a temperatura de tratamento é de 230°C (POUBEL; et al, 2013).

Yildiz, Gezer e Yildiz (2006) realizaram análise química do teor de lignina, celulose e hemicelulose para diferentes temperaturas de tratamento térmico e diferentes tempo de tratamento para a madeira de *Spruce*, podendo ser verificado no Quadro 2.

Quadro 2 - Composição da madeira de *Spruce* em função da temperatura e tempo de tratamento térmico.

| Temperatura (°C) | Duração (h) | Celulose (média %) | Hemicelulose (média %) | Lignina (Média %) |
|------------------|-------------|--------------------|------------------------|-------------------|
| 130              | 2           | 57.52              | 13.67                  | 27.68             |
|                  | 6           | 55.41              | 11.99                  | 30.10             |
|                  | 10          | 55.85              | 10.64                  | 30.09             |
| 150              | 2           | 56.59              | 10.35                  | 28.14             |
|                  | 6           | 57.24              | 9.77                   | 28.60             |
|                  | 10          | 56.32              | 8.38                   | 28.60             |
| 180              | 2           | 56.21              | 8.21                   | 28.44             |
|                  | 6           | 56.19              | 6.02                   | 30.55             |
|                  | 10          | 55.45              | 2.66                   | 32.21             |
| 200              | 2           | 55.27              | 3.37                   | 31.37             |
|                  | 6           | 54.46              | 2.06                   | 34.03             |
|                  | 10          | 50.39              | 1.99                   | 39.40             |
| Controle         |             | 54.12              | 21.45                  | 24.37             |

Fonte: Yildiz, Gezer e Yildiz (2006)

Esteves et al (2013) verificaram que nas madeiras de *Eucalyptus globulus* e *Pinus pinaster* a hemicelulose é o primeiro componente a se degradar com a termorretificação. A lignina é o segundo componente a se degradar, ocorrendo com maior intensidade em folhosas em relação as coníferas devido às perdas de unidades por desmetoxilação.

Os resultados de Esteves et al (2013) conferem com o Quadro 2 de Yildiz, Gezer e Yildiz (2006) podendo-se então considerar um padrão da degradação dos constituintes da madeira submetida ao tratamento térmico.

Após o tratamento térmico, Kocaefe et al (2013) verificaram que a lignina é componente que tem maior degradação por ação das intempéries, promovendo então um aumento do teor de celulose na superfície da madeira termorretificada.

### 3.2.2 Propriedades Físicas de Madeira Termorretificada

A termorretificação causa diversas alterações nas propriedades físicas da madeira, estas alterações estão relacionadas com a espécie da madeira, temperatura de tratamento e tempo de exposição. A seguir relatamos as principais alterações nas propriedades físicas relatadas na literatura.

A densidade da madeira é um dos principais parâmetros indicadores de sua qualidade. Verifica-se na literatura que a densidade da madeira termorretificada tem a tendência de diminuir conforme o aumento da temperatura de tratamento térmico, assim como o aumento do tempo de exposição (POUBEL; et al, 2013).

Segundo Soratto (2012), a densidade básica de *Eucalyptus* não teve diferença significativa em relação à testemunha quando submetido a temperaturas de termorretificação de 140°C, 180°C e 220°C.

Gündüz, Korkut e Korkut (2008) verificaram que a madeira de *Camiyani Black Pine* diminui em até 14% a sua densidade quando termorretificada com a temperatura de 180°C.

Kesik et al (2014) encontraram a diminuição da densidade das madeiras de *Robinia pseudoacacia* L., *Junisperus oxycedrus* L. *Prumus domestica* L. e *Alnus glutinosa* L. em comparação com a testemunha para temperaturas de termorretificação de 130°C e 160°C, além da diminuição da densidade em função do aumento do tempo de tratamento de 3h para 7h. Gunduz et al (2009) verificaram que a densidade da madeira de *Carpinus betulus* diminui com o aumento da temperatura de tratamento térmico.

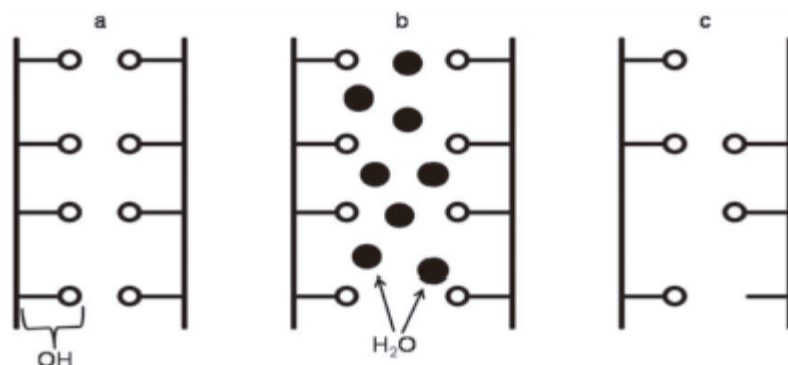
A biodegração é problema muito recorrente no material madeira, pois fungos, brocas e insetos utilizam o seu lenho para o seu desenvolvimento, degradando e decompondo assim o material. A madeira termorretificada tem demonstrado bons resultados na resistência deste tipo de degradação (KANDEM; PIZZI, 2002), (CAO; et al, 2011).

Euflosino (2012) verificou maior resistência à biodegradação causada por cupins tanto para a conífera *Pinus taeda* e para a folhosa *Corymbia citriodora*, quanto maior a temperatura do tratamento, maior é a resistência.

A higroscopicidade é a propriedade que a madeira possui de absorver água do ambiente. Madeiras termicamente tratadas demonstram diminuição da absorção de água devido à degradação de seus componentes químicos. Por consequência da menor absorção de água, a madeira termorretificada tem apresentado maior estabilidade dimensional, pois o inchamento de suas fibras é atenuado.

Fabiyi e Ogunleye (2015) afirmam que o fato da madeira absorver menos água se deve à eliminação de grupos hidroxilas durante o processo de pirólise. Os grupos hidroxilas facilitam a absorção de água, como mostrado no esquema da Figura 9.

Figura 9 - (a) Parede celular com grupos OH (hidroxilas) não tratados termicamente, (b) ligação de moléculas de água  $H_2O$  aos grupos OH, (c) parede celular tratada termicamente.



Fonte: (FABIYI; OGUNLEYE, 2015)

Modes (2010) verificou que a madeira de *Eucalyptus grandis* tratada termicamente possui menor absorção de água, Menezes (2014) encontrou efeito análogo para as madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Corymbia citriodora*.

Anjos (2014) verificou que a termorretificação causou aumento da estabilidade dimensional, menor umidade de equilíbrio na reumidificação e perda de massa nas madeiras de folhosas nativas da Amazônia, assim como ocorre com as madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus*, porém com taxas diferenciadas devido à peculiaridade das espécies nativas.

Para Brito et al (2006) a retratibilidade apresentou-se 25% menor à temperatura de 200°C, para temperaturas inferiores não houve efeito significativo da termorretificação na retratibilidade.

Poubel (2011) comparou o inchamento longitudinal em madeira de compressão e madeira normal após a termorretificação, observando um aumento significativo do inchamento em madeira de compressão.

Esteves, Domingos e Pereira (2008) encontraram aumento da estabilidade dimensional para *Pinus pinaster* termicamente tratado termicamente a 170°C e 200°C, assim como o fator de anisotropia. Diminuição do equilíbrio térmico devido a degradação das hemiceluloses e celulose amorfa.

A estabilidade dimensional de madeiras termorretificadas de *Pinus caribea* se apresentou de forma mais estável em comparação a madeiras sem o tratamento (POUBEL,

2011). tanto para a madeira de compressão, quanto para a madeira normal (POUBEL; et al, 2013), (ARAÚJO, 2010).

Oliveira (2009) encontrou maior hidrofobicidade tanto para madeiras de folhosas quanto de coníferas tratadas termicamente, pelo fato do aumento da cristalinidade da superfície das amostras com o aumento da temperatura, detectado a partir de técnicas de espectroscopia de infravermelho e espalhamento de raios-x.

Gündüz, Korkut e Korkut (2008) verificaram que a absorção de água pela madeira de *Camiyani Black Pine* termicamente tratada é diminuída com a intensificação da temperatura de tratamento.

Os teores de umidades de equilíbrio das madeiras termorretificadas apresentam-se significativamente menores em relação a madeiras não tratadas termicamente (POUBEL; et al, 2013), (DELUCIS, 2014), (SORATTO, 2012) e (LOPES, 2012). Menezes et al (2014) verificaram o mesmo efeito da redução da umidade de equilíbrio para as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* termorretificados em temperaturas de 140°C e 180° C.

Cademartori et al (2012) e Cademartori (2012) verificaram que o processo de termorretificação de *Eucalyptus grandis* a 200°C e 240°C permitiu a redução da higroscopicidade e a elevação da estabilidade dimensional, acompanhado da perda de massa.

Devido a redução da higroscopicidade, Vital et al (2014) analisaram o uso das fibras de madeira termorretificada na construção de painéis colados, obtendo um desempenho dentro do desejável.

As madeiras termorretificadas apresentaram diferentes taxas de perda de peso, para cada temperatura de tratamento. A perda de massa da madeira em tratamentos térmicos se relaciona com a perda da resistência mecânica, devido a degradação de alguns polímeros de constituição da madeira (MOURA; BRITO; BORTOLLETO JÚNIOR, 2012). Para temperaturas de 200°C a madeira apresentou uma perda de peso próxima de 10% e para o tratamento a 220°C uma perda de aproximadamente 20% (POUBEL, 2011), (POUBEL; et al, 2013).

Moura, Brito e Bortoletto Junior (2012) avaliaram a perda de massa das madeiras submetidas à termorretificação em ambiente com a presença de oxigênio e em ambiente com escassez de oxigênio em três temperaturas diferentes, 140°C, 180°C e 200°C para as madeiras de *Pinus caribea* e *Eucalyptus grandis*. A madeira de *Eucalyptus grandis* apresentou maior perda de massa em comparação ao *Pinus caribea* em todas as faixas de temperatura, na presença e ausência de oxigênio. Nos ambientes controlados, verifica-se uma menor perda de peso quando a madeira é submetida a condição de escassez de oxigênio.

A cor da madeira termorretificada, se apresenta mais escura após o tratamento (HUANG; et al, 2012) podendo a intensidade variar conforme a temperatura do tratamento, tempo de exposição e espécie da madeira.

Moura e Brito (2011) avaliaram o efeito da termorretificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribea*, verificando um escurecimento considerável no lenho, de maneira desejável, podendo agregar maior valor na madeira por assemelhar-se com a cor de madeiras tropicais. Poubel (2011), Moura e Brito (2011) verificaram um escurecimento mais acentuado na madeira de *Pinus caribea*, para tratamentos a partir de 220°C, Zanuncio, Farias e Silveira (2014) observou que a termorretificação também é um método adequado para a alteração da cor de *Eucalyptus grandis*. Pincelli, Moura e Brito (2012) afirmam que o tratamento térmico para madeiras de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribea*, pode representar um maior valor agregado devido à coloração por eles apresentados. Cadermatori (2012) encontrou o mesmo efeito do escurecimento para as madeiras de *eucalipto* com o aumento da temperatura de termorretificação.

Lopes (2012) realizou um estudo sobre a alteração de cor na madeira de *Tectona grandis* L. f. no qual observou o escurecimento da madeira com o aumento da temperatura de tratamento como pode ser observado na Figura 10. Verificou um escurecimento mais acentuado na região do cerne em relação ao alburno, e maior estabilidade da cor, quando a madeira submetida a radiação UV (ultra-violeta) na temperatura de 180°C.

Figura 10 - Madeira de *Tectona grandis*; (A) madeira original, (B) tratada a 180°C e (C) tratada a 200°C.



Fonte: Lopes (2012).

Kocaefe e Saha (2012) verificaram que a alteração da cor da madeira termorretificada submetida à exposição de raios UV (ultra-violeta) pode ser atenuada com a utilização de aditivos na superfície na madeira.

Huang et al (2013) verificaram que a madeira de *Betule papyrifera* tratada termicamente ofereceu maior resistência a intempéries, pois a parede celular apresenta-se com maior teor de lignina e celulose cristalinas, aumentando assim a sua resistência estrutural. Tomak et al (2014) afirmam que a resistência a intempéries da madeira termorretificada é influenciada pela espécie, temperatura e tempo de tratamento térmico.

Moura e Brito (2011) submeteram *Pinus caribea* a termorretificação e verificaram que a madeira apresentou extravasamento de resina após o tratamento, fazendo assim aparecerem manchas indesejáveis, sendo corrigidas através de aplainamento, tornando a cor homogênea.

Pincelli, Brito e Corrente (2002) avaliaram a interação madeira/adesivo na linha de cola e constataram que não há redução significativa para a madeira de *Eucalyptus siligna* e *Pinus caribaea*, embora ocorra diminuição do módulo de cisalhamento com o aumento da temperatura da retificação térmica.

### **3.2.3 Propriedades Mecânicas de Madeira Termorretificada.**

As propriedades mecânicas da madeira termorretificada variam conforme a temperatura do tratamento e a espécie da madeira utilizada (BORREGA; KÄRENLAMPI, 2007).

Diversos estudos, tem apontado que o processo de termorretificação em madeiras resulta na diminuição das propriedades mecânicas importantes, como resistência à flexão, cisalhamento e compressão (MOURA; BRITO; BORTOLLETO JÚNIOR, 2012).

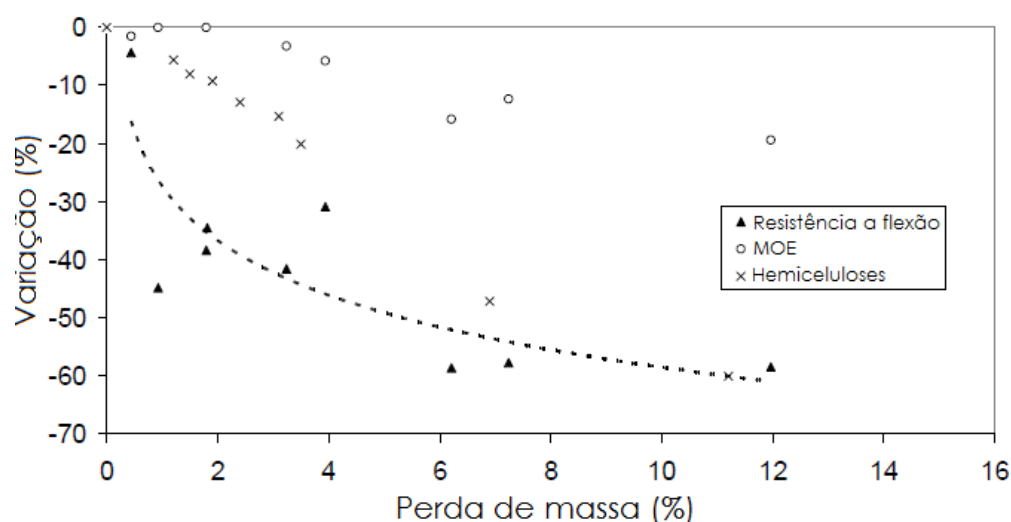
Na resistência à compressão paralela das espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribea*, não ocorre alteração significativa para termorretificação até a faixa de 200°C (MOURA; BRITO; BORTOLLETO JÚNIOR, 2012).

Paula et al (2014) verificaram que a madeira de *Corymbia citriodora* submetido ao tratamento térmico, tem a resistência de compressão paralela às fibras diminuída tanto pelo acréscimo da temperatura quanto pelo tempo de tratamento

Segundo Esteves, Domingos e Pereira (2008) a resistência à flexão diminuiu quando também diminuído o teor de hemiceluloses com as reações de oxidação durante o processo de termorretificação. Na Figura 11 pode-se observar a variação do módulo de elasticidade (MOE),

da resistência à flexão e o teor de hemiceluloses em função da perda de massa da madeira de *Pinus pinaster* tratada termicamente.

Figura 11 - Variação da resistência à flexão, módulo de elasticidade (MOE) teor de celulose de *Pinus pinaster* em função da perda de massa.



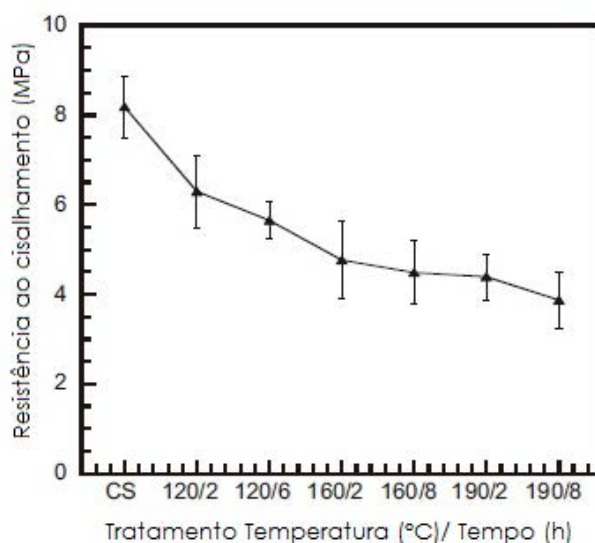
Fonte: Adaptado de (ESTEVES; DOMINGOS; PEREIRA, 2008)

Tiryaki e Aydin (2014) construíram um modelo de rede neural para prever o módulo de resistência à compressão paralela para as madeiras de *Oriental spruce*, *Scots pine*, *Anatolian chestnut* e *Oriental beech*, o qual não destoou dos resultados experimentais, evidenciando a diminuição da resistência com o aumento da temperatura e o tempo de tratamento térmico.

A resistência ao cisalhamento em madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus Caribea*, demonstrou uma diminuição considerável nas madeiras tratadas termicamente, sendo mais acentuada em *Eucalyptus* quando comparado ao *Pinus* (MOURA; BRITO; BORTOLLETO JÚNIOR, 2012).

Kasemsiri, Hiziroglu e Rimdusit (2012) verificaram que a resistência ao cisalhamento da madeira de *Juniperus virginiana L.* é reduzida conforme a temperatura de tratamento é aumentada, como mostrado no gráfico da Figura 12. Esta redução das propriedades mecânicas da madeira se deve à redução de sua massa e constituintes químicos durante o tratamento térmico, o que leva a despolimerização e redução do teor de hemicelulose.

Figura 12 - Resistência ao cisalhamento em função da temperatura/tempo de tratamento de *Juniperus virginiana* L.



Fonte: Adaptado de Kasemsiri, Hiziroglu e Rimdusit (2012)

A resistência a flexão nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus Caribea*, termicamente tratadas demonstraram uma diminuição considerável quando o processo de tratamento térmico ocorre acima de 180°C (MOURA; BRITO; BORTOLLETO JÚNIOR, 2012). Para a madeira de *spruce*, a resistência a flexão chega a diminuir em até 50% quando tratada a temperaturas entre 100°C e 200°C (BEKTHA; NIEMZ, 2003).

O módulo de elasticidade da madeira de *spruce* tratada termicamente com temperaturas entre 100°C e 200°C pode sofrer uma redução de 4% a 9% (BEKTHA; NIEMZ, 2003). Soratto (2012) verificou uma diminuição significativa no módulo de elasticidade (MOE) e do módulo de ruptura (MOR) da madeira de *Eucalyptus* a uma temperatura de tratamento térmico de 220°C. A madeira de *Betula papyrifera* demonstrou redução do MOE com o aumento da temperatura do tratamento térmico (LEKOUNOUGOU; et al, 2011).

A madeira de *Picea sitchensis* Carr. demonstrou um aumento do módulo de elasticidade nas primeiras 4h de tratamento térmico, seguido da diminuição do módulo de elasticidade nas próximas 12h do tratamento a temperatura de 160°C, a diminuição foi atribuída à diminuição significativa de hidrogênio na atmosfera da estufa de tratamento, propiciando alterações na estrutura do lenho (KUBOJIMA; OKANO; OHTA, 2000). As madeiras de aspen e birch sofreram um aumento em 15% e 30% respectivamente no MOE em relação ao controle, quando tratados termicamente a 200°C (SHI; KOCAEFE; ZANG, 2007)

Korkut et al (2008) verificaram uma diminuição nas propriedades mecânicas da madeira: resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, resistência ao impacto e dureza janka, quando aumentada a temperatura de tratamento térmico da madeira de *Red-bud maple*, as mesmas características forma observadas por Korkut e Aytin (2015) para a madeira de *Prunus avium* termicamente tratada pelo processo Thermowood®.

Silva e Molina (2012) avaliaram o efeito da termorretificação na resistência e rigidez para a madeira de *Corymbia citriodora*, constatando uma variação não significativa da rigidez em relação à temperatura do tratamento térmico, mas a atenuação da resistência com o aumento da temperatura da retificação térmica.

Palermo (2010) verificou que não houve alteração da dureza Janka, uma diminuição significativa para a madeira de *Eucalyptus grandis* termorretificado à 180°C. Soratto (2012) verificou a tendência na diminuição da dureza Janka com o aumento da temperatura de tratamento da madeira de *Eucalyptus*.

### 3.3 USINAGEM

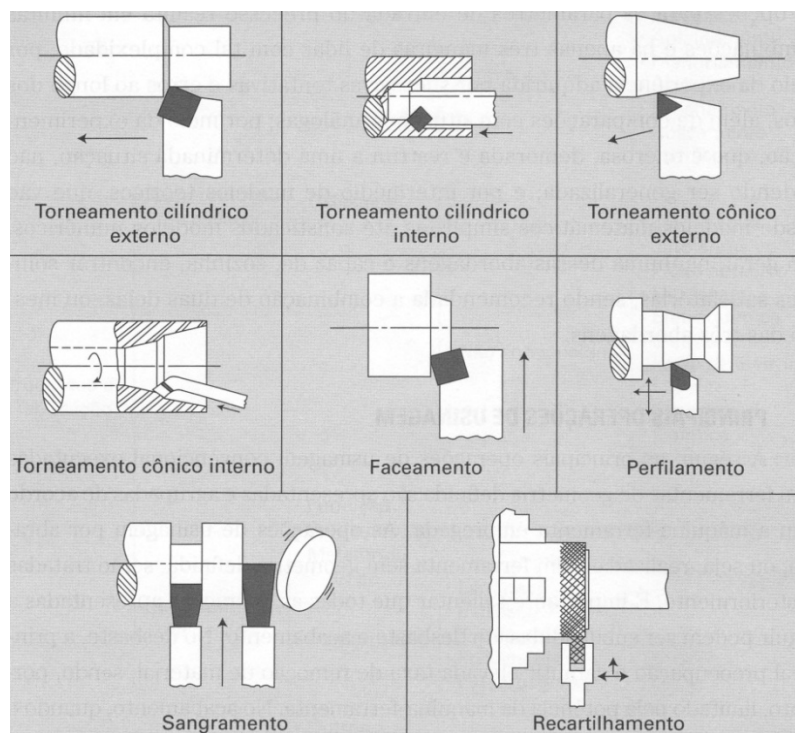
A usinagem é definida como um processo complexo e simples ao mesmo tempo, no qual se produzem peças removendo o excesso de material na forma de cavaco (FERRARESI, 1977), sendo este um dos métodos de fabricação mais empregados.

O corte de materiais é imprevisível devido as muitas variáveis contidas no processo, como tipo de material, ferramenta empregada, tipo de corte, velocidade entre muitos outros, porém, a usinagem deve ser estuda de forma a diminuir estas imprevisibilidades.

As principais operações da usinagem consistem primeiramente no desbaste, o qual o principal objetivo é a remoção de material e logo após as operações de acabamento que consistem na operação com o objetivo de remover material para a obtenção da qualidade final da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Dentre as diversas operações de usinagem a de torneamento é uma das principais, o qual consiste em girar a peça em torno de seu eixo, e a ferramenta de corte realizar os movimentos de avanço longitudinal ou transversal para a remoção de material e conferir forma à peça (MACHADO et al., 2011). As principais operações executadas no torno são mostradas na Figura 13.

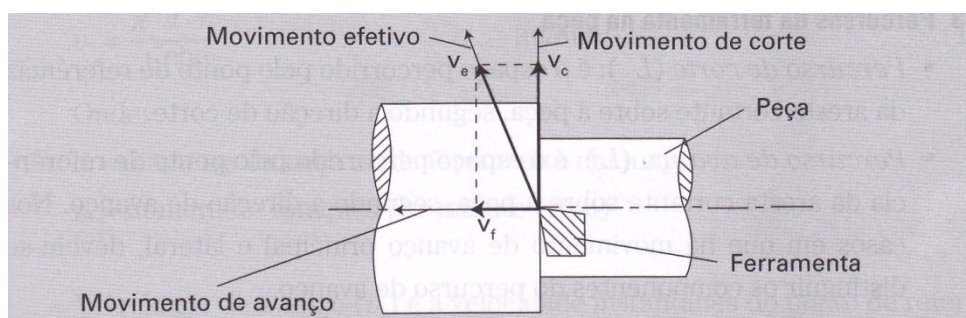
Figura 13 - Principais operações executadas no torno.



Fonte: (MACHADO et al., 2011)

No torneamento os movimentos que retiram o cavaco são a direção de corte: direção instantânea do movimento de corte, a Direção de Avanço: direção instantânea do movimento de avanço e a Direção Efetiva: direção instantânea do movimento efetivo de corte (MACHADO et al., 2011), que estão representadas na Figura 14.

Figura 14 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo torneamento.



Fonte: (MACHADO, et al 2011)

O movimento de corte está relacionado com a volta dada no material bruto ou na ferramenta para remover o material localizado neste percurso. O movimento de avanço possibilita a retirada de material nas voltas seguintes. O movimento de profundidade permite a regulação do corte, este movimento é realizado a cada passe feito (SENAI, 2008).

A velocidade de corte ( $v_c$ ) corresponde a velocidade instantânea no ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. Esta velocidade depende da ferramenta que será utilizada, do tipo da usinagem aplicada, do material e da ferramenta empenhada (NOVASKI, 2013) e é expressa em m/min.

A velocidade de avanço ( $v_f$ ) corresponde à velocidade de avanço da ferramenta na direção do movimento de avanço, o seu valor é comumente expresso em mm/min.

A madeira foi um dos primeiros materiais a ser usinado, devido a sua disponibilidade na natureza.

Para Braga (2011) o ajuste correto dos parâmetros de corte e usinagem da madeira são fundamentais para a obtenção de produtos de maior qualidade, menor consumo de energia e maior durabilidade da ferramenta utilizada.

A qualidade da usinagem está diretamente relacionada com o tipo de equipamento utilizado, desgaste da ferramenta, vibração da máquina, parâmetros de usinagem como velocidade de avanço e velocidade de corte (BET, 1999).

### **3.3.1 Ferramentas**

Dependendo das características da ferramenta onde se destacam a geometria e o material de sua construção, diversos resultados podem ser afetados, como a vida útil da ferramenta, produtividade e a qualidade da peça usinada. (LUCAS FILHO, 2004).

A ferramenta de corte deve possuir diversas propriedades diferentes com o objetivo de atender as diversas solicitações de corte, porém nenhuma das ferramentas disponíveis no mercado atendem a todas as propriedades necessárias no processo de usinagem, devendo então existir uma seleção específica para cada operação com determinado material (LUCAS FILHO, 2004), (MACHADO et al, 2011).

Na seleção de uma ferramenta de corte deve-se levar em consideração os fatores da natureza do material a ser usinado, tipo de operação, condições e modelo da máquina, forma e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, emprego de lubrificação ou refrigeração e demais condições de usinagem (GONÇALVES, 2010).

### 3.3.1.1 Geometria da ferramenta

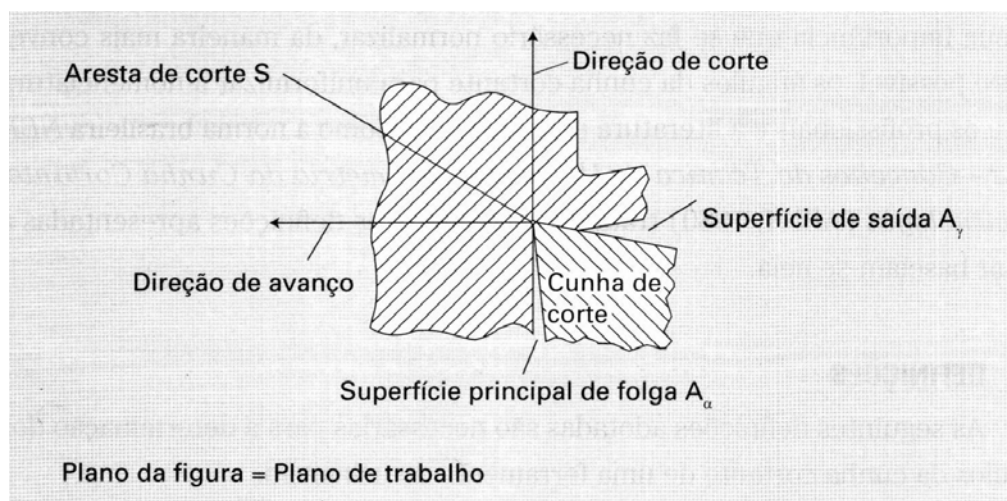
Machado et al (2011) adotam algumas definições acerca da geometria da ferramenta de usinagem para a determinação do ângulo da cunha cortante:

Superfície de saída ( $A_\gamma$ ) - define-se como a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se move.

Superfície de folga - compreende-se como a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície de usinagem. Nota-se superfície de folga principal como  $A_\alpha$  e a superfície de folga secundária como  $A_\alpha'$ .

Na Figura 15 pode-se verificar a os elementos da cunha cortante para uma ferramenta qualquer.

Figura 15 - Cunha de corte da ferramenta.

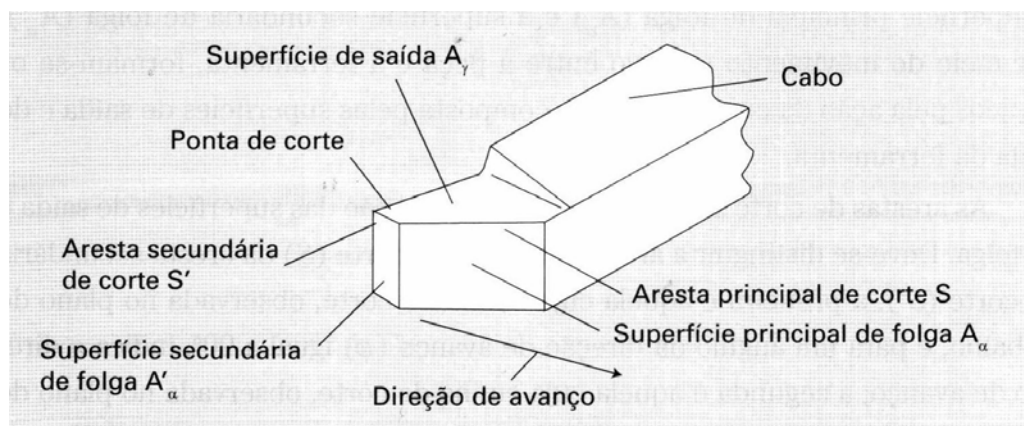


Fonte: (MACHADO, et al 2011).

Para Machado et al (2011) a intersecção das superfícies de saída e de folga define a aresta de corte. Aresta principal de corte (S) é aquela cuja a cunha de corte quando observa em um plano de corte possui um ângulo de avanço igual a  $90^\circ$  indicando a direção do avanço. A aresta secundária de corte (S') é aquela que no plano de corte a um ângulo de avanço igual a  $90^\circ$  indica à direção contrária do avanço.

A ponta de corte é a intersecção das arestas principal e secundária. A Figura 16 representa os elementos da cunha de uma ferramenta de tornear.

Figura 16 - Elementos da cunha de corte de uma ferramenta de torneiar.



Fonte: (MACHADO, et al 2011).

### 3.3.2 Materiais das Ferramentas de Corte.

A retirada de material no processo de usinagem se dá pela dinâmica de se utilizar uma ferramenta com um material mais duro do que o da peça. Diversos novos materiais foram produzidos com o intuito de se conceber ferramentas que atendam as diversas condições de usinagem com os mais diferentes materiais.

Segundo Lucas Filho (2004) e Machado et al. (2011) as principais propriedades desejadas em um material de ferramenta de corte são: alta dureza, tenacidade, resistência ao desgaste, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, propriedades mecânicas mantidas em meio a temperaturas elevadas de trabalho, resistência ao choque térmico, resistência ao impacto e resistência à oxidação (inerte quimicamente).

As propriedades desejáveis não são encontradas todas em um único material, mas conforme a aplicação da ferramenta, são desejáveis que prevaleçam algumas propriedades em relação às outras, tendo então que optar por uma que prevaleça.

#### 3.3.2.1 Aço Carbono

Aços Carbonos e Aços Ligados, eram os principais materiais utilizados nos primórdios da usinagem, com o desenvolvimento de materiais mais resistentes foram sendo substituídos, embora, encontre-se a sua aplicação hoje em usinagens de baixa velocidade de corte e em ferramentas de conformação, uma de suas principais limitações é que a sua dureza é reduzida

quando são aquecidos à faixa de temperatura de 300°C a 600°C. Callister (2012) define aço carbono como uma liga ferrosa onde o carbono é o principal elemento da liga.

#### 3.3.2.2 Aço Rápido

Os Aços Rápidos são considerados como o primeiro material com impacto significativo para a construção de ferramentas de corte, pois a sua velocidade de corte pode superar em dez vezes os Aços Carbonos e Aços Ligados, embora comparado com materiais hoje utilizados, essas velocidades são extremamente baixas, mas ainda com muitas aplicações em brocas, fresas, cossinetes, brochas e em torneamentos de peças de diâmetros reduzidos com baixa velocidade de corte. Diferentemente dos outros aços que apresentam uma queda da dureza quando são aquecidos, os Aços Rápidos apresentam uma elevação da dureza quando revenidos na faixa de temperatura de 480°C a 565°C. Para aumentar a tempo de vida da ferramenta e maiores velocidades de corte têm-se usado Aço Rápido com Revestimento conhecido como PVD (*Physical Vapour Deposition*).

#### 3.3.2.3 Ligas Fundidas

As Ligas Fundidas correspondem a um grupo de materiais de ferramentas de corte mais duras que o aço rápido, além de manter esta dureza por temperaturas mais elevadas, consequentemente elevando a velocidade de corte em 25%. As ligas fundidas têm sido cada vez menos utilizadas, pois a escassez da matéria prima e seu alto valor a torna menos competitiva em relação a materiais que a superam e com menor custo.

#### 3.3.2.4 Metal Duro

As ferramentas de metal duro são aplicadas em cerca de 50% das operações de usinagem devido ao seu custo, dureza, resistência ao desgaste e tenacidade, podendo aplicar estas ferramentas em altas velocidades de corte (SOUZA, 2011). São fabricadas a partir da metalurgia do pó e de grande aplicação nos mais diferentes materiais e processos como fresamento, rosqueamento e torneamento.

As diversas propriedades encontradas no metal duro, só é possível devido à possibilidade de variação de sua composição, adquirindo assim propriedades específicas para cada tipo e característica da operação de usinagem desejada.

Segundo Callister (2012) o metal duro é formado por carboneto, responsável por dar dureza e resistência ao desgaste e também por um aglomerante normalmente cobalto responsável pela tenacidade do material. Segundo Souza (2011) além desses materiais de composição, outros componentes foram adicionados ao longo do tempo, como o carbeto de tântalo (TaC) e carboneto nióbio (NbC) que provêm um significativo aumento à tenacidade e carbonetos de titânio (TiC) que provem um aumento na resistência à craterização, aumentando então a resistência ao desgaste da ferramenta em cada tipo de material usinado.

É mostrado no Quadro 3 a classificação das ferramentas de metal duro quanto à norma ISO 513/2004, a qual designa uma letra quanto à classe acompanhado de um número que corresponde a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta.

Quadro 3 - Classificação das ferramentas de metal duro.

| Principais classes                                                                               |                      |                                                                                                                           | Classes de aplicação                   |                                 |   |   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Letra de Identificação                                                                           | Cor de Identificação | Materiais a serem usinados                                                                                                | Metais duros                           |                                 | a | b |
| P                                                                                                | Azul                 | Aços: todos os tipos de aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica                                  | P01<br>P10<br>P20<br>P30<br>P40<br>P50 | P05<br>P15<br>P25<br>P35<br>P45 | ↓ | ↑ |
| M                                                                                                | Amarelo              | Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico, aço duplex e aço fundido                                                      | M01<br>M10<br>M20<br>M30<br>M40        | M05<br>M15<br>M25<br>M35        | ↑ | ↓ |
| K                                                                                                | Vermelho             | Ferro fundido: ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável                       | K01<br>K10<br>K20<br>K30<br>K40        | K05<br>K15<br>K25<br>K35        | ↑ | ↓ |
| N                                                                                                | Verde                | Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos                                       | N05<br>N10<br>N20<br>N30               | N05<br>N15<br>N25               | ↑ | ↓ |
| S                                                                                                | Marrom               | Superligas de titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio | S01<br>S10<br>S20<br>S30               | S05<br>S15<br>S25               | ↑ | ↓ |
| H                                                                                                | Cinza                | Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados                                | H01<br>H10<br>H20<br>H30               | H05<br>H15<br>H25               | ↑ | ↓ |
| a - Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta |                      |                                                                                                                           |                                        |                                 |   |   |
| b - Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta                           |                      |                                                                                                                           |                                        |                                 |   |   |

Fonte: ISO 513/2004.

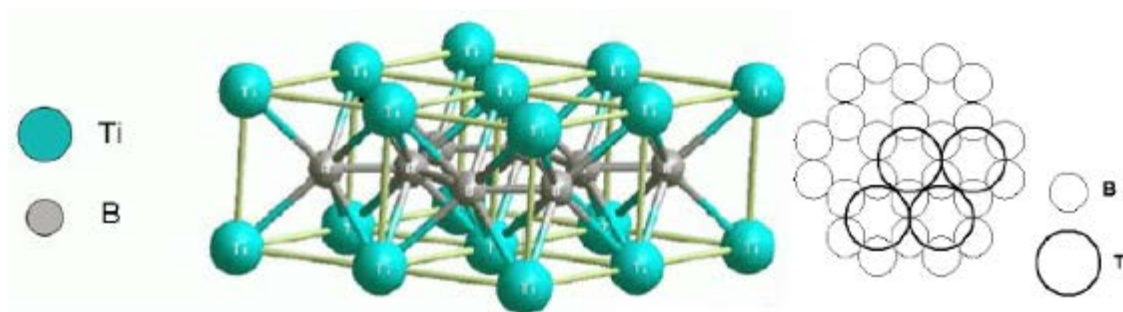
### 3.3.2.5 Metal Duro com Revestimento

O revestimento de ferramentas de metal duro é bastante importante, pois pode garantir desempenho superior na usinagem, além de propiciar um custo mais acessível a esses materiais. O Metal Duro permite que as ferramentas deste material possam receber o processo PVD e também o CVD (Chemical Vapour Deposition) que utiliza temperaturas elevadas, não implicando em alterações metalúrgicas no metal duro (MACHADO, et al, 2011).

Entre os revestimentos mais utilizados nas ferramentas de Metal Duro, encontramos TiC (Carboneto de Titânio), TiN (Nitreto de Titânio), filmes de diamante e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Óxido de Alumínio).

O  $\text{TiB}_2$  ou diboreto de titânio é um novo revestimento que aos poucos tem sido introduzido no mercado, consiste em um composto cerâmico de estrutura hexagonal onde os átomos de boro formam uma rede ligada covalentemente na matriz do titânio como ilustrado na Figura 17 (CABRAL, 2012).

Figura 17 - Rede hexagonal de átomos de boro na matriz de titânio



Fonte: (CABRAL, 2012).

Entre os compostos de titânio-boro, este é um dos estáveis, como material não é encontrado na natureza, mas pode ser sintetizado a partir do tratamento térmico do  $\text{TiO}_2$  e o  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Sua estrutura permite que seja bom condutor térmico elétrico, devido à alta mobilidade eletrônica na sua estrutura (CABRAL, 2012).

A potencialidade para aplicações tecnológicas deste material deve-se a sua alta dureza e propriedades tais como, alto ponto de fusão, coeficiente de expansão térmica relativamente baixo ( $4,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) e baixa resistividade elétrica (SOARES, 2003).

As propriedades de trabalho em altas temperaturas são o destaque deste material, como elevada dureza (33 GPa para um monocristal) e estabilidade química, suas propriedades estão

expressas no Quadro 4. Devido à sua alta dureza, considerável resistência mecânica e boa resistência ao desgaste, é bastante indicado para ser usado como revestimento protetor de ferramentas de corte e disco rígido magnético (ZHAO, 2014).

Quadro 4 - Propriedades físicas e mecânicas típicas do TiB<sub>2</sub> à temperatura ambiente.

| Propriedades                   | Valores       |
|--------------------------------|---------------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | 4,48          |
| Parâmetro de rede (nm)         | 0,3028/0,3228 |
| Ponto de Fusão (°C)            | 3325±25°C     |
| Limite de Resistência (MPa)    | 410-448       |
| Dureza (GPa)                   | 33            |
| Módulo de Elasticidade (GPa)   | 510-575       |
| Condutividade térmica (W/mK)   | 110           |

Fonte: Adaptado de Cabral (2012).

### 3.3.3 Usinagem de Madeira

A madeira foi um dos primeiros materiais a serem usinados devido a sua disponibilidade no meio ambiente. Embora seja um material muito utilizado, ainda existe muito a ser estudado nesta área, pois devido a sua variabilidade, para cada processo existem diversos parâmetros que afetam a usinagem para conceber qualidade a peça.

Verifica-se na literatura que os trabalhos de usinagem de madeira no Brasil estão focado nas madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, por serem estas, a maior parte do reflorestamento nacional.

Mas encontra-se alguns trabalhos pioneiros de desenvolvimento de métodos ótimos de usinagem para madeiras pouco utilizadas como Braga et al (2014) em madeira de *Coffea arabica*, madeira do cafeeiro, pouco utilizada para móveis e construção civil, sendo hoje, frequentemente utilizada na geração de energia como biomassa. Este desenvolvimento é importante no sentido de se conceber a utilização de novas espécies de madeiras com a crescente demanda nacional.

Alguns fatores são fundamentais na qualidade final da usinagem da madeira, os quais podemos dividir em dois grupos, sendo os fatores anatômicos, de colheita e preparação para a usinagem e em fatores de operação durante a usinagem.

### 3.3.3.1 Fatores anatômicos e preparação para a usinagem.

Os fatores anatômicos e preparação para a usinagem, são aqueles que se dizem respeito a qualidade da madeira adquirida desde o plantio até a sua chegada ao pátio de matérias primas para ser processado, são fatores que muitas vezes não podem ser controlados, pois depende da característica biológica do material e outros relacionados à processos pré-usinagem.

A densidade é um dos principais indicadores da qualidade da madeira, pois quanto maior a densidade, maior será a força de corte requerida, podendo ser cinco vezes maior em madeiras mais densas que em madeira de menor densidade (GONÇALVES, 2000). Gontijo (2012) afirma que a densidade está diretamente relacionada com a resistência da madeira.

O tipo de grã é um dos fatores anatômicos que interferem diretamente na usinagem, pois dependendo de sua direção e natureza, o acabamento pode apresentar defeitos indesejáveis como fibras arrancadas. Um dos principais problemas encontrados é o de grãs reversas, pois algumas espécies apresentam este tipo de grã, interferindo negativamente no acabamento (NÉRI, GONÇALVES E HERNANDEZ, 1999). Costes et al. (2004) afirmam que a variabilidade de direções da grã representa uma dificuldade para prever a potência de corte para uma peça de madeira, pois as diferentes posições representam diferentes potências e força aplicada.

Tensões internas de madeira de reação, podem ocasionar rachaduras na madeira durante a usinagem (GONÇALVES, 2000), este fator é decorrente ao tipo de condução da madeira, como temperatura e relevo de cultivo e dificilmente controlada.

Segundo Silva (2005) ocorre um aumento no comprimento das fibras que compõe o lenho da madeira de *Eucalyptus grandis* no sentido da medula para a casca, e estudou a influência dessas dimensões nos ensaios de usinagem de desengrosso, desempenho, rasgo na furadeira horizontal, fresagem axial, fresagem transversal e furação da dobradiça, os quais não apresentaram correlações estatísticas significativas com as dimensões das fibras.

Gonçalves (2000) afirma que o método de secagem é importante fator a ser considerado no preparo da madeira para a usinagem, pois dependendo daquele adotado, pode-se gerar tensões internas na madeira ocasionando deformações na peça. Segundo Koch (1964) a resistência da madeira aumenta com a diminuição da umidade da madeira, pois o espaço entre as fibrilas é diminuído, aproximando as paredes celulares e aumentando a rigidez da madeira de forma exponencial e conseqüentemente a força e a potência de corte sobre o material e o aumento do desgaste da ferramenta.

### 3.3.3.2 Fatores de operação durante a usinagem.

Os fatores de operação durante a usinagem correspondem a aqueles que podem ser controlados durante a operação, pois constituem-se de fatores tecnológicos, relacionados às características dos equipamentos, operações e ferramentas utilizadas.

A ferramenta utilizada é um dos principais fatores que influenciam a operação da usinagem devido ao seu material de constituição e geometria de construção. Para madeira, as principais propriedades que devem ser observadas nas ferramentas são a resistência a abrasão, tenacidade, rigidez e a oxidação do material (LUCAS FILHO, 2004). Segundo Fernandez (2009) o desgaste das ferramentas ocorre devido à propriedade abrasiva da madeira, podendo acarretar em queda da produtividade e qualidade das peças usinadas.

A velocidade influencia diretamente na qualidade final do corte realizado, Silva (2005) afirma que para minimizar o arrancamento das fibras, deve-se aumentar a velocidade de corte que facilita as incisões das fibras. Varanda et al (2010) verificaram que quanto maior a velocidade no lixamento, maior é a potência de corte solicitada no lixamento tubular de peças de *Eucalyptus grandis*. A velocidade de corte, como a de avanço estão limitadas pelo calor gerado no processo, o qual, dependendo da intensidade pode carbonizar a peça na região usinada (PALERMO, 2010).

A temperatura na região de corte, deve ser controlada, pois a madeira é considerada um isolante térmico devido a sua baixa condutividade térmica, o que dificulta a dissipação do calor gerado durante a usinagem, pois praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco é transformada em energia térmica, o aumento excessivo da temperatura na região de corte pode ocasionar os denominados "traços de queimadura", além de acelerar o desgaste da ferramenta podendo ocasionar maior aspereza na superfície da peça usinada, estes defeitos podem requerer a necessidade de operações adicionais, como o lixamento, onerando custo ou reduzir a qualidade final do produto (GOZELOTO; GONÇALVES, 2009).

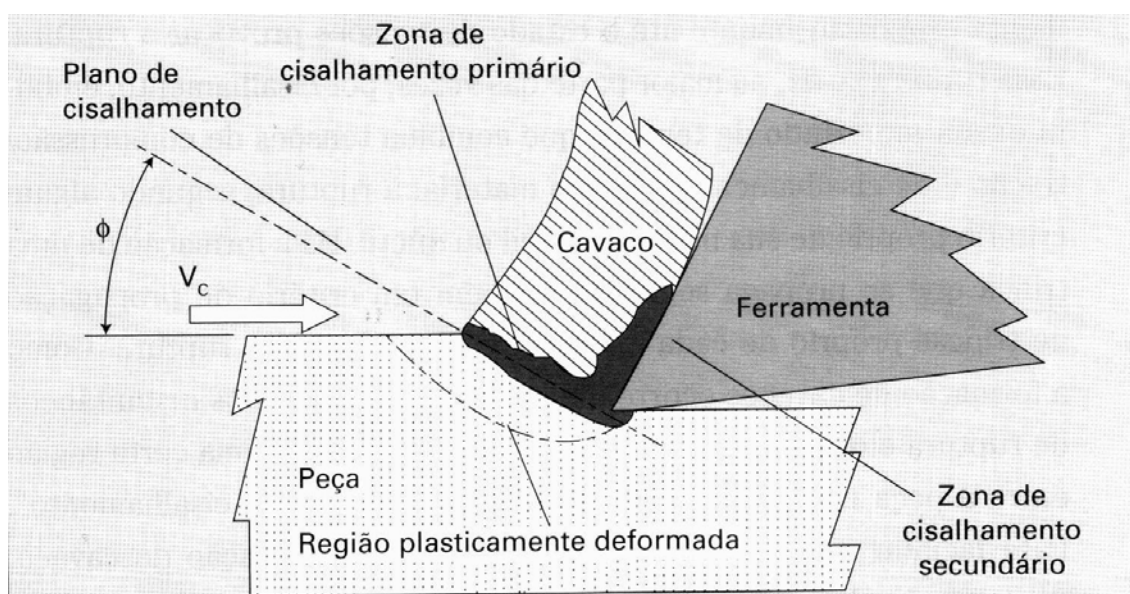
Na usinagem de materiais diversos fluidos podem ser utilizados sobre a peça com a finalidade de dissipar o calor, sendo mais comum o uso de óleos e lubrificantes, mas para madeira estes tipos de materiais não podem ser utilizados pois ocasionaria manchas no material. Gozeloto e Gonçalves (2009) utilizaram dióxido de carbono em forma de névoa na refrigeração da ferramenta em usinagem de madeira, com o qual obtiveram uma redução significativa na carbonização da madeira usinada.

Outros parâmetros podem ser considerados para diminuir a temperatura na região de usinagem como a velocidade de corte, avanço, material e geometria da ferramenta de corte e associação de todos estes parâmetros.

### 3.3.3.3 Tipos de corte

Segundo Palermo (2010) o corte na madeira é realizado iniciando-se quando a ferramenta penetra no material, deformando-o elasticamente e plasticamente, até atingir a tensão máxima de cisalhamento, ao qual este começa a escoar. Dependendo da geometria e tipo do material da ferramenta de corte será a forma do cavaco a ser retirado como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Mecanismo de formação de cavaco.



Fonte: (MACHADO, et al 2011)

Sendo a madeira anatomicamente definida por suas características e a ferramenta de corte já com uma geometria definida, a direção do movimento, velocidade e a força aplicada vão conferir o modo de ruptura das fibras (GONÇALVES, 2000).

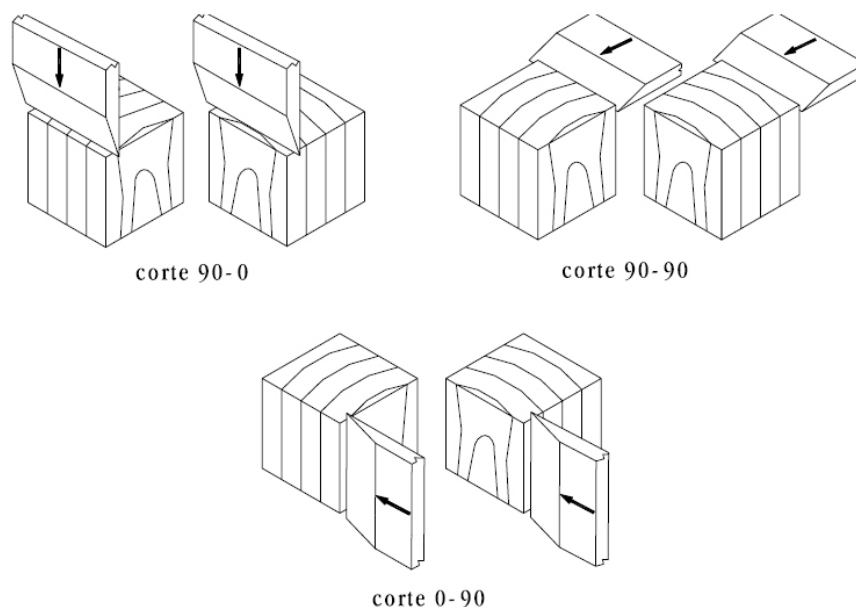
Néri, Gonçalves e Hernandez (1999) definem o corte convencional como a ação de uma ferramenta de corte na peça de madeira, conferindo um esforço, no qual produz um cavaco que de dimensões variadas conforme a umidade, geometria e movimento da ferramenta em relação à orientação das fibras.

Para madeiras ocorre dois tipos de cortes, classificados como corte ortogonal e corte periférico (GONÇALVES, 2000).

É definido como corte ortogonal a situação em que o fio da ferramenta de corte é perpendicular à direção do movimento relativo da ferramenta e da peça de madeira e quando a superfície obtida é paralela aquela antes do corte.

A Figura 19 indica os principais tipos de cortes ortogonais, eles são representados por dois números, sendo que o primeiro indica o ângulo entre o fio de corte da ferramenta e as fibras da madeira e o segundo número indica o ângulo entre a direção de corte e as fibras da madeira (NÉRI, GONÇALVES E HERNANDEZ, 1999).

Figura 19 - Tipos de cortes ortogonais.



Fonte: (NÉRI, GONÇALVES E HERNANDEZ, 1999).

O corte 90-0 (direção longitudinal ou axial) é aquele que ocorre paralelo a grã, normalmente ocorre nos processos de fresamento, aplainamento, desengrosso, corte de molduras e tábuas (PALERMO, 2010).

O corte 90-90 é um corte típico de serra-fita, cortando perpendicularmente as fibras do lenho.

O corte 0-90 ocorre na direção radial, sendo aquele que exige menos energia quando comparado às outras direções, ocorre no torneamento de lâminas de madeira (TIBURCIO, 2009).

O corte periférico é aquele em que a ferramenta é instalada em um cabeçote rotativo, obtendo-se um cilindro como resultado do corte, as operações de aplainamento, fresamento e torneamento são exemplos deste tipo de corte, podendo ser considerada situações de trabalho bem próximo de um corte ortogonal (NÉRI, 2003).

#### 3.3.3.4 Formação de Cavacos no Processamento da Madeira

No processamento da madeira pode-se obter três tipos distintos de cavacos, a sua característica pode prever a qualidade da superfície da madeira usinada.

Cavaco tipo I - tem início quando ocorre a compressão paralela às fibras e consequentemente a ruptura por fendilhamento em um plano à frente da ferramenta de corte na mesma direção das fibras (GONÇALVES, 2000).

Segundo Gonçalves (2000) a relação entre a baixa resistência ao fendilhamento e a elevada resistência à flexão da madeira, condiciona o comprimento deste tipo de cavaco. Normalmente são cavacos grandes devido a espessura do corte realizado com ângulo de ataque de 25° a 35°, o que gera um baixo coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco formado.

As principais características do cavaco tipo I são:

- fragmentação da fibra;
- requer baixa potência devido ao ângulo de ataque;
- baixo desgaste da ferramenta devido ao rompimento ocorrer antes da aresta efetiva de corte da ferramenta.

Figura 20 - Formação do cavaco Tipo I.



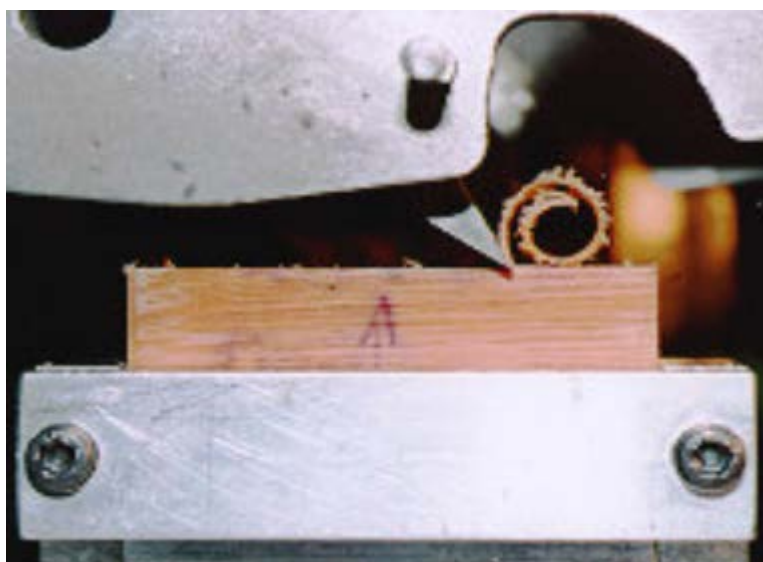
Fonte: (GONÇALVES, 2000).

Cavaco Tipo II - é formado ao longo de uma linha que se estende a partir da aresta de corte da ferramenta (GONÇALVES, 2000), por ser um cisalhamento diagonal causado pela compressão paralela da ferramenta, seu formato é contínuo e levemente aspiralado.

Ocorre em pequenas espessuras de corte com ângulos de ataque variando de  $5^\circ$  a  $20^\circ$ , com demanda de energia intermediária.

Para Gonçalves (2000) o cavaco Tipo II é tido como o ideal, pois a superfície gerada fica livre de elementos danosos acima e abaixo do plano de aresta do corte, exercendo um controle que limita os danos e quebras do lenho.

Figura 21 - Formação do cavaco Tipo II.



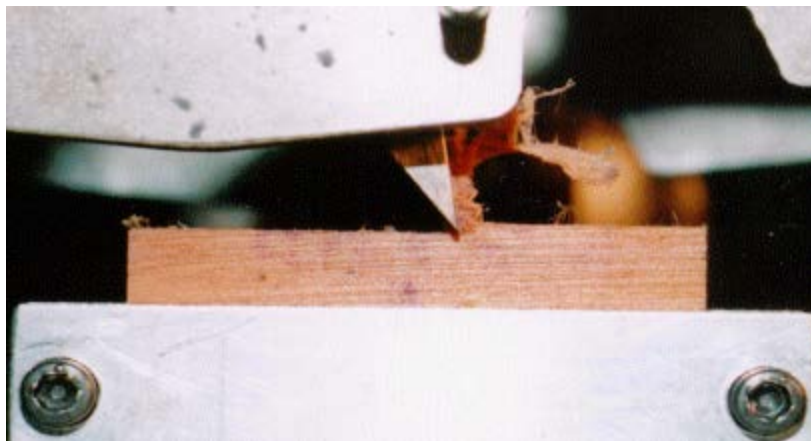
Fonte: (GONÇALVES, 2000).

Cavaco Tipo III - as forças aplicadas produzem rupturas por compressão paralela e cisalhamento longitudinal na madeira diante da aresta da ferramenta de corte, não possuindo forma definida e reduzido a fragmentos (GONÇALVES, 2000).

O ângulo de ataque pequeno de até  $10^\circ$  favorece a formação deste tipo de cavaco, assim como ferramentas desgastadas e coeficiente de atrito muito elevado entre a face e a ferramenta (GONÇALVES; RUFFINO, 1993).

Este tipo de cavaco não é pretendido nos processos de usinagem, pois provoca defeito na fibra, com textura rugosa e felpuda, além de demanda excessiva de energia utilizada para o corte.

Figura 22 - Formação do cavaco Tipo III.



Fonte: (GONÇALVES, 2000).

#### 3.3.3.5 Torneamento de Madeira.

Tiburcio (2009) descreve a importância do processo de torneamento de madeira na fabricação de peças cilíndricas com valor comercial empregado como cabos de ferramentas, peças de mobiliários e diversas outras utilizações.

Dias Júnior et al (2014) consideram o torneamento um dos processos de usinagem mais complexos para a madeira, pois são muitas as variáveis que influenciam este processo, destacando até mesmo a influência do operador do equipamento e sua experiência. Realizou o teste de torneamento com cinco espécies de madeiras nativas brasileiras, obtendo o melhor resultado para o *ipê* com uma peça e superfície ausente de defeitos, seguido de *canela*, *angelim* e *muiracatiara* com defeitos mínimos de grã arrancada e grã felpuda em média intensidade e para o *cedro* os piores resultados em comparação aos demais por encontrar grã felpuda e grã arrancada com muita intensidade e extremidades quebradas ao qual deve-se à sua menor densidade aparente.

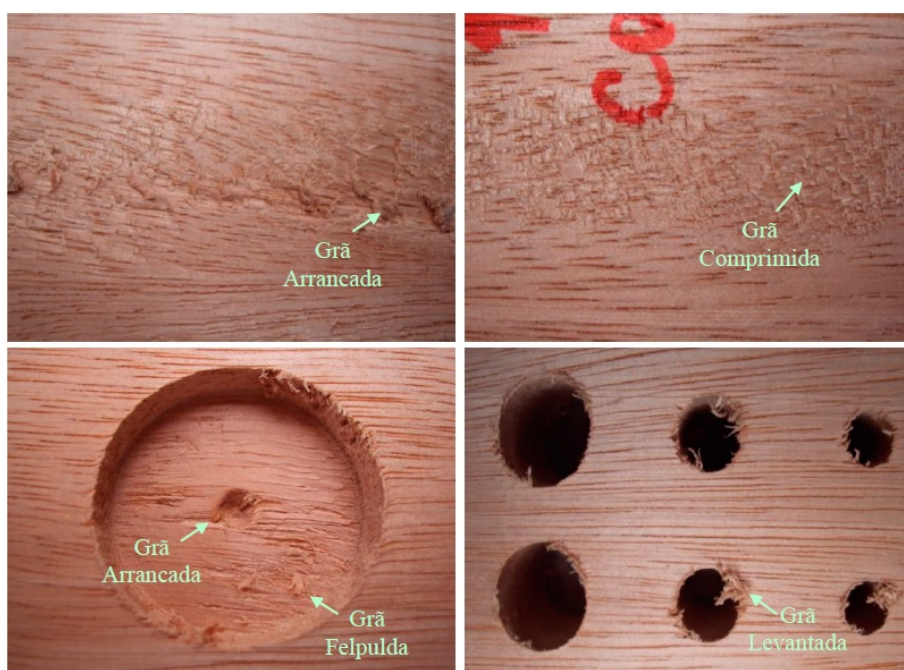
Ferreira (2011) avaliou o desempenho de espécies nativas no processo de torneamento e concluiu que as madeiras de *ipê* e *canela* não apresentaram defeitos no teste de torneamento, podendo ser utilizadas pela indústria moveleira. As madeiras de *angelim* e *muiracatiara* apresentaram defeitos, mas não podem ser descartadas para a indústria moveleira, pois um arranjo adequado de ferramenta pode minimizar estes defeitos.

### 3.3.4 Usinagem de Madeira Termorretificada

Embora o tema da termorretificação da madeira esteja muito presente na literatura, os esforços estão concentrados nas propriedades físicas, químicas e mecânicas, poucos trabalhos são encontrados com o enfoque na usinagem deste tipo de material.

Palermo (2010) realizou testes de desempenho, desgrosso, rasgo, furação e lixamento de madeira de *Eucalyptus grandis* termorretificado à temperatura de 190°C por 6 horas e 30 minutos. Os defeitos mais observados durante as operações de usinagens são o de grã arrancada, grã felpuda, levantamento de fibras e grã comprimida como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23 - Defeitos encontrados após a usinagem de madeira termorretificada.



Fonte: (PALERMO, 2010).

Palermo (2010) verificou que a madeira termorretificada em relação à madeira não termorretificada teve um desempenho melhor no teste de desempenho com usinagem a favor da grã. No teste de furação e furação para dobradiça, a madeira termorretificada teve uma acentuação no defeito de grã arrancada com o uso de brocas de oito e seis milímetros.

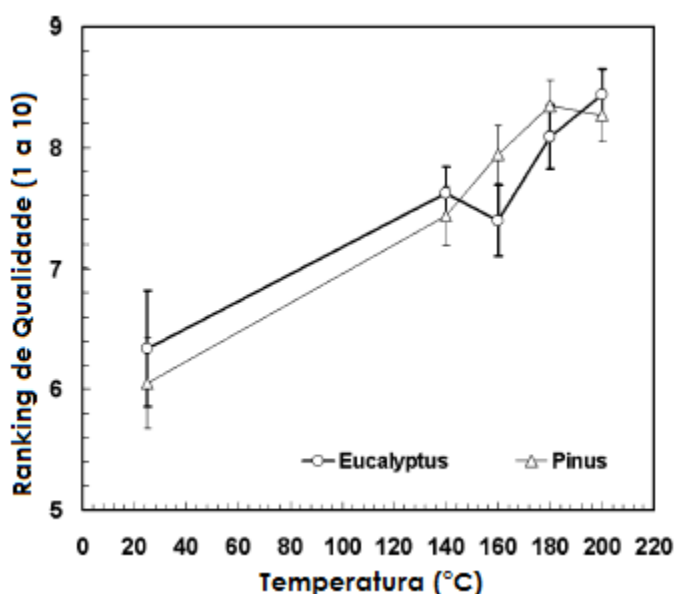
Segundo Wilkowski et al. (2011) ocorre uma diminuição na força de corte e na potência de usinagem na operação de fresamento em função da temperatura de tratamento de *oak wood*.

Budakçi et al (2011) verificaram que para a operação de corte das madeiras de *Pinus sylvestris*, *Fagus orientalis*, *Abies bornmülleriana* e *Quercus petraea* L. em serra circular, o

aumento da temperatura do tratamento térmico influenciou no incremento da rugosidade da superfície após a operação, fato este que atribuíram à oxidação dos componentes de constituição do lenho das madeiras estudadas.

Moura et al (2011) avaliaram os processos de usinagem de aplainamento e lixamento nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* termicamente tratados a 140°C, 160°C, 180°C e 200°C. Na operação de aplainamento a avaliação foi visual e tátil com um classificação de 0 a 10. Na Figura 24 é possível verificar que com o aumento da temperatura do tratamento térmico as notas da qualidade das superfícies de ambas as madeiras foi aumentada em relação ao controle.

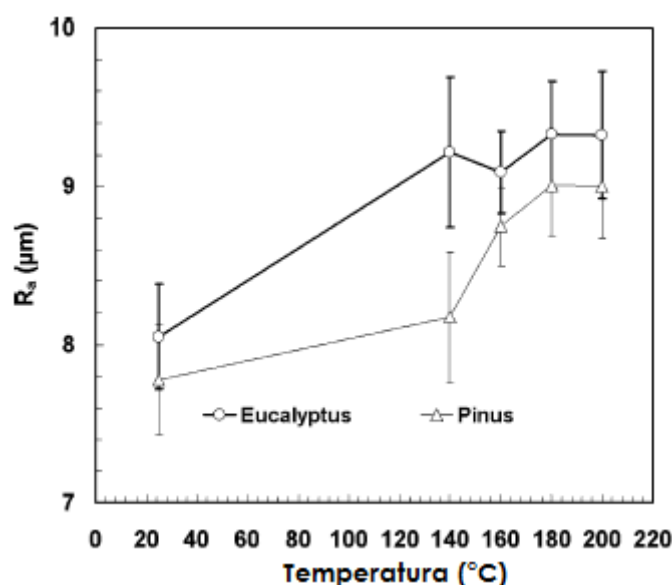
Figura 24 - Ranking de qualidade das superfícies de madeiras termorretificadas aplainadas.



Fonte: Adaptado de Moura et al (2011).

Na operação de lixamento as madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus* termorretificada obtiveram um acréscimo da rugosidade  $R_a$  com o aumento da temperatura de tratamento. Moura et al (2011) pressupunham que com o efeito da diminuição da resistência das fibras da madeira com o acréscimo da temperatura se torna mais fácil a penetrabilidade dos grãos da lixa na superfície da madeira. A Figura 25 apresenta a rugosidade medida para as diferentes madeiras em suas diferentes temperaturas de tratamento térmico.

Figura 25 - Rugosidade  $R_a$  da superfície de madeira termorretificada submetida ao lixamento.



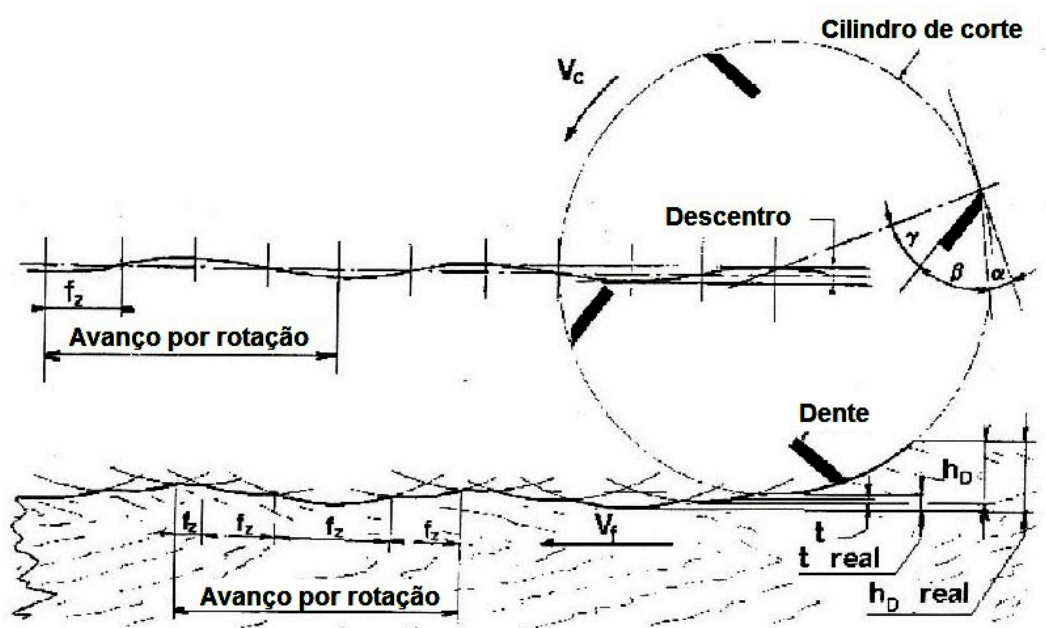
Fonte: Adaptado de Moura et al (2011).

### 3.3.5 Rugosidade da Superfície da Madeira

A superfície da madeira não pode ser considerada lisa, pois existem espaços vazios na superfície devido a sua anatomia, como elementos de vasos, traqueídes e a disposição das fibras que compõe o lenho. A qualidade da superfície está diretamente relacionada com a rugosidade resultante dos processos de usinagem, pois eles, além de conferir forma, também conferem acabamento a superfície, e esta está relacionada e dependente de diversos fatores que influenciam o corte (YILDIZ, 2006).

No processo de usinagem, o cavaco é retirado da madeira com o auxílio de uma ferramenta, como pode ser observado na Figura 26, este processo acarreta a formação de irregularidades na superfície que são denominadas de rugosidade ou textura primária (SIQUEIRA et al, 2003).

Figura 26 - Ataque da ferramenta à superfície da madeira



Fonte: Adaptado de Gonçalves et al (2003).

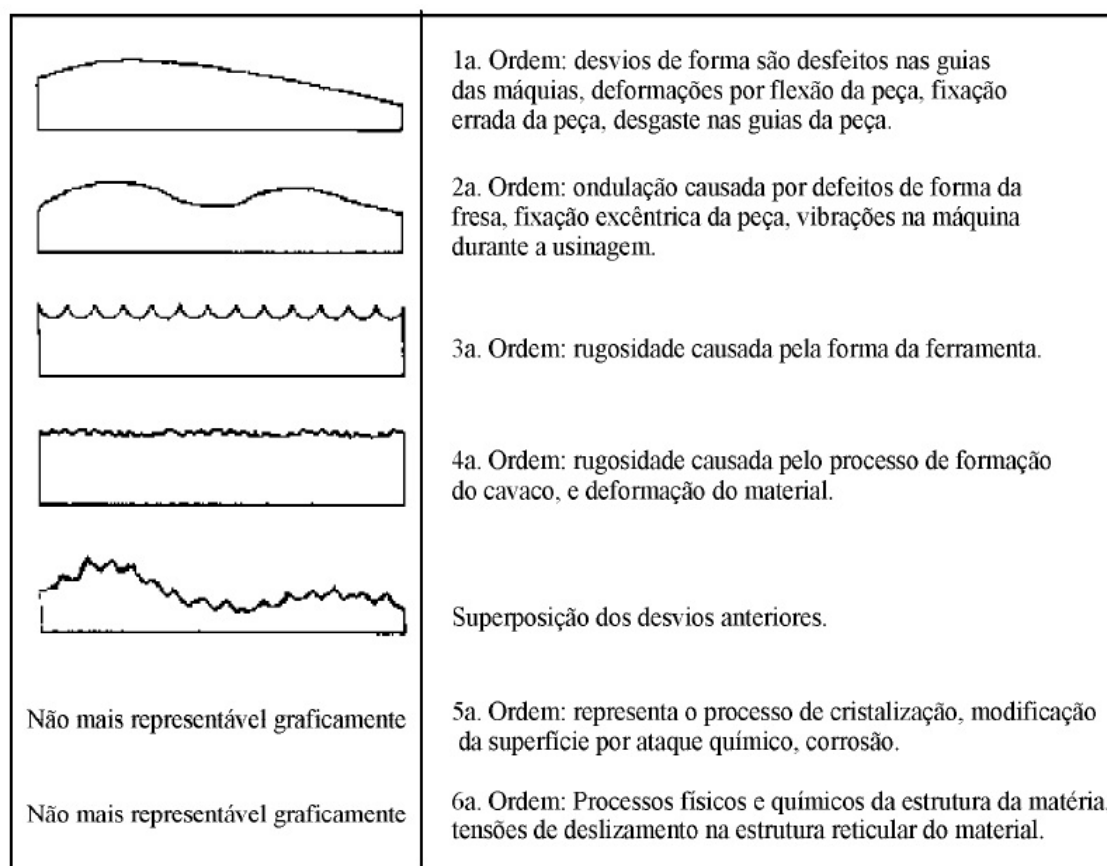
É desejável que após o processo de usinagem, a superfície da madeira apresente uma menor rugosidade possível, pois na maior parte das aplicações este parâmetro é desejável que seja baixo.

A rugosidade final desejada em uma peça depende da sua aplicação, pois após a operação de usinagem que confere forma, diversos outros pós processos podem ser utilizados com a finalidade de obter a rugosidade desejada, entre eles o lixamento está entre os mais utilizados.

Na Figura 27 estão representadas as características das ondulações e rugosidades em uma peça a partir de sua ordem geradora.

Existem no mercado uma gama bastante grande de equipamentos destinados a mensurar a superfície topográfica da madeira, a escolha deste equipamento está relacionada com o grau de precisão da rugosidade (PALERMO, 2010). Os que mais se destacam são os rugosímetros de agulha, raio laser ou raio ultravioleta.

Figura 27 - Principais ondulações e rugosidades produzidas por ferramentas.



Fonte: Siqueira et al (2003).

Os rugosímetros que utilizam agulha, medem um perfil de rugosidade por onde a agulha percorre a amostra da superfície, o qual define numericamente o seu perfil (PALERMO, 2010).

Para a determinação da rugosidade superficial a NBR ISO 4287 (2002) apresenta parâmetros e padrões que podem ser aplicados a medição de qualquer tipo de material.

A Figura 28 representa os comprimentos do perfil de medição da rugosidade que devem ser considerados onde:

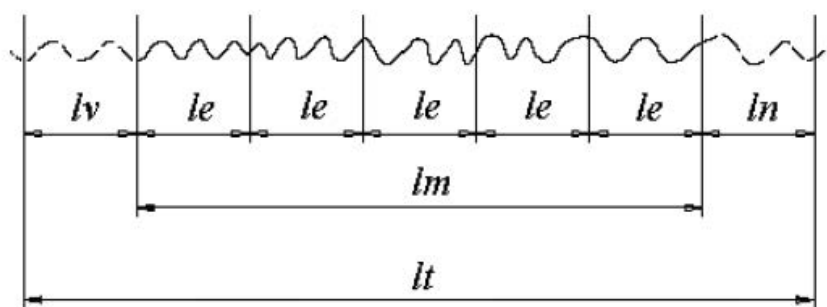
$l_m$  - comprimento do percurso de medição

$l_e$  - comprimento total da medição

$l_v$  - comprimento considerado até atingir a velocidade efetiva de medição.

$l_n$  - comprimento considerado até a parada da agulha (apalpador).

Figura 28 - Comprimentos para a avaliação da rugosidade.



Fonte: NBR 6405 (1988).

O valor do comprimento  $le$  da amostragem depende diretamente do valor da rugosidade, para cada intervalo de rugosidade está representado o comprimento  $le$  no Quadro 5:

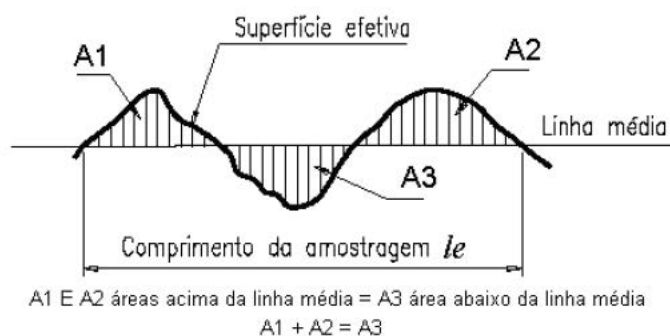
Quadro 5 - Comprimento da amostragem  $le$  para perfis de usinagem não periódicos.

| Rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) | Mínimo de comprimento de amostragem $Le$ (mm) |
|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| De 0 até 0,1                       | 0,25                                          |
| Maior que 0,1 até 2,0              | 0,8                                           |
| Maior que 2,0 até 10,0             | 2,5                                           |
| Maior que 10                       | 8                                             |

Fonte: NBR 6405 (1988).

A norma NBR ISO 4287 (2002) adota como sistema básico de medida a linha média como a linha paralela à direção geral do perfil analisado em todo o comprimento da amostragem, a soma das áreas superiores entre ela e o perfil efetivo seja igual à soma das áreas inferiores no comprimento  $le$  (DEUS, 2015) como ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Linha média e áreas inferiores e superiores.

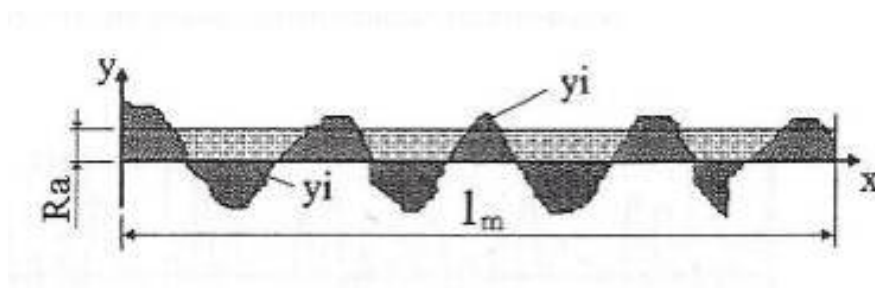


Fonte: Adaptado da ABNT – NBR ISO 4288 (2008).

Palermo (2010) apresenta os parâmetros mais utilizados na determinação da rugosidade superficial:

A rugosidade média  $R_a$ , matematicamente é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Rugosidade média  $R_a$ .



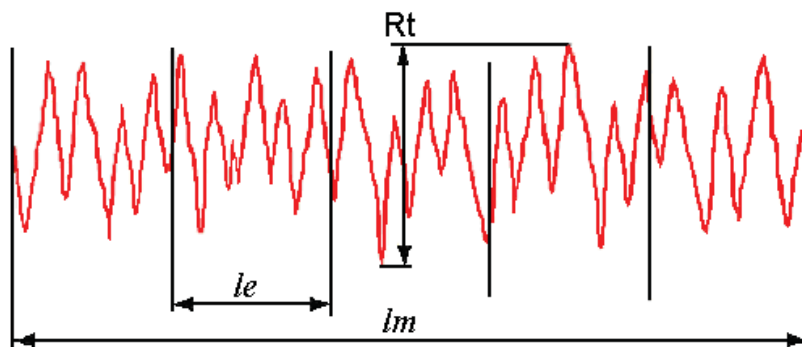
Fonte: NBR 6405 (1988).

A Equação 1 define matematicamente o parâmetro  $R_a$ .

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (1)$$

$R_t$ , é a altura total do perfil, medindo a altura máxima de um pico a um vale no percurso de medição  $l_m$ , também podendo ser notado como a maior amplitude do perfil como mostra a Figura 31.

Figura 31 - Altura total do perfil  $R_t$ .



Fonte: (PALERMO, 2010).

Salca e Hiziroglu (2014) analisaram a rugosidade e a dureza janka em madeiras termicamente tratadas nas espécies Black Alder (*Alnus glutinosa*) e Southerne Pine (*Pinus taeda*), encontrando um comportamento diferente para cada espécie em diferentes tipos de tratamento variando a temperatura e tempo de exposição, como pode ser observado no Quadro 6.

Quadro 6 - Dureza e rugosidade de madeiras tratadas termicamente.

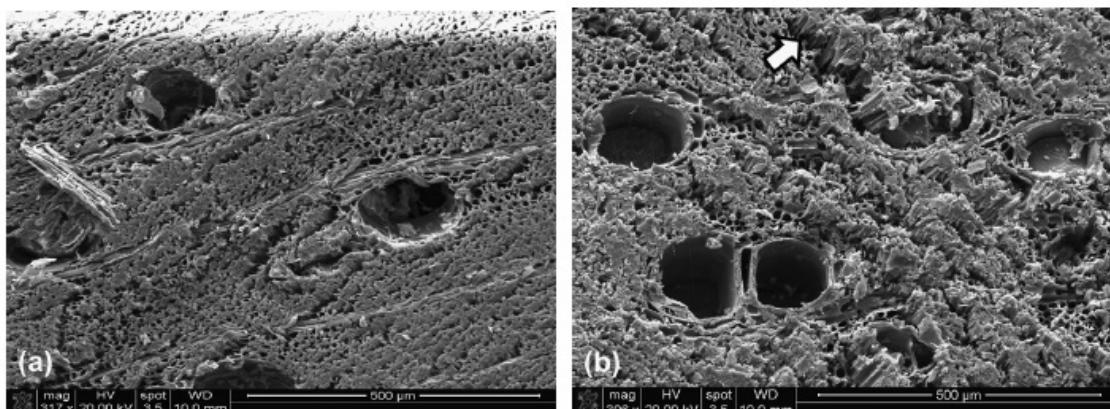
| Espécie       | Temperatura (°C) | Tempo (h) | Dureza Janka (kg) | Parâmetros de rugosidade (µm) |                |
|---------------|------------------|-----------|-------------------|-------------------------------|----------------|
|               |                  |           |                   | R <sub>t</sub>                | R <sub>a</sub> |
| Black Alder   | 120 °C           | Antes     | 369.56            | 36.96                         | 4.72           |
|               |                  | 3h        | 360.31            | 35.97                         | 4.56           |
|               |                  | Antes     | 372.02            | 37.08                         | 4.90           |
|               |                  | 6h        | 355.79            | 36.71                         | 4.83           |
|               | 190°C            | Antes     | 362.80            | 36.08                         | 4.60           |
|               |                  | 3h        | 361.29            | 35.35                         | 4.46           |
|               |                  | Antes     | 341.60            | 35.02                         | 4.50           |
|               |                  | 6h        | 332.44            | 34.41                         | 4.38           |
| Southern Pine | 120°C            | Antes     | 305.86            | 26.04                         | 3.28           |
|               |                  | 3h        | 310.19            | 25.76                         | 3.28           |
|               |                  | Antes     | 297.64            | 25.80                         | 3.34           |
|               |                  | 6h        | 298.85            | 25.58                         | 3.24           |
|               | 190°C            | Antes     | 263.44            | 27.16                         | 3.44           |
|               |                  | 3h        | 270.97            | 27.00                         | 3.49           |
|               |                  | Antes     | 343.38            | 27.36                         | 3.46           |
|               |                  | 6h        | 342.30            | 26.97                         | 3.43           |

Fonte: Adaptado de Salca e Hiziroglu (2014).

Para Priadi e Hiziroglu (2013) a redução da rugosidade em superfícies de madeira termicamente tratadas pelo incremento de tempo e temperatura, se deve pelo fato da degradação das fibras com o calor, como pode ser observado na Figura 36. A seta na imagem da Figura 36 - b, indica as fibras degradadas devido ao tratamento térmico.

Na usinagem de madeira de beech (*Fagus orientalis*) e aspen (*Populus tremula*) Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006) verificaram a diferença da rugosidade na superfície nas diferentes direções de corte da madeira, encontrando uma rugosidade maior na direção radial devido a difusividade do lenho, para ambas as madeiras nas diferentes condições de usinagem, e a menor rugosidade na direção tangencial.

Figura 32 - (a) fibras de madeira sem tratamento térmico, (b) fibras com tratamento térmico a 200°C, 2h.



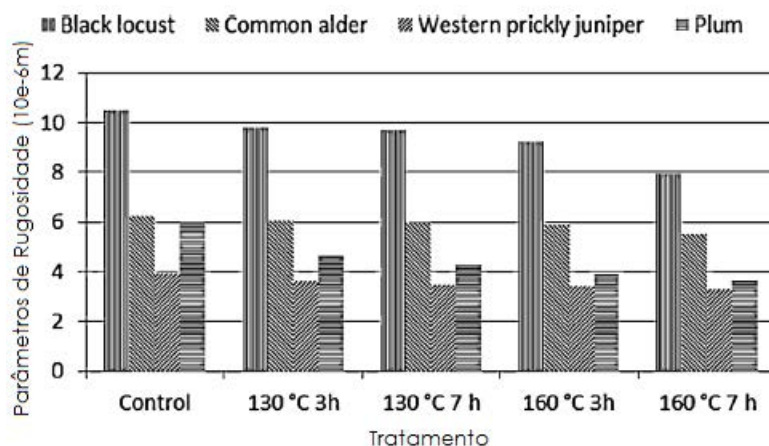
Fonte: Adaptado de Priadi e Hiziroglu (2013).

A rugosidade na madeira termicamente tratada varia conforme a orientação do lenho segundo Palermo (2014) com diferentes valores de  $R_a$  para cada direção da medida da rugosidade.

Palermo (2010) verificou um aumento da rugosidade na superfície de madeiras termorretificadas em função do tratamento térmico na operação de lixamento com granulometria 80 e 100 para madeira de *Eucalyptus*.

Kesik el al (2014) verificaram que os valores da rugosidade  $R_a$  da superfície das madeiras de Black locust (*Robinia pseudoacacia L.*), Common alder (*Alnus glutinosa L.*), Western prickly juniper (*Juniperus oxycedrus L.*) e Plum (*Prunus domestica L.*) diminuíram com o aumento da temperatura de tratamento e também com o aumento do tempo de exposição à temperatura, o gráfico da Figura 33 ilustra o comportamento das referidas madeiras.

Figura 33 - Rugosidade  $R_a$  da superfície de madeiras tratadas termicamente.



Fonte: Adaptado de Kesik el al (2014).

Unsal et al (2011) verificaram que a madeira de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn, submetida ao tratamento térmico a 150°C sob pressão, diminuiu a rugosidade da superfície da madeira em relação à testemunha, quando adicionado maior pressão, verificou-se que a rugosidade diminuiu ainda mais em relação ao tratamento com menor pressão. O tratamento em 180°C também demonstrou menor rugosidade com maior pressão de tratamento quando comparado na mesma faixa de temperatura, porém a rugosidade ficou acima do tratamento térmico de 150°C, mas abaixo da rugosidade da superfície da testemunha.

### 3.4 PROJETO DE EXPERIMENTOS (DOE)

Projeto de experimentos é uma área dentro da estatística probabilística que estuda o planejamento, execução, coleta de dados, análise e interpretação dos dados provenientes de experimentos, pois estes oferecem suporte probabilístico ao pesquisador, o que permite inferências sobre o comportamento do fenômeno em estudo, com um grau de incerteza conhecido (SOUZA; et al, 2002).

O planejamento de um experimento é fundamental para definir a forma de sua execução, coleta de dados e método estatístico a ser empregado no teste das hipóteses.

Souza et al (2002) definem alguns conceitos para o melhor entendimento da metodologia:

Tratamento - é o termo utilizado para definir o que será comparado, como por exemplo, este trabalho compara a rugosidade entre diferentes superfícies torneadas. Podemos desta forma considerar como "tratamento".

Variáveis de resposta - corresponde às respostas obtidas por meio de contagem ou medição.

Fatores e níveis - fatores são variáveis que se deseja descobrir o efeito no processo e cada fator pode possuir diversos níveis, que corresponde à valores ou estado que o fator pode assumir. Por exemplo, um fator estudado neste trabalho é a influência da espécie da árvore no processo de usinagem. O fator "espécie" é delimitado em duas condições, ou seja, duas espécies de árvores, "*Pinus elliottii*" e "*Corymbia citriodora*".

Ensaios - experimentação que será realizada para os diferentes tratamentos.

Grupo de controle - é o grupo que não recebe o tratamento para ser comparado com o grupo que recebeu o tratamento.

Dentre as metodologias mais utilizadas no Projeto de Experimentos, podemos destacar os métodos "Fatorial", "Superfície de Resposta", "Mistura" e "Taguchi", este último foi o método adotado para o planejamento deste trabalho.

O método de Taguchi corresponde a uma matriz ortogonal que oferece um meio eficiente para realizar experimentos com o menor número de tentativas, uma relação de sinal/ruído (S/N) é utilizada como a característica de escolha de qualidade (PINHEIRO, 2014). A equação 2 corresponde a relação S/N utilizada pelo método de Taguchi.

$$S/N = -10 \log \frac{\sum y^2}{n} \quad (02)$$

Onde:

S/N = razão sinal ruído

y = valor da resposta

n = número de repetições

Segundo Pimenta et al (2012) existem 3 tipos de relação sinal/ruído:

Menor é melhor, pois quanto menor o valor da resposta, melhor é para o processo.

Maior é melhor, pois maior o valor da resposta, melhor é para o processo.

Nominal é melhor, sendo que quanto mais próximo da especificação, melhor é para o processo.

A ANOVA é o método estatístico utilizado para interpretar os dados experimentais, podendo comparar até três fatores.

Diversos trabalhos na área de usinagem têm utilizado o projeto de experimentos (DOE - Design of Experiments) e tem demonstrado ser uma ferramenta importante e bastante prática pois é possível minimizar os números de ensaios através de um arranjo matricial dos dados coletados, um estudo de um número elevado de fatores, detecção de interações entre os fatores, detecção de níveis ótimos, melhoria da precisão de resultados e otimização dos resultados (BONDUELLE, 2010).

Bernardos e Vosniakos (2002) utilizaram o DOE com o método de Taguchi e redes neurais para a previsão da rugosidade da superfície em CNC no fresamento, afirmando que a

precisão foi alcançada e é seguro concluir que todos os fatores significativos foram incluídos no processo com bons resultados.

Pang et al (2014) obtiveram excelentes respostas ao utilizar o método de Taguchi para a otimização de parâmetros de usinagem sobre o processo de fresamento em CNC.

Pinheiro (2014) utilizou o método Taguchi para o estudo da influência da umidade em fresamento de madeira de *Pinus elliottii*, o qual considerou o método de Taguchi confiável para a análise da influência dos fatores estudados.

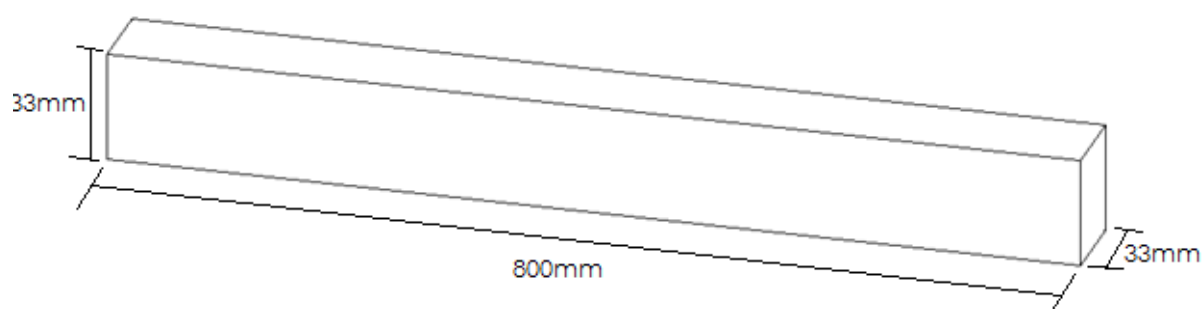
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

As madeiras utilizadas para estudo são das espécies de *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*, ambas provenientes de reflorestamento e adquiridas no comércio da cidade de Itapeva-SP na forma de tábuas.

### 4.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

As madeiras foram adquiridas na forma de tábua nas dimensões 33 mm x 33 mm x 800 mm como apresentado na Figura 34. As peças foram selecionadas visualmente de forma que possuísem o mínimo de defeitos anatômicos possíveis, de forma a garantir um corpo de provas com características homogêneas.

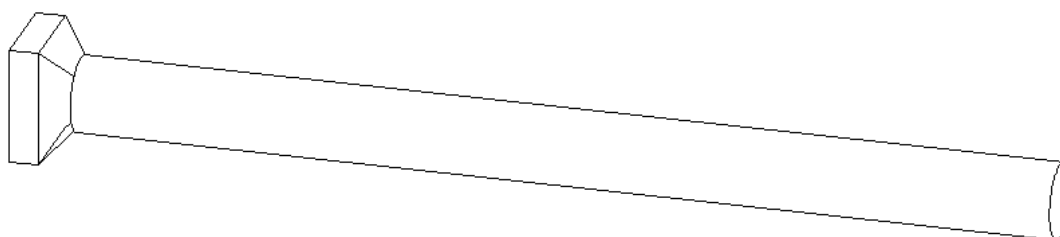
Figura 34 - Preparação do corpo de prova, peça paralelepipedica.



Fonte: Autor

As tábuas foram usinadas por um torno copiador com o objetivo de tornar estas peças com o formato mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Preparação do corpo de prova.



Fonte: Autor.

A peça cilíndrica foi seccionada de forma que se extraiu pequenos cilindros de comprimento de 100 mm e diâmetro de 31,5 mm como mostrado na Figura 36.

Figura 36 - Preparação final do corpo de prova em formato cilíndrico.



Fonte: Autor.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

A metodologia utilizada para a determinação da densidade básica e aparente da madeira de *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora*, é definida pela NBR 7190 (1997), em que define a densidade básica da madeira como a relação da madeira seca em estufa e o volume saturado em água. A Equação 3 foi utilizada para o cálculo da densidade básica da madeira.

$$D_b = \left( \frac{m_s}{m_v - m_i} \right) \times D_a \quad (03)$$

Onde:

$D_b$  = densidade básica,  $\text{kg.m}^{-3}$ ;

$m_s$  = massa de amostra seca, em kg;

$m_v$  = massa de amostra saturada em água, em kg;

$m_i$  = massa de amostra saturada imersa em água, em kg;

$D_a$  = densidade da água a 25°C.

Para a determinação da densidade aparente, os corpos de prova foram pesados em balança de precisão de 0,01 g e determinado o seu volume através de medição das peças por um paquímetro com acuracidade de 0,05 mm.

Após secagem em estufa, a madeira atingiu um teor de umidade de 12%, que está impresso na Equação 4.

$$D_{ap(12\%)} = \frac{m_{12\%}}{V_{12\%}} \quad (4)$$

Onde:

$D_{ap(12\%)}$  = densidade da madeira a 12% de umidade,  $\text{kg.m}^{-3}$ ;

$m_{12\%}$  = massa de amostra a 12% de umidade, em kg;

$V_{12\%}$  = volume da amostra a 12% de umidade, em  $\text{m}^3$ .

### 4.3 TERMORRETIFICAÇÃO

A termorretificação da madeira de *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora* foi realizada no laboratório do departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Os corpos de prova foram selecionados a partir de classificação visual e escolha daqueles que não apresentavam nenhum tipo de defeito anatômico ou de desdobro.

Foi utilizada uma estufa de vácuo marca Quimis modelo QS19V12 mostrada na Figura 37 com limite de temperatura de até  $250^{\circ}\text{C}$ .

Figura 37 - Estufa marca Quimis modelo QS19V12.

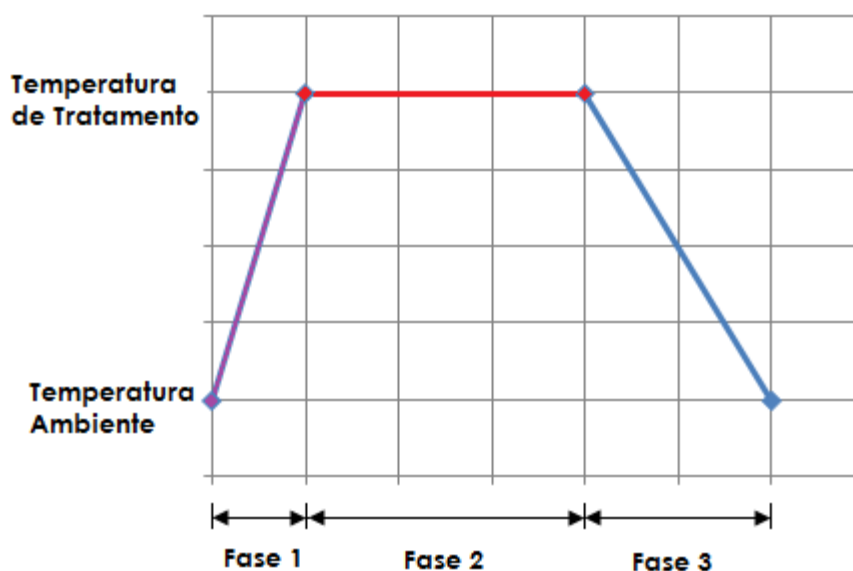


Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram colocados no interior da estufa e dispostos de forma que não houvesse contato entre um e outro, para que todos estivessem sob as mesmas condições de tratamento com a circulação de ar em torno de todo o corpo de provas.

O tratamento térmico foi compreendido em três fases conforme indicado no gráfico da Figura 38.

Figura 38 - Fases do tratamento térmico.



Fonte: Autor.

As fases do processo de termorretificação compreendem em:

- Fase 1: fase de aquecimento da estufa e material a uma taxa de  $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até atingir a temperatura de tratamento. Esta fase é importante para que a peça de madeira, previamente seca à um teor de umidade de 12%, adquira a temperatura uniformemente de forma que não gere tensões internas no corpo de prova de forma a danificá-lo.

- Fase 2: fase efetiva do tratamento térmico, esta ocorreu nas temperaturas de  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $140^{\circ}\text{C}$ ,  $160^{\circ}\text{C}$ ,  $180^{\circ}\text{C}$  e  $200^{\circ}\text{C}$  por cinco horas, pois são as temperaturas e uma média de tempo usual nos trabalhos encontrados na literatura, de forma que garante a modificação desejada da madeira pelo processo de termorretificação. A atmosfera da estufa não foi controlada, permanecendo a pressão atmosférica e teor dos gases do ambiente.

- Fase 3: fase de resfriamento, a qual a estufa foi desligada e deixada resfriar até a temperatura ambiente durante 24h. Assim como a fase de aquecimento o resfriamento tem

que ocorrer a taxas que não influencie nas tensões internas das fibras da madeira do corpo de prova de forma que venha a causar deformações geométricas nas peças.

Para a comparação do comportamento com as madeiras termorretificadas, foram preparados corpos de prova com madeira sem o tratamento térmico, os quais denominamos de controle.

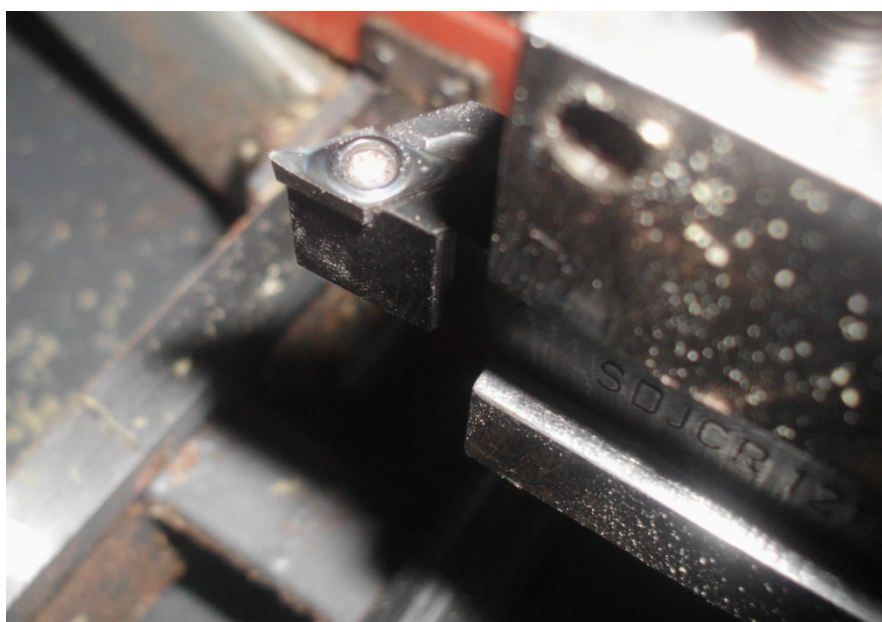
#### 4.4 FERRAMENTAS DE CORTE UTILIZADAS

Para os ensaios de usinagem foram utilizadas três ferramentas de corte de diferentes características para avaliar o seu comportamento na madeira termorretificada, com o objetivo de verificar os diferentes comportamentos na operação de torneamento.

Foram utilizadas as ferramentas Classe N10 construídas com os materiais de metal duro, metal duro polido e metal duro com recobrimento de diboreto de titânio  $TiB_2$

Para o melhor ajuste e mobilidade do cabeçote as ferramentas foram conectadas a um suporte de fixação de ferramenta sob o código impresso em seu corpo SDJCR1210D07, conforme a Figura 39

Figura 39 - Conjunto de acessórios de usinagem: ferramenta, suporte e cabeçote.



Fonte: Autor.

Os ângulos de construção das ferramentas utilizadas são:

Raio ponta= 0,4mm

Ângulo de saída=  $25^{\circ}$

Ângulo de folga=  $7^{\circ}$

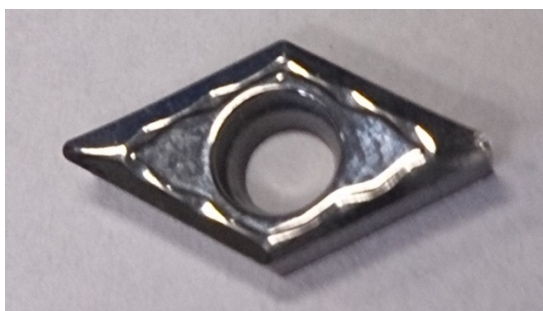
Ângulo de cunha=  $58^{\circ}$

Ângulo de posição=  $95^{\circ}$

Ângulo de ponta =  $55^{\circ}$

A ferramenta de metal duro utilizada, sua imagem e forma de fixação no suporte estão mostrados na Figura 40.

Figura 40 - Ferramenta de metal duro.



Fonte: Autor.

A ferramenta de metal duro polido sob o código de DCGT070204 mostrada na Figura 41, possui um aspecto mais brilhante em relação à partilha de metal duro mostrada na Figura 40, além de contar com uma superfície extremamente lisa proveniente do polimento na ferramenta.

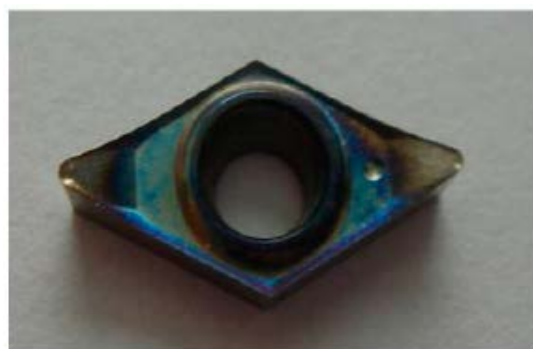
Figura 41 - Ferramenta de metal duro polida.



Fonte: Autor.

A ferramenta de metal duro com recobrimento de diboreto de titânio ( $\text{TiB}_2$ ) sob o código DCGT070204, utilizada para o torneamento é mostrada na Figura 42.

Figura 42 - Ferramenta de metal duro com recobrimento de diboreto de titânio ( $\text{TiB}_2$ ).



Fonte: Autor.

#### 4.5 TORNO CNC

Para os ensaios de usinagem foi utilizado um torno CNC Compact 5 da marca EMCO, cujas características promove o trabalho em dois eixos de coordenada (X, Z), com potência de 440 watts, a variação de rotação está compreendida de 50 a 3200 RPM, do Laboratório de Usinagem do departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Este torno foi selecionado para este trabalho, por possuir a potência e a estabilidade necessária para o desenvolvimento dos estudos.

Figura 43 - Torno CNC utilizado nos ensaios.



Fonte: Autor.

Os corpos de prova foram fixados na castanha de mantendo a centricidade para evitar a vibração como mostrado na Figura 44.

Figura 44 - Posicionamento do corpo de provas no torno CNC.

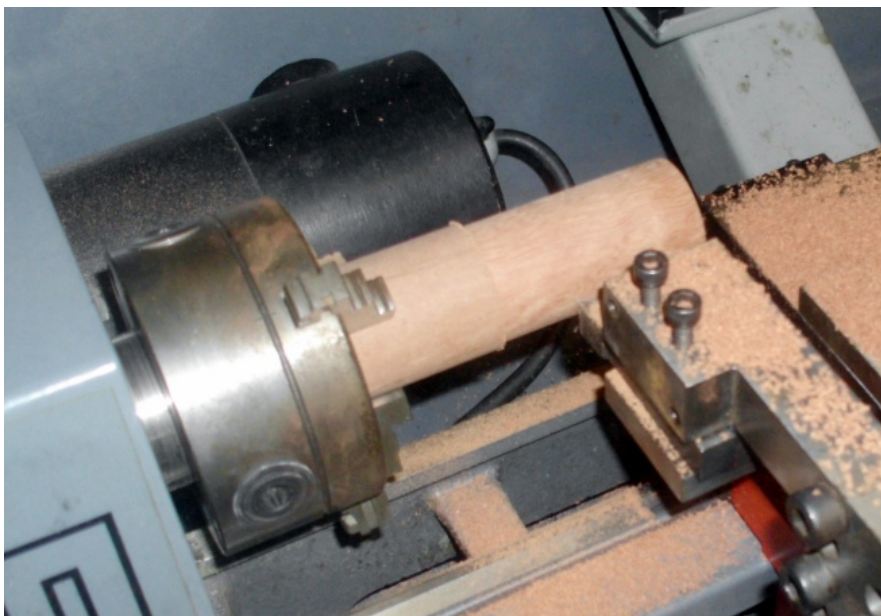


Fonte: Autor.

Para a usinagem da madeira termorretificada, inicialmente foi retirado ao longo do corpo de prova 54 mm de material com 3 mm de profundidade com o objetivo de uniformizar a superfície a ser usinada durante o ensaio, pois embora já possua formato cilíndrico, esta

operação visa garantir a uniformidade da superfície para que todos os ensaios possuam as mesmas condições iniciais. Esta operação pode ser observada na Figura 45.

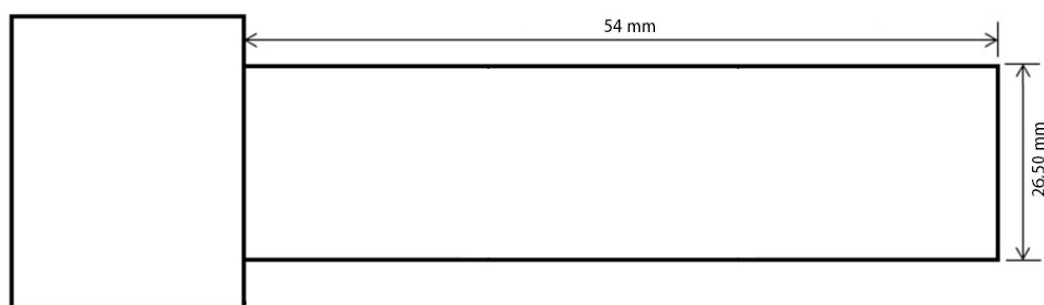
Figura 45 - Uniformização da superfície do corpo de provas.



Fonte: Autor.

As novas dimensões e forma do corpo de prova após a uniformização, podem ser verificadas na Figura 46.

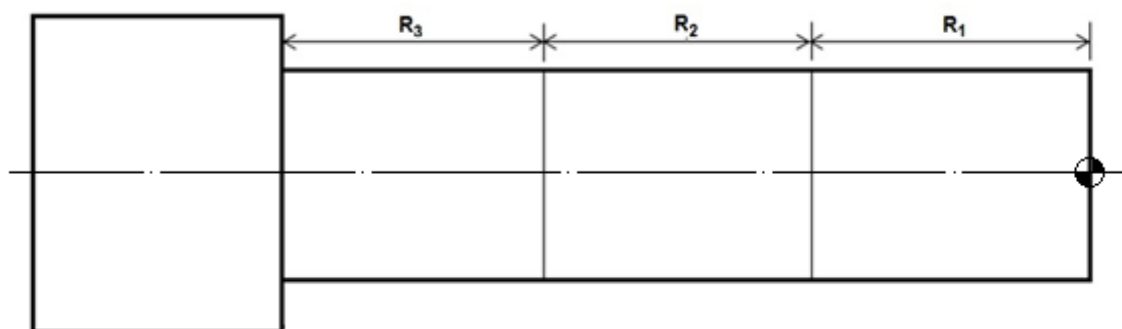
Figura 46 - Corpo de prova após a uniformização da superfície de usinagem.



Fonte: Autor.

Na sequência da programação do torno CNC ele realizou a operação de torneamento em três regiões diferentes do corpo de prova, em três diferentes momentos. Na Figura 47 estão ilustradas as regiões as quais o corpo de prova foi subdividido.

Figura 47 - Regiões de usinagem do corpo de prova.



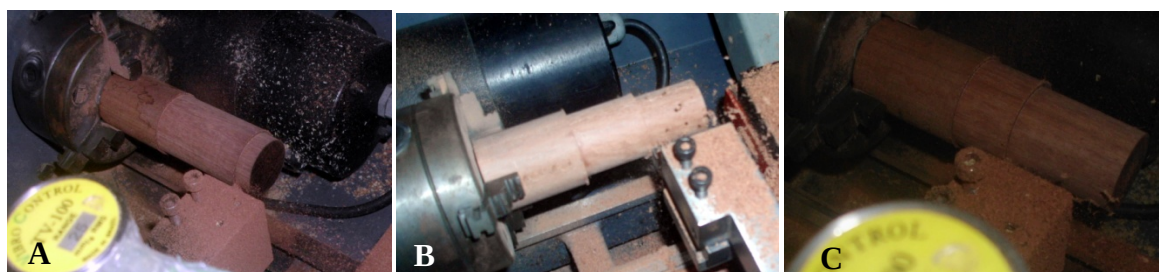
Fonte: Autor

A primeira usinagem ocorreu na Região 1 ( $R_1$ ) mostrada na Figura 48 - A, em uma extensão de 18 mm de comprimento, após finalizar esta região o cabeçote com porta ferramentas foi movimentado até um estado inicial no ponto 0 (Figura 44).

Na sequência o cabeçote foi conduzido para a segunda etapa da usinagem na Região 2 ( $R_2$ ) por onde percorreu uma extensão de 18 mm até finalizar esta segunda etapa ilustrada na Figura 48 - B. Novamente o cabeçote foi conduzido até uma posição inicial.

Finalmente a última etapa correspondente a usinagem da Região 3 ( $R_3$ ) mostrada na Figura 48 - C, pela extensão de 18 mm programada, o qual em seguida retornava até o ponto 0 e desligava o seu motor de rotação.

Figura 48 - Usinagem do corpo de prova em diferentes regiões.



Fonte: Autor.

A velocidade de corte foi mantida em cada uma das regiões em 175m/min (1800RPM) de forma que todas estivessem submetidas as mesmas condições. A velocidade de avanço foi mantida em 100 mm/min.

#### 4.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados de usinagem da madeira termorretificada foi realizada por sensores conectados a um computador, controlados e armazenados pelo software comercial Labview®.

Os dados coletados pelo sistema de aquisição foram todos armazenados em arquivos individuais com cada um dos parâmetros medidos pelos sensores. A Figura 49 mostra a tela do software durante a usinagem de um dos corpos de prova. O monitoramento dos dados em tempo real foi possível através do gráfico dos parâmetros coletados.

Figura 49 - Tela do software Labview utilizado para a aquisição de dados da usinagem.



Fonte: Autor.

Para a aquisição dos dados de vibração foi utilizado um sensor de vibração da marca Vibro Control, modelo TV-100 (Figura 50).

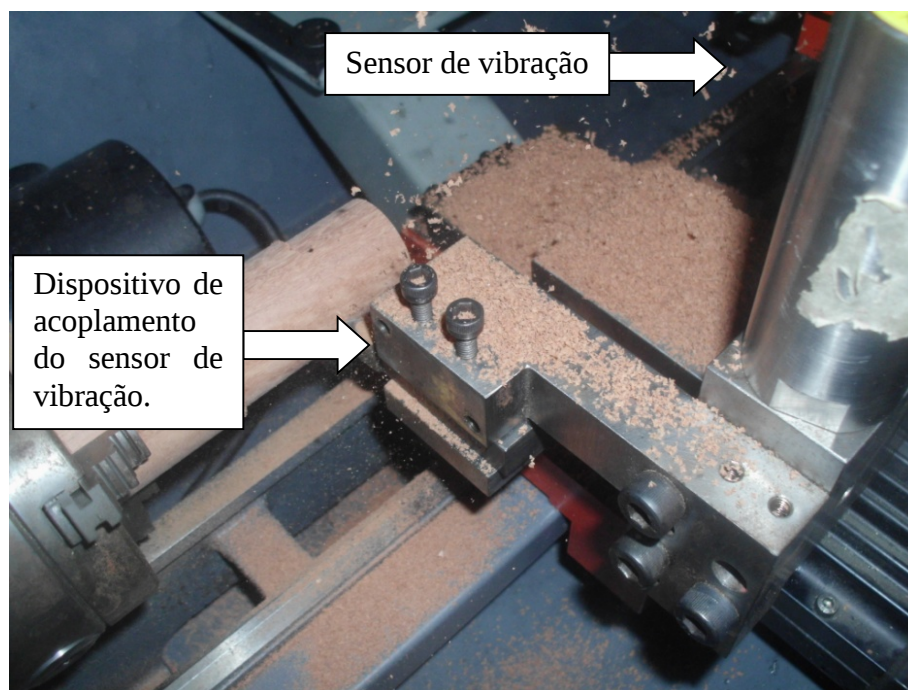
Figura 50 - Sensor de vibração utilizado nos ensaios.



Fonte: Autor

O sensor foi acoplado em um dispositivo junto ao cabeçote e porta ferramentas de forma que propiciasse a leitura da vibração do conjunto como um todo, como mostrado na Figura 51.

Figura 51 - Dispositivo de aquisição de dados de vibração.



Fonte: Autor.

Para a aquisição da potência consumida pelo motor, foi utilizado um sensor de efeito HALL da marca LEM e modelo AT5B10, o qual é construído na forma de alicate e foi acoplado aos fios do motor como mostrado na Figura 52.

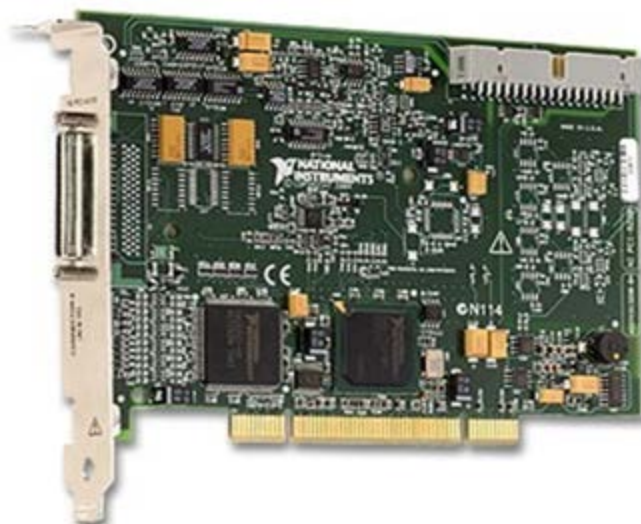
Figura 52 – Sensor de potência utilizado. Marca LEM, modelo AT5B10.



Fonte: Autor.

Os sensores foram conectados à uma placa de aquisição da marca National Instruments, modelo NI PCI 6220 (Figura 53), com a função de receber os sinais analógicos dos sensores e transformá-los em sinais digitais para ser interpretado pelo software instalado no microcomputador.

Figura 53 – Placa de aquisição de dados.



Fonte: Autor.

Para a medição da temperatura na ferramenta de usinagem e no corpo de prova foi utilizado uma câmera termográfica da marca FLIR®, modelo I3.

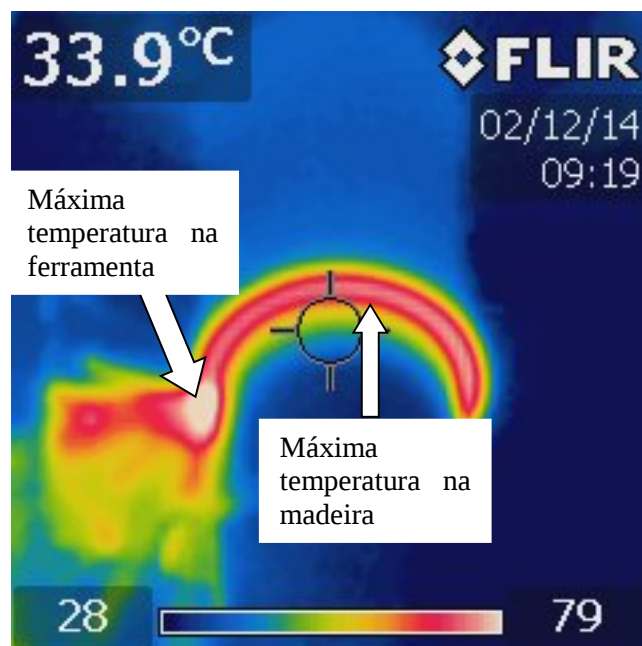
Figura 54 - Câmera termográfica utilizada para aquisição da temperatura.



Fonte: Autor.

As imagens termográficas foram coletadas para cada uma das três repetições após a metade do curso da ferramenta em cada ensaio para padronizar o tempo da aquisição. As imagens foram analisadas no software FLIR Tols+®. A máxima temperatura foi coletada na ponta da ferramenta e também no corpo de prova, como mostrado na Figura 55.

Figura 55 - Regiões de coleta e análise da temperatura.



Fonte: Autor.

#### 4.7 ANÁLISE DAS RUGOSIDADES

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf M 300, como mostrado na Figura 56.

As medições foram realizadas de forma aleatória, três vezes em cada região de cada corpo de prova utilizado e realizado uma média dos valores em suas respectivas regiões.

Foi utilizado um *cut-off* de 2,5 mm conforme estabelecido pela norma NBR ISO 4287 (2002).

Figura 56 - Rugosímetro modelo MarSurf M 300.



Fonte: Autor

#### 4.8 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15 com aberturas para o modo EP (pressão estendida), em atmosfera de  $N_2$ , a 5 kV (microscopia de baixa voltagem) em pressões da ordem de 60 Pa, coletando o sinal de elétrons retro espalhados com o detector VPSE-G3 (Figura 57), instalado no campus da Unesp de Guaratinguetá, na Faculdade de Engenharia. As imagens foram obtidas pelo Professor Dr. Titular - Microscopia e Caracterização de Estruturas, Luis Rogerio de Oliveira Hein.

Figura 57 - Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15



Fonte: (O Autor)

#### 4.9 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PELO MÉTODO DE TAGUCHI

O trabalho foi desenvolvido utilizando o método de Taguchi, o qual permite um planejamento com um menor número de ensaios ao invés de um fatorial completo.

Foram analisados três fatores diferentes com até 6 níveis de variação em um fator, ficando notado da seguinte forma:

Fator A corresponde à temperatura de tratamento térmico, sendo dividida em 6 níveis, nível 1 correspondente a madeira em temperatura ambiente sem tratamento para o controle; nível 2 correspondente à temperatura de 100°C; nível 3 correspondente ao tratamento em temperatura de 140°C; nível 4 temperatura de termorretificação de 160°C; nível 5 à temperatura de termorretificação de 180°C e nível 6 correspondente à temperatura de 200°C de termorretificação.

O fator B, corresponde ao tipo de madeira utilizado, sendo esse de duas espécies, divididos em dois níveis: nível 1 madeira de *Corymbia* e nível 2 madeira de *Pinus*.

O fator C, corresponde ao tipo de ferramenta de usinagem, sendo o nível 1 a ferramenta de metal duro; nível 2 a ferramenta de metal duro polido e o nível 3 a ferramenta de metal duro com recobrimento de TiB<sub>2</sub>.

A matriz ortogonal L 18 mista, utilizada para a realização dos ensaios está expressa na Tabela 1.

Tabela 1 - Matriz L 18 mista utilizada nos ensaios.

| Fator A | Fator B | Fator C |
|---------|---------|---------|
| 1       | 1       | 1       |
| 1       | 2       | 2       |
| 1       | 2       | 3       |
| 2       | 1       | 1       |
| 2       | 2       | 2       |
| 2       | 2       | 3       |
| 3       | 1       | 2       |
| 3       | 2       | 3       |
| 3       | 2       | 1       |
| 4       | 1       | 3       |
| 4       | 2       | 1       |
| 4       | 2       | 2       |
| 5       | 1       | 2       |
| 5       | 2       | 3       |
| 5       | 2       | 1       |
| 6       | 1       | 3       |
| 6       | 2       | 1       |
| 6       | 2       | 2       |

Fonte: Autor.

Os dados obtidos dos ensaios foram compilados no software comercial Minitab® 17 e expressos em gráficos que representam os efeitos principais das médias dos parâmetros analisados e o gráfico que representa os efeitos principais da relação S/N.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 DENSIDADE BÁSICA E DENSIDADE APARENTE

A densidade básica e aparente encontradas experimentalmente para as madeiras de *Pinus elliottii* e *Corymbia citriodora* utilizadas no ensaio de usinagem, estão expressas na Tabela 2.

Tabela 2 - Densidade média básica e aparente das madeiras de *Corymbia citriodora* e *Pinus Elliottii*.

| <b>Madeira</b>             | <b>Densidade Básica<br/>(<math>D_{bm}</math>) <math>\text{kg.m}^3</math></b> | <b>Densidade Aparente<br/>(<math>D_{apm, 12\%}</math>) <math>\text{kg.m}^3</math></b> |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Corymbia citriodora</i> | 731,7                                                                        | 959,1                                                                                 |
| <i>Pinus Elliottii</i>     | 355,9                                                                        | 463,83                                                                                |

Fonte: Autor.

A densidade encontrada expressa na Tabela 2 para a madeira de *Pinus elliottii* quando comparado com o da literatura onde o valor sua densidade aparente se apresenta em  $480 \text{ kg/m}^3$  a 15% de umidade e densidade básica de  $420 \text{ kg/m}^3$  (Pinheiro, 2014).

A densidade aparente de *Corymbia citriodora* encontrada na literatura é  $980 \text{ kg/m}^3$  até  $1180 \text{ kg/m}^3$  e a densidade básica média de  $769 \text{ kg/m}^3$  (Benjamin, 2006), o que evidencia que a densidade encontrada para esta madeira expressa na Tabela 2 está dentro do esperado quando comparado com a literatura.

A variação da densidade é esperada, pois a madeira é um material biológico, heterogêneo e com variabilidade de sua composição e anatomia na mesma planta e espécie, dependendo dos tratos culturais e região de seu desenvolvimento.

## 5.2 ANÁLISE DA POTÊNCIA EFETIVA DE CORTE

Utilizando o método de Taguchi, os resultados obtidos da potência efetiva de corte em relação aos fatores: temperatura de termorretificação (Fator A), espécie da madeira (Fator B) e a ferramenta utilizada (Fator C) são apresentados na Tabela 3. Através da análise de variância sinal ruído (S/N), admitindo um valor significativo de p-value ao nível de 10%, podemos verificar que os fatores B e C, correspondentes à madeira e ferramenta são significativos.

Tabela 3 - Análise de Variância para Médias da Potência Efetiva.

| Fonte            | GL | SQ Seq  | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | F      | P      |
|------------------|----|---------|----------|----------|--------|--------|
| Temperatura      | 5  | 930,8   | 1228     | 245,6    | 3,04   | 0,152  |
| Madeira          | 1  | 9795,3  | 9795,3   | 9795,33  | 121,08 | 0*     |
| Ferramenta       | 2  | 753     | 1105,6   | 552,81   | 6,83   | 0,051* |
| Erro de Resíduos | 4  | 323,6   | 323,6    | 80,9     |        |        |
| Total            | 17 | 12925,8 |          |          |        |        |

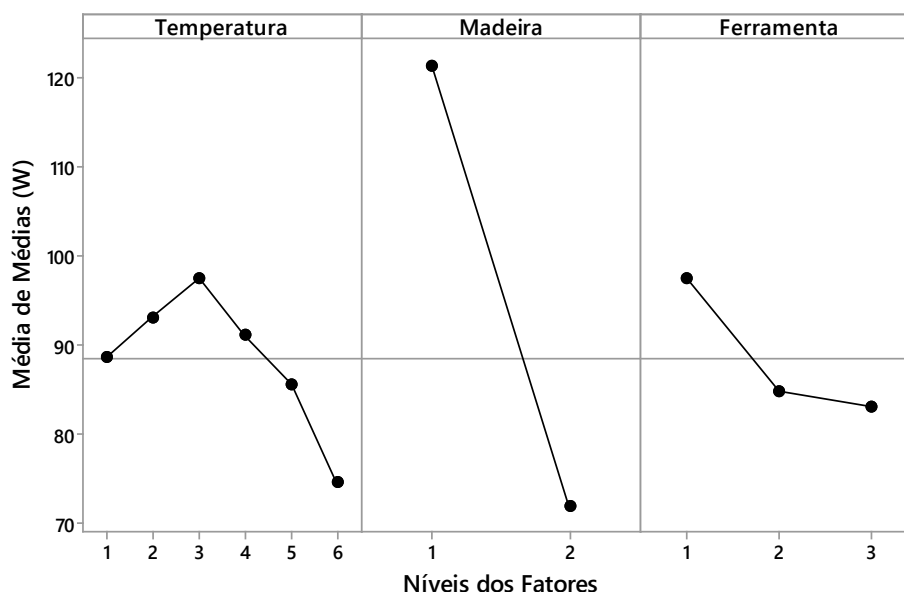
Fonte: Autor

\*valor significativo ao nível de 10% de significância.

Legenda: número de graus de liberdade (GL); soma dos quadrados sequenciais (SQ Seq); soma dos quadrados ajustados (SQ (Aj.)); quadrados médios ajustados (QM (Aj.)); estatística F (F) e p-valor (P).

No gráfico dos efeitos principais das médias da potência efetiva na Figura 58, é evidenciando que o fator B (madeira) no nível 2 (pinus) foi aquela que requereu menor potência efetiva durante o torneamento, em média 72W. Para a madeira de *Corymbia* (nível 1) a potência média foi de 102,5W, uma diferença média de 30,5W entre as espécies estudadas. Gonçalves (2000) explica que força de corte para madeiras mais densas pode ser até cinco vezes maior que a força de corte requerida para madeiras de menor densidade, o que evidencia o fato da madeira de *Corymbia citriodora* utilizar uma potência maior de usinagem em relação à madeira de *Pinus Elliottii*, dado que a diferença de densidade conforme a Tabela 2 que mostra a densidade da *Corymbia citriodora* maior que a densidade do *Pinus Elliottii*.

Figura 58 - Gráfico dos efeitos principais das médias da potência efetiva.



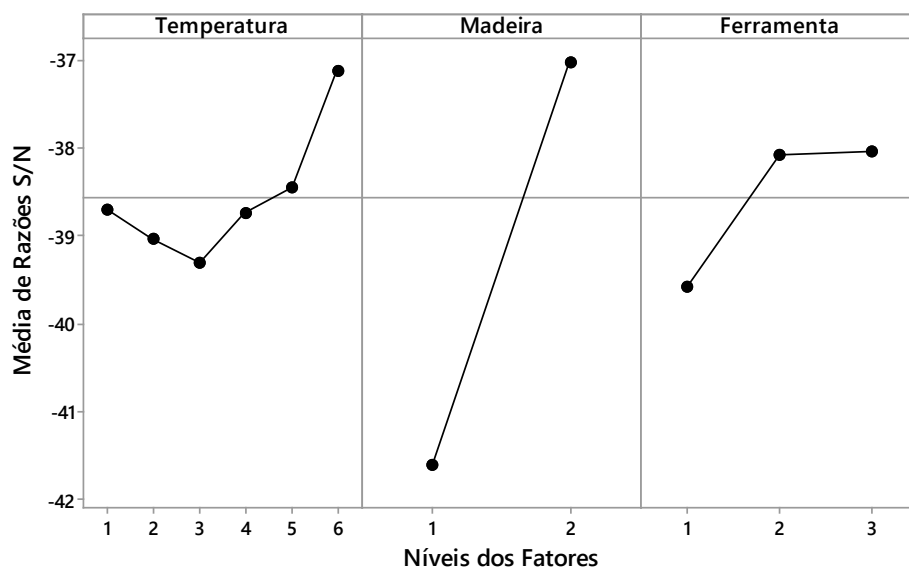
Fonte: Autor.

Na análise do gráfico da Figura 58 em relação ao fator C (ferramenta), verifica-se que a maior potência requerida foi no nível 1 (ferramenta de metal duro) com uma média de 97,6W, seguida do nível 2 (ferramenta de metal duro polido) com potência efetiva de corte média de 84,8W e a menor potência no nível 3 (ferramenta de metal duro revestida) com uma média de 83W. Verifica-se uma maior influência na potência efetiva quando utilizada a ferramenta de metal duro em relação às outras ferramentas, este fato se deve ao menor coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça, devido ao polimento e ao revestimento de diboreto de titânio das ferramentas, que consequentemente diminui este coeficiente de atrito e também a força de corte segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

Embora a temperatura do tratamento térmico das madeiras não esteja a um nível de significância de 10% para os efeitos sobre a potência efetiva do torno, é evidente que quanto maior a temperatura de usinagem, menor é a potência requerida. Este fato se deve à tanto a madeira de *Pinus elliottii* quanto a madeira de *Corymbia citriodora*, diminuírem a sua resistência devido à degradação de componentes com o aumento da temperatura do tratamento térmico.

Os resultados obtidos podem variar até mesmo na mesma espécie, pois Lopes et al. (2014) verificaram a diferença de densidades na madeira de Teca termorretificada em relação ao espaçamento do plantio.

Figura 59 - Gráfico dos efeitos principais da relação S/N da potência efetiva.



Sinal-ruído: Menor é melhor

Fonte: Autor.

O gráfico de S/N representado na Figura 59, evidencia que no fator B (madeira), o nível 2 (pinus) e no fator C (ferramenta), nível 3 (metal duro revestido) são aqueles que demonstram uma melhor condição S/N na relação "menor é melhor", pois quanto maior for o seu valor, menor será a potência requerida no torneamento.

### 5.3 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

#### 5.3.1 Rugosidade $R_t$

Na análise da rugosidade  $R_t$  utilizando o método de Taguchi, verifica-se através da Tabela 4 que os fatores temperatura (A) e espécies (B) possuem um valor de p-value significativo ao nível de 10% no teste ANOVA.

O gráfico dos efeitos das médias da rugosidade  $R_t$  da Figura 60 evidencia que no fator A (temperatura) o nível 5 (temperatura de termorretificação de 180°C) é aquele que apresenta menor rugosidade  $R_t$  e para o fator espécie o nível 2 (pinus) é aquele que apresenta menor rugosidade  $R_t$ .

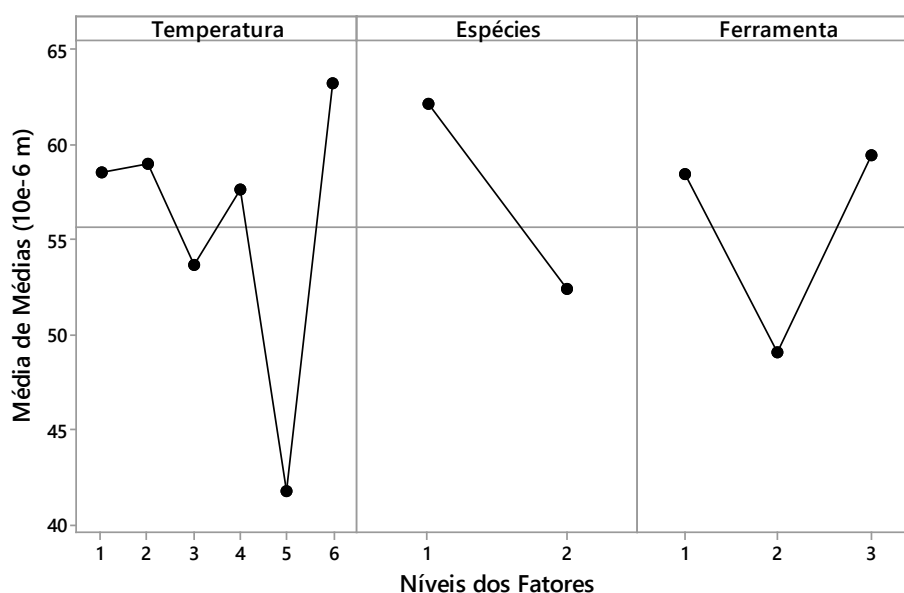
Tabela 4 - Análise de Variância para Médias da Rugosidade  $R_t$ .

| Fonte            | GL | SQ Seq | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | F     | P      |
|------------------|----|--------|----------|----------|-------|--------|
| Temperatura      | 5  | 837,1  | 834,4    | 166,88   | 5,58  | 0,06*  |
| Espécies         | 1  | 385,2  | 385,2    | 385,25   | 12,88 | 0,023* |
| Ferramenta       | 2  | 395,6  | 125,9    | 62,95    | 2,1   | 0,238  |
| Erro de Resíduos | 4  | 119,7  | 119,7    | 29,92    |       |        |
| Total            | 17 | 2353,3 |          |          |       |        |

Fonte: Autor

\*valor significativo ao nível de 10% de significância.

Legenda: número de graus de liberdade (GL); soma dos quadrados sequenciais (SQ Seq); soma dos quadrados ajustados (SQ (Aj.)); quadrados médios ajustados (QM (Aj.)); estatística F (F) e p-valor (P).

Figura 60- Gráfico dos efeitos principais das médias da rugosidade  $R_t$ .

Fonte: Autor.

Quando comparado as temperaturas de tratamento térmico (Fator A), a rugosidade  $R_t$  se apresentou menor que o controle (Nível 1) para os níveis 2, 4 e 5 correspondentes as temperaturas de 140°C, 160°C e 180°C.

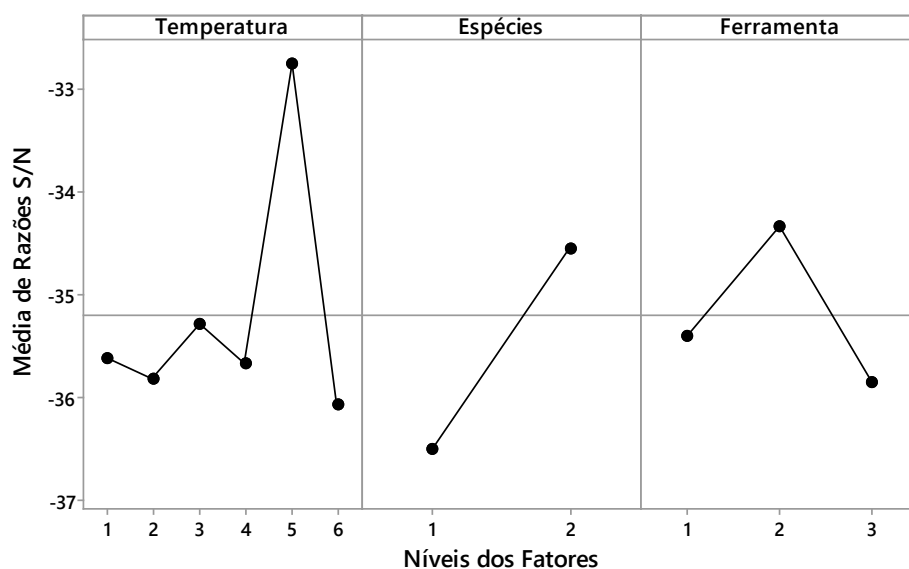
O tratamento térmico das madeiras à temperatura de 140°C propiciou um decréscimo na rugosidade  $R_t$  em 17,54% em comparação ao controle (Nível 1), resultado próximo do encontrado por Budakçi et al (2013) na superfície das madeiras termorretificadas após a operação de aplainamento, onde a madeira de Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) apresentou uma redução em 18,3% da rugosidade  $R_t$  em relação ao controle, 6,7% para a madeira de Eastern

Beech (*Fagus orientalis*), 10,7% para a madeira de Oak (*Quercus petrae L.*) e um acréscimo de 22% para a madeira de Fir (*Abies bornmülleriana* Mattf.).

Comparando o nível 3 (140°C) com o nível 4 (160°C) verifica-se um aumento em 7,5% na rugosidade, resultado próximo do encontrado por Budakçi et al (2013) na operação de aplainamento, o qual determinou um acréscimo de Scots Pine (*Pinus sylvestris L.*) apresentou uma redução em 16,1% da rugosidade em à temperatura de tratamento de 140°C para 160°C, 8,6% para a madeira de Eastern Beech (*Fagus orientalis*), 2,3% para a madeira de Oak (*Quercus petrae L.*) e um acréscimo de 16,6% para a madeira de Fir (*Abies bornmülleriana* Mattf.).

A média da rugosidade  $R_t$  na superfície usinada da madeira termicamente tratada a 180°C é 24,6% menor em relação à superfície da madeira não tratada termicamente (controle), resultado próximo ao de Korkut et al. (2008) o qual o valor da rugosidade  $R_t$  é 27,3% menor para a madeira de *Corylus colurna L* tratada termicamente por 6h a temperatura de 180°C em relação à madeira não termorretificada, evidenciando uma tendência da diminuição da rugosidade  $R_t$  enquanto da madeira tratada até a temperatura de 180°C.

Figura 61 - Gráfico dos efeitos principais da relação S/N da rugosidade  $R_t$ .



Sinal-ruído: Menor é melhor

Fonte: Autor.

O tipo de madeira usinada (fator B), é uma das variáveis que influencia na rugosidade da superfície usinada. A madeira de Pinus, foi aquela que se apresentou com menor rugosidade  $R_t$  frente a madeira de Corymbia. Esta diferença se deve aos fatores anatômicos que constituem o lenho, pois a madeira de Corymbia apresenta em sua anatomia células vasos, espaços este que

aumenta a amplitude do relevo da superfície usinada. Verifica-se a partir dos dados de Budakçi et al (2013) acima notados, que as diferentes espécies de madeiras por eles analisadas, também apresentam diferentes valores de rugosidade para a mesma operação, evidenciando que sua anatomia influencia no acabamento da superfície.

Como esperado o gráfico dos efeitos principais da rugosidade S/N da Figura 61 apresenta-se inversamente proporcional ao gráfico das médias da Figura 60, o qual o fator A, nível 5 apresenta maior relação sinal/ruído assim como o fator B, nível 2 para relação "menor melhor".

### 5.3.2 Rugosidade $R_a$

No teste ANOVA na análise da rugosidade  $R_a$  utilizando o método de Taguchi, verifica-se através da Tabela 5 que o fator espécies (B) possui um valor de p-value significativo ao nível de 10%.

Tabela 5 - Análise de Variância para Médias da Rugosidade  $R_a$ .

| Fonte            | GL | SQ Seq | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | F    | P      |
|------------------|----|--------|----------|----------|------|--------|
| Temperatura      | 5  | 10,99  | 9,345    | 1,8689   | 2,79 | 0,171  |
| Espécies         | 1  | 3,227  | 3,227    | 3,2267   | 4,82 | 0,093* |
| Ferramenta       | 2  | 2,816  | 3,297    | 1,6483   | 2,46 | 0,201  |
| Erro de Resíduos | 4  | 2,678  | 2,678    | 0,6694   |      |        |
| Total            | 17 | 25,071 |          |          |      |        |

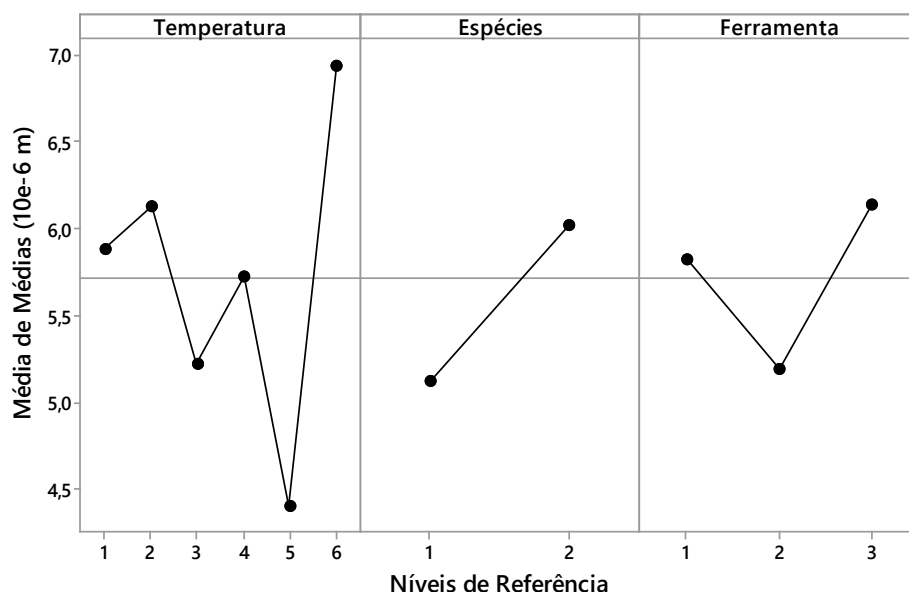
Fonte: Autor

\*valor significativo ao nível de 10% de significância.

Legenda: número de graus de liberdade (GL); soma dos quadrados sequenciais (SQ Seq); soma dos quadrados ajustados (SQ (Aj.)); quadrados médios ajustados (QM (Aj.)); estatística F (F) e p-valor (P).

Verifica-se através do gráfico da Figura 62 que a espécie de *Corymbia citriodora* apresentou uma rugosidade superficial  $R_a$  cerca de 14,9% menor que a rugosidade da superfície da madeira de *Pinus elliottii*, esta diferença está ligada à anatomia da madeira em estudo, pois a madeira de *Corymbia* com maior densidade e maior resistência, propicia à ferramenta um corte mais uniforme das fibras, diminuindo defeitos como fibra felpuda, normalmente encontrada em superfícies usinadas de madeira de *Pinus*.

Figura 62 - Gráfico dos efeitos principais das médias da rugosidade  $R_a$ .



Fonte: Autor.

O gráfico dos efeitos principais das médias da rugosidade  $R_a$  da Figura 62, demonstra que o efeito da temperatura de termorretificação na rugosidade da madeira é adverso, mas com uma tendência de diminuição deste parâmetro do nível 3 (140° C) até o nível 5 (180° C) em relação ao controle (nível 1).

A rugosidade diminui com o aumento da temperatura de termorretificação, pois da temperatura ambiente até a temperatura de 180°C percebe-se esta atenuação e um aumento em  $R_a$  para o tratamento térmico à temperatura de 200°C. O mesmo efeito encontrado nas madeiras em estudo, da diminuição de  $R_a$  até a faixa de 180°C e aumento de  $R_a$  na faixa de temperatura de 200°C foi encontrado na madeira de Southern Pine (*Pinus taeda*) por Salca e Hiziroglu (2014) que analisaram a rugosidade  $R_a$  antes e depois da termorretificação nas temperaturas de 120° C e 190° C. O mesmo comportamento da rugosidade  $R_a$  foi encontrado na madeira de East redcedar (*Juniperus virginiana*) por Priadi e Hiziroglu (2013) para o tratamento na mesma faixa de temperatura em oito horas de exposição.

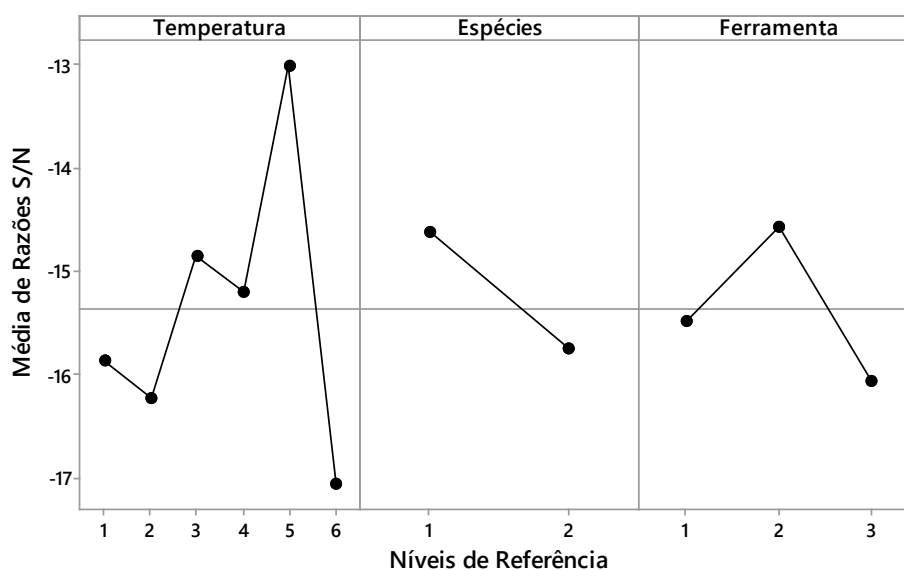
O acréscimo da rugosidade  $R_a$  da temperatura ambiente até a temperatura de 100°C e depois um decréscimo no valor até a temperatura de 180°C o qual é o menor valor de  $R_a$  encontrado nas faixas da temperatura de tratamento térmico e, em seguida o aumento de  $R_a$  para a temperatura de termorretificação a 200°C foi análogo ao comportamento das madeiras termicamente tratadas nas mesmas faixas de temperatura de *Corymbia citriodora*, *Pinus taeda* (SALCA; HIZIGLU, 2014) e *Juniperus virginiana* (PRIADI; HIZIROGLU, 2013).

Segundo Korkut, et al. (2010) a rugosidade superficial pode diminuir em até 26% dependendo da madeira e tipo de tratamento térmico empregado combinando temperatura e tempo de exposição, isto acontece devido à transição da lignina para um estado termoplástico o que resulta na compactação da superfície da rugosidade.

Unsal e Ayrilmis (2005) verificaram um diminuição em 27,9% na rugosidade  $R_a$  para a madeira de *Eucalyptus* tratada termicamente a 180°C em relação a madeira de controle, confirmando que o resultado está dentro do esperado, pois para a mesma temperatura de tratamento verificamos uma redução de 25,3% na média da rugosidade  $R_a$ .

Os resultados encontrados estão de acordo com Palermo et al (2015) onde afirmam que o tratamento térmico diminui a resistência, aumentando a friabilidade, permitindo com que as superfícies usinadas sejam obtidas com menor rugosidade quando comprado a tratamentos térmicos com menores temperaturas.

Figura 63 - Gráfico dos efeitos principais da relação S/N da rugosidade  $R_a$ .



Sinal-ruído: Menor é melhor

Fonte: Autor.

Para temperaturas de tratamento térmico acima de 180°C, verifica-se um aumento expressivo da rugosidade  $R_a$  da superfície usinada, mesmo efeito foi encontrado por Moura (2009) para a madeira de eucalipto no qual foi avaliada a superfície da madeira termorretificada após a operação de lixamento. O comportamento da curva da Figura 62 na análise da temperatura de tratamento térmico é bem próxima do encontrado por Moura (2009) o qual

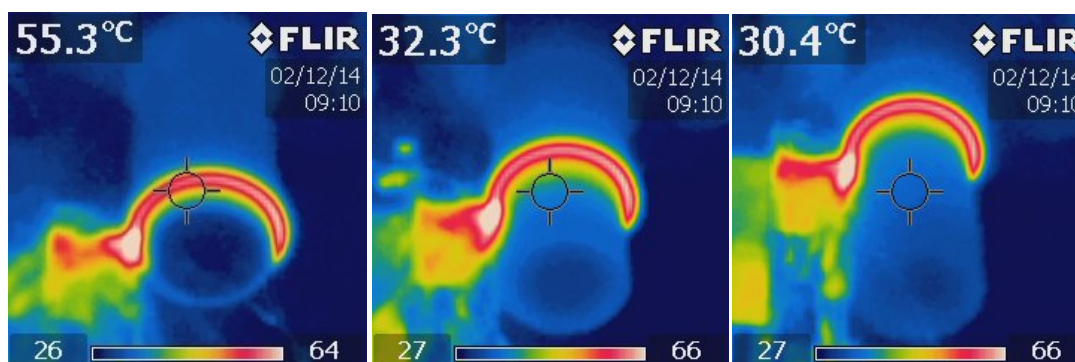
verifica-se um aumento da rugosidade até a temperatura de tratamento de 140°C, após esta faixa uma diminuição da rugosidade e o aumento novamente após 180°C.

A relação sinal/ruído é mostrada na Figura 63, e está dentro do esperado, sendo inversamente proporcional ao gráfico dos efeitos principais das médias da rugosidade  $R_a$  da Figura 62, evidenciando um melhor sinal/ruído no fator B (espécie) no nível 1 (*Corymbia citriodora*) na relação "menor é melhor".

#### 5.4 TEMPERATURA NA FERRAMENTA

A temperatura na interface ferramenta peça foi avaliada a partir de fotos termográficas que estão exemplificadas na Figura 64 para a madeira de *Pinus elliottii* e na Figura 65 para a madeira de *Corymbia citriodora*.

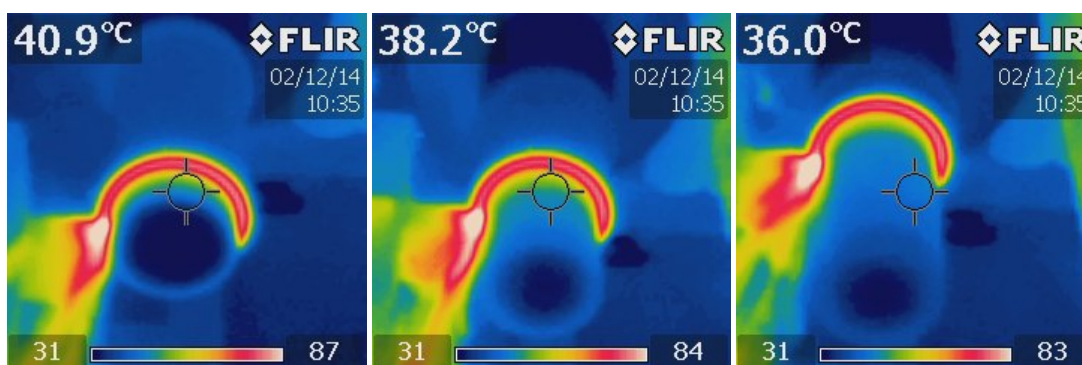
Figura 64 - Termográfica da usinagem da madeira de *Pinus elliottii* termorretrificada.



Fonte: Autor

No teste ANOVA na análise da temperatura na ponta da ferramenta em contato com o corpo de prova utilizando o método de Taguchi, verifica-se através da Tabela 6 - que não houve p-value significativo ao nível de 10% para nenhum dos fatores analisados.

Figura 65 - Termografia da madeira de *Corymbia citriodora* termorretificada.



Fonte: Autor

Tabela 6 - Análise de Variância para Médias das temperaturas na ponta da ferramenta em contato com o corpo de prova durante a usinagem.

| Fonte            | GL | SQ Seq  | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | F    | P     |
|------------------|----|---------|----------|----------|------|-------|
| Temperatura      | 5  | 8,1939  | 11,2194  | 2,2439   | 3,91 | 0,106 |
| Espécies         | 1  | 0,3296  | 0,3296   | 0,3296   | 0,57 | 0,491 |
| Ferramenta       | 2  | 2,6943  | 4,4265   | 2,2132   | 3,85 | 0,117 |
| Erro de Resíduos | 4  | 2,2972  | 2,2972   | 0,5743   |      |       |
| Total            | 17 | 17,8113 |          |          |      |       |

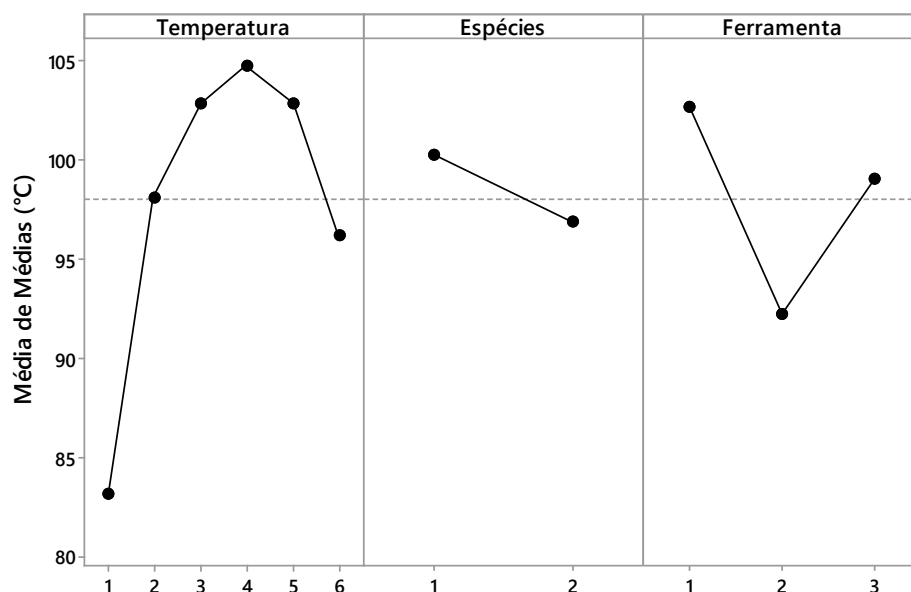
Fonte: Autor

Legenda: número de graus de liberdade (GL); soma dos quadrados sequenciais (SQ Seq); soma dos quadrados ajustados (SQ (Aj.)); quadrados médios ajustados (QM (Aj.)); estatística F (F) e p-valor (P).

A Figura 66 exibe o gráfico dos efeitos principais para as médias das temperaturas na ponta da ferramenta durante a usinagem.

Verifica-se que para o fator A (temperatura de tratamento térmico), a temperatura na ferramenta vai sofrendo acréscimo do nível 1 (controle) onde encontra-se com uma média de 83,4°C até o nível 4 (temperatura de tratamento de 160°C) com média de 104,8°C, depois diminui até o nível 6 (temperatura de tratamento térmico de 200°C) com média de 96,2°C, este efeito de curva de concavidade voltada para baixo é próximo do comportamento da curva da potência efetiva da Figura 58. Machado et al (2011) afirmam que a temperatura na interface ferramenta/peça é proveniente trabalho de cisalhamento interno do material e do atrito entre as duas superfícies, provadas pela sua aderência. Desta forma podemos concluir que as forças de atrito e força mecânica (responsável pelo cisalhamento) nesta região foram maiores nos intervalos do nível 2 (tratamento térmico de 100°C) ao nível 5 (tratamento de 180°C) com pico no nível 4 quando analisada a Figura 66 da temperatura na ferramenta e quando analisados o gráfico da Figura 58 da potência efetiva de corte, verifica-se do nível 2 (100°C) ao nível 4 (160°C) com pico no nível 3 (140°C).

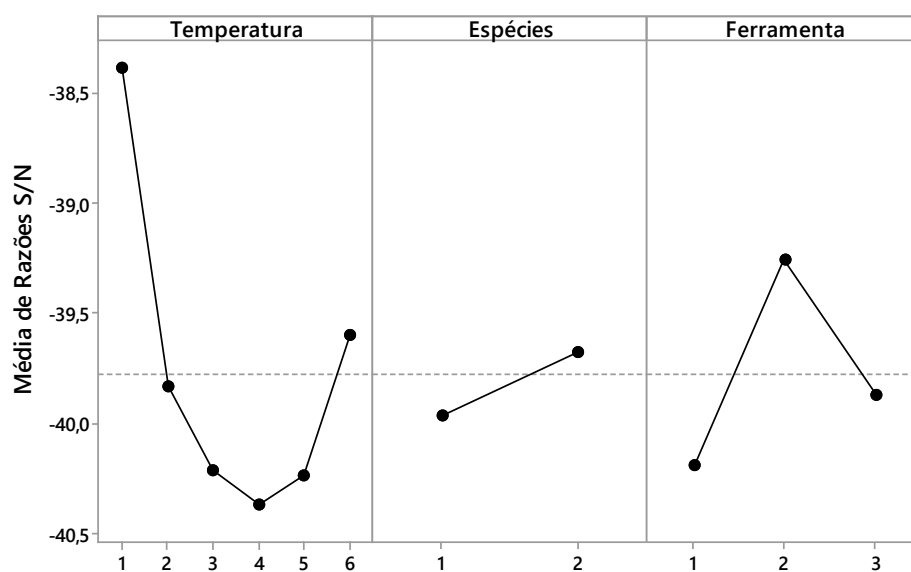
Figura 66 - Gráfico dos efeitos principais para as médias da temperatura na ponta da ferramenta.



Fonte: Autor.

No fator B (espécie de madeira) mostrado no gráfico da Figura 66, verifica-se uma maior temperatura no nível 1 (*Corymbia citriodora*) em relação ao nível 2 (*Pinus elliottii*), fato este que se deve à maior densidade do *Corymbia* e consequentemente maior força aplicada, gerando maior calor, assim aumentando a temperatura na ponta da ferramenta.

Figura 67 - Gráfico dos efeitos principais para a razão S/N da temperatura na ponta da ferramenta.



Sinal-ruído: Menor é melhor

Fonte: Autor.

Na análise do gráfico fator C (tipo de ferramenta) mostrado na Figura 66, fica evidenciado que a ferramenta que possui a maior temperatura em sua ponta é a ferramenta de metal duro (nível 1), juntamente com o resultado da potência efetiva mostrado na Figura 58 no qual o nível 1 (metal duro) também demonstra maior consumo, podemos reafirmar que esta ferramenta é aquela que possui o maior coeficiente de atrito, provocando maior aquecimento e maior potência requerida.

O gráfico dos efeitos principais para a razão sinal/ruído da Figura 67 está dentro do esperado com o sinal é inversamente proporcional à resposta das médias presentes no gráfico da Figura 66.

## 5.5 TEMPERATURA DE USINAGEM

Na análise da temperatura de usinagem com o teste ANOVA, utilizando o método de Taguchi, os fatores Temperatura (A), Espécies (B) e Ferramenta (C) apresentaram um nível de significância de 10%.

Tabela 7 - Análise de Variância para Médias das temperaturas de usinagem.

| Fonte            | GL | SQ Seq | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | F     | P      |
|------------------|----|--------|----------|----------|-------|--------|
| Temperatura      | 5  | 10,218 | 9,883    | 1,9765   | 4,09  | 0,098* |
| Espécies         | 1  | 7,685  | 7,685    | 7,6848   | 15,91 | 0,016* |
| Ferramenta       | 2  | 11,958 | 7,547    | 3,7736   | 7,81  | 0,042* |
| Erro de Resíduos | 4  | 1,932  | 1,932    | 0,4829   |       |        |
| Total            | 17 | 33,194 |          |          |       |        |

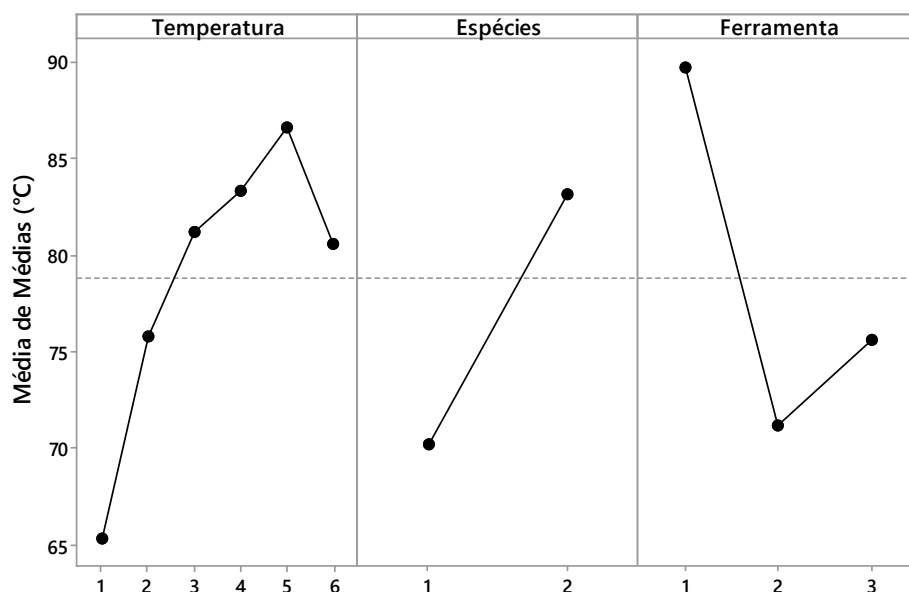
Fonte: Autor

\*valor significativo ao nível de 10% de significância.

Legenda: número de graus de liberdade (GL); soma dos quadrados sequenciais (SQ Seq); soma dos quadrados ajustados (SQ (Aj.)); quadrados médios ajustados (QM (Aj.)); estatística F (F) e p-valor (P).

É visto através do gráfico da Figura 68 que para o fator A (temperatura de termorretificação), incide em um aumento da temperatura média de usinagem do nível 1 (material sem tratamento térmico) até o nível 5 (tratada a 180°C), isto se deve pela alteração da composição da madeira pelo processo de pirólise resultando na alteração de propriedades térmicas do material.

Figura 68 - Gráfico dos efeitos principais para as médias da temperatura de usinagem.



Fonte: Autor.

Com o aumento da temperatura, a hemicelulose é degradada aumentando o teor de lignina e celulose da madeira (BOONSTRA, 2006), e reduzindo o teor de água no material. A celulose possui baixo coeficiente de condutibilidade térmica, sendo assim, é considerado um mal condutor de energia térmica, desta forma aliada ao baixo teor de umidade, dificulta a dissipação da energia térmica da peça usinada. Kol e Sefil (2011) encontraram a diminuição da condutividade térmica para as madeiras de *Abies bornmülleriana* e *Fagus orientalis* em função da temperatura de tratamento térmico, Kaboorani (2009) verificou que a estabilidade térmica de fibras de madeira termorretificada é aumentada em função da temperatura de termorretificação, por consequência da degradação das hemiceluloses e celulose.

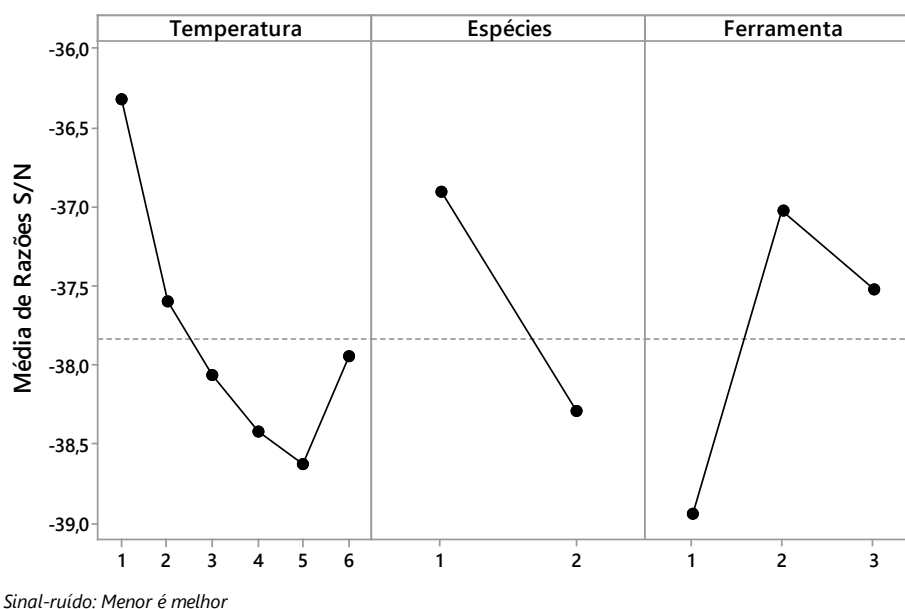
Outro fator que influencia a condutibilidade térmica da madeira é a densidade, pois Siau (1984) afirma que a condutibilidade térmica da madeira é diretamente proporcional a sua densidade, sendo desta forma a diminuição da densidade pelo processo de termorretificação verificado em diversos trabalhos também é um fator que pode influenciar na dissipação da energia térmica e consequentemente na temperatura da usinagem.

Para o fato B (espécie de madeira) a maior temperatura média de usinagem é para a madeira de *Pinus*, devido a sua menor densidade e consequentemente menor coeficiente de condutividade térmica em relação a madeira de *Corymbia citriodora*.

No fator C (ferramenta) verifica-se uma temperatura menor de usinagem para os níveis 2 e 3 em relação ao nível 1. Esta diferença se dá devido ao coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça, sendo este menor em ferramentas polidas e com recobrimento, o que implica em menor força de corte e consequentemente menor temperatura de usinagem (DINIZ, MARCONDES, COPPINI; 2013).

O gráfico dos efeitos principais para a razão sinal/ruído da Figura 69 está dentro do esperado com o sinal inversamente proporcional à resposta das médias presentes no gráfico da Figura 68.

Figura 69 - Gráfico dos efeitos principais para a razão S/N da temperatura de usinagem.



Fonte: Autor

## 5.6 VIBRAÇÃO

Na análise da vibração na usinagem de madeira termorretificada com o teste ANOVA, utilizando o método de Taguchi, os fatores Temperatura (A), Espécies (B) e Ferramenta (C) não apresentaram um nível de significância de 10% como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise de Variância para Médias da Vibração.

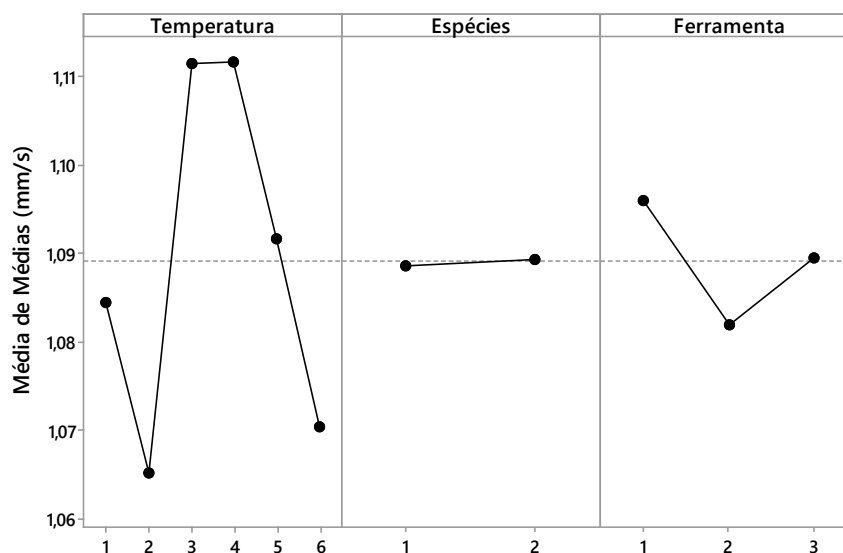
| Fonte            | GL | SQ Seq   | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | F    | P     |
|------------------|----|----------|----------|----------|------|-------|
| Temperatura      | 5  | 0,005849 | 0,0073   | 0,00146  | 7,5  | 0,137 |
| Espécies         | 1  | 0,000002 | 0,000002 | 0,000002 | 0,01 | 0,925 |
| Ferramenta       | 2  | 0,0006   | 0,001688 | 0,000844 | 4,34 | 0,129 |
| Erro de Resíduos | 4  | 0,000778 | 0,000778 | 0,000195 |      |       |
| Total            | 17 | 0,009893 |          |          |      |       |

Fonte: Autor

Legenda: número de graus de liberdade (GL); soma dos quadrados sequenciais (SQ Seq); soma dos quadrados ajustados (SQ (Aj.)); quadrados médios ajustados (QM (Aj.)); estatística F (F) e p-valor (P).

O gráfico da Figura 70 apresenta os resultados das médias vibração do cabeçote na operação de torneamento. Para os fatores A (temperatura), B (espécie da madeira) e C (ferramenta utilizada) os gráficos seguem o padrão das curvas encontradas na análise da potência efetiva mostrada pela Figura 58 e análise da temperatura na ferramenta apresentado pela Figura 66.

Figura 70 - Gráfico dos efeitos principais para as médias da vibração na operação de usinagem.



Fonte: Autor

Na análise da temperatura, verifica-se maior vibração nos níveis 3 e 4, mesmos níveis que representam maior temperatura na ponta da ferramenta e potência efetiva utilizada,

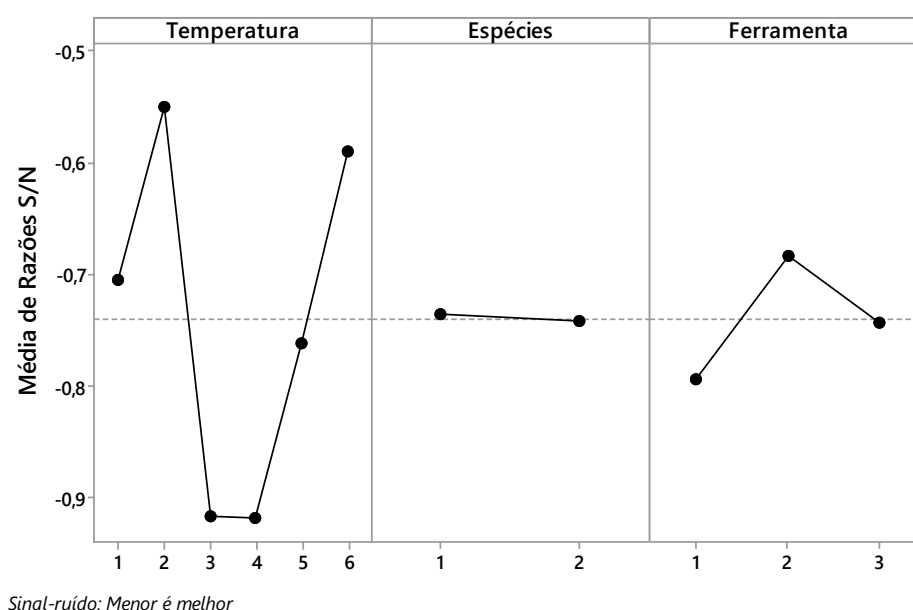
evidenciando que o esforço realizado nas madeiras termorretificadas nestas temperaturas foram maiores em relação aos outros níveis.

Comparando os resultados obtidos pelas espécies podemos relacionar a densidade da espécie, fator que influencia a força de corte e por consequência o aumento da vibração do conjunto.

Os resultados das ferramentas, mais uma vez destacamos a ferramenta de metal duro como sendo aquela com maior intensidade de vibração, podendo atribuir ao coeficiente de atrito da ferramenta.

O gráfico dos efeitos principais para a razão S/N apresentado na Figura 71 está dentro do esperado, com valores inversamente proporcionais do gráfico das médias.

Figura 71 - Gráfico dos efeitos principais para a razão S/N da vibração na operação de usinagem.



Fonte: Autor

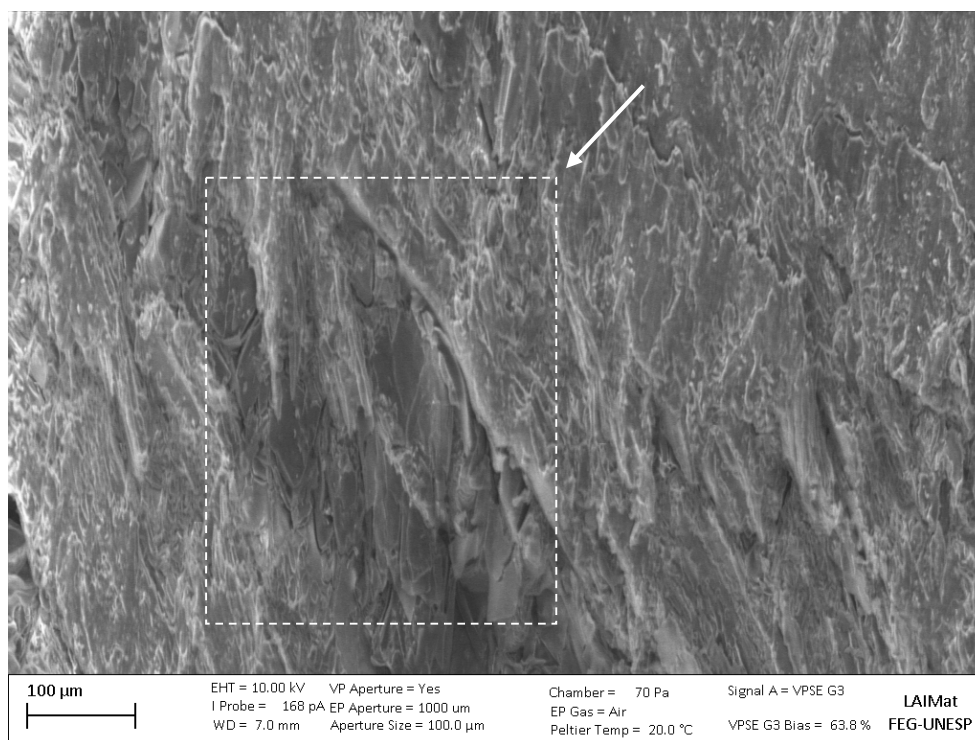
## 5.7 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES USINADAS DOS CORPOS DE PROVA UTILIZANDO O MICROSCÓPIO DE ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).

Da Figura 72 à Figura 79 são exibidas as superfícies usinadas dos corpos de prova da madeira de *Corymbia citriodora* com diferentes temperaturas de tratamentos térmicos e diferentes ferramentas, obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para um aumento de 300x e 1000x.

Na combinação 1-1-1, correspondente a madeira sem tratamento térmico, da espécie de *Corymbia citriodora* e ferramenta de metal duro, representadas pela Figura 72 e Figura 73, é possível perceber um alto índice de fibras arrancadas ao invés de cortadas pela ferramenta.

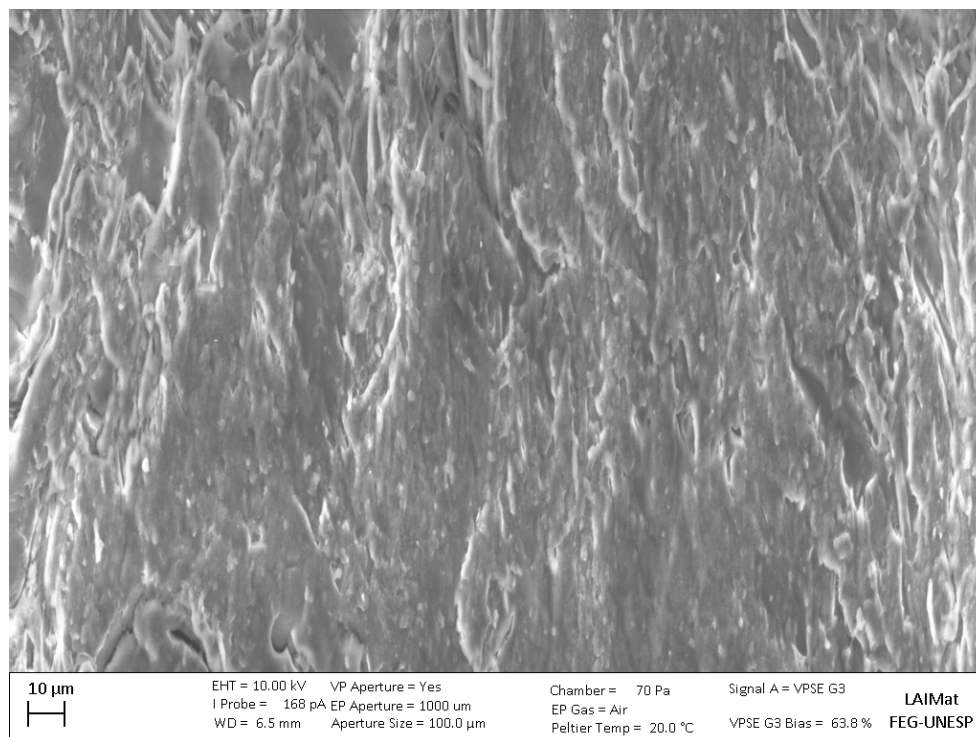
Na Figura 72 a seta indica uma região grande na qual é evidente o arrancamento das fibras, causando o aparecimento de crateras proporcionando uma superfície irregular.

Figura 72 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 1-1-1 (madeira temperatura ambiente, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro).



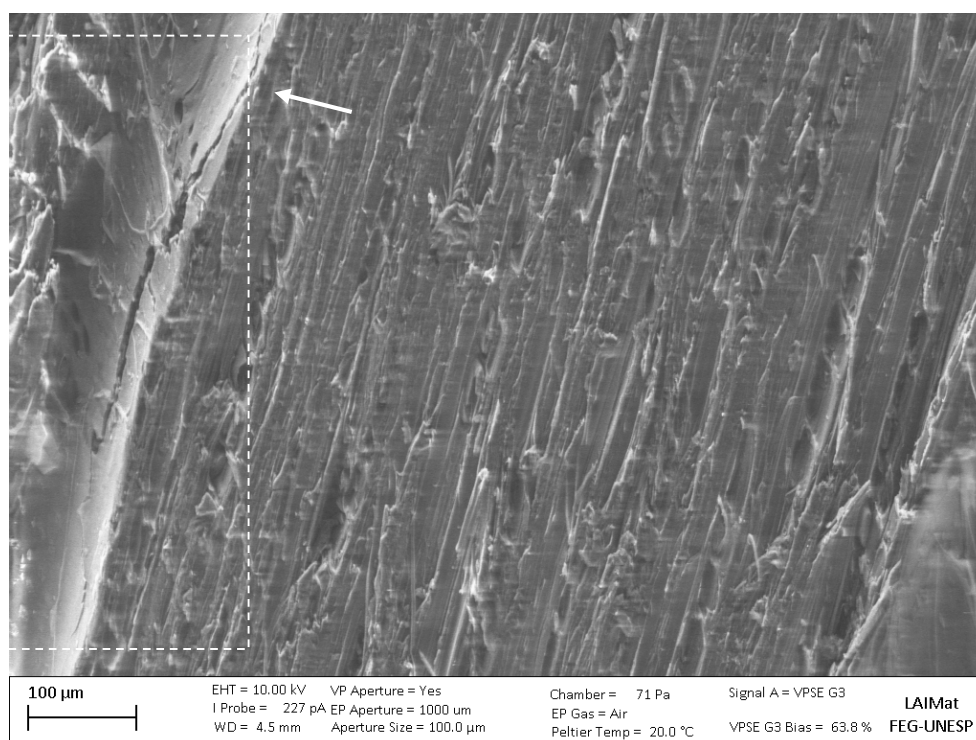
Fonte: Autor.

Figura 73 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 1-1-1 (madeira temperatura ambiente, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro).



Fonte: Autor.

Figura 74 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 4-1-3 (termorretificação a 180°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro revestida).



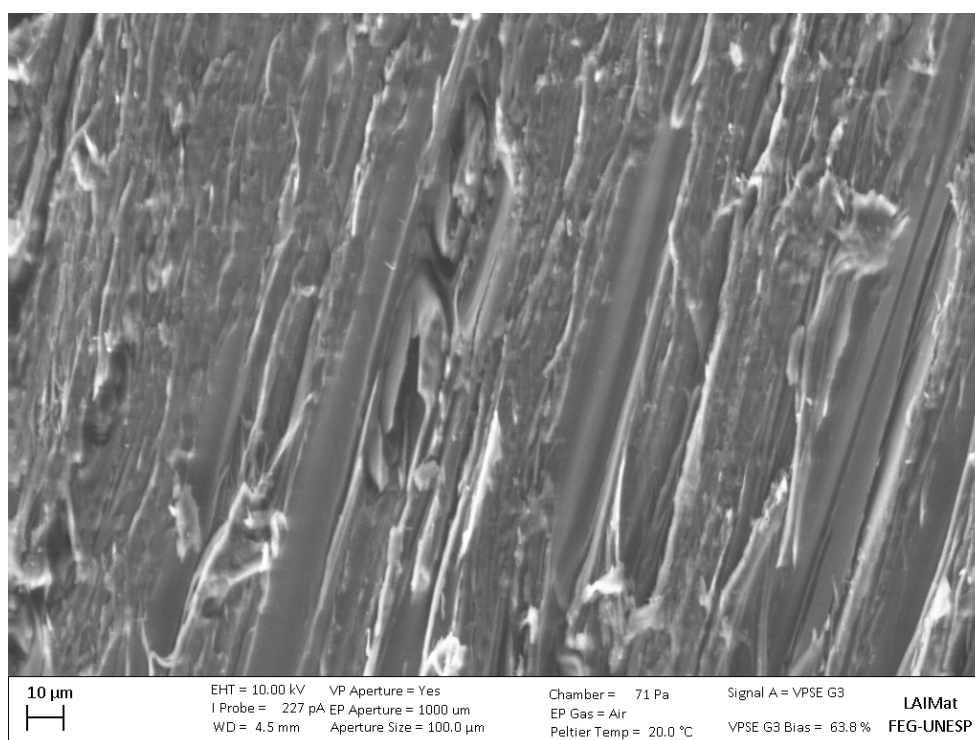
Fonte: Autor.

Entre as imagens obtidas, aquela que se destaca sendo mais homogênea é a da Figura 74 e Figura 75 do corpo de prova de combinação 4-1-3, sendo temperatura de termorretificação de 160°C, madeira de *Corymbia citriodora* e ferramenta de metal duro revestida.

Na região indicada da Figura 74, verifica-se a presença de elementos de vaso, região que corresponde a maior depressão da superfície analisada, que embora colabore para maior irregularidade da superfície e justifique a maior rugosidade  $R_t$  encontrada para a madeira de *Corymbia citriodora* em relação ao *Pinus elliottii*, verificamos que o elemento de vaso foi cortado ao invés de arrancado como acontece nos demais arranjos analisados.

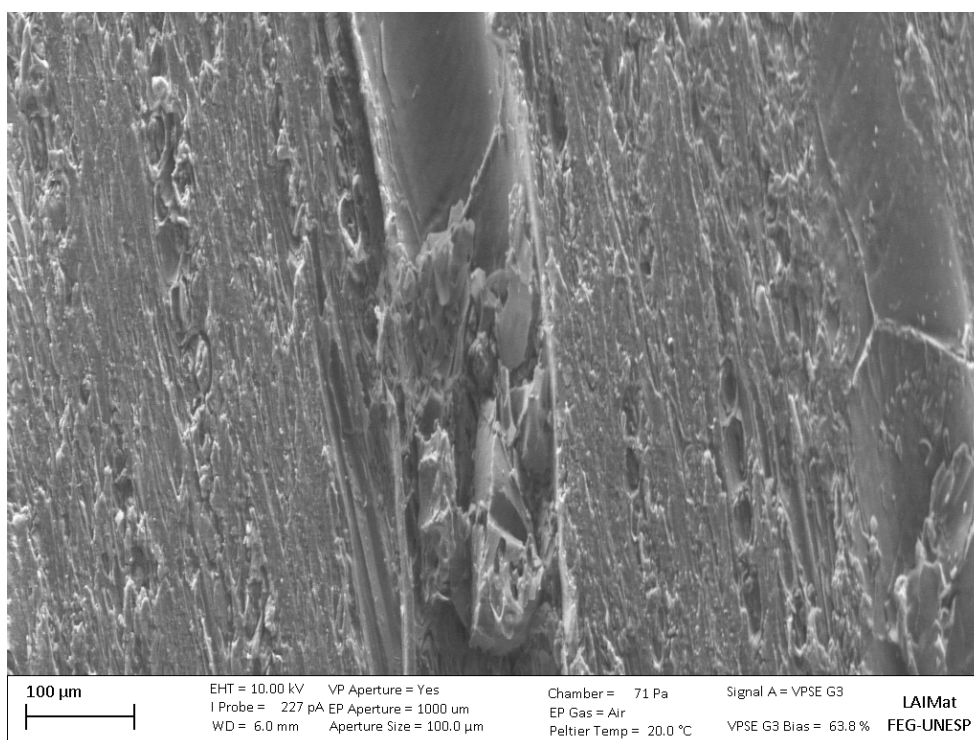
Observa-se na região indicada da Figura 75 que parte das fibras são cortadas ao invés de arrancadas como aparecem nas indicações das figuras correspondentes aos outros arranjos de temperatura de tratamento térmico e ferramenta para a espécie em estudo.

Figura 75 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 4-1-3 (termorretificação a 180°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro revestida).



Fonte: Autor.

Figura 76 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-1-3 (termorretificação a 200°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro revestida).



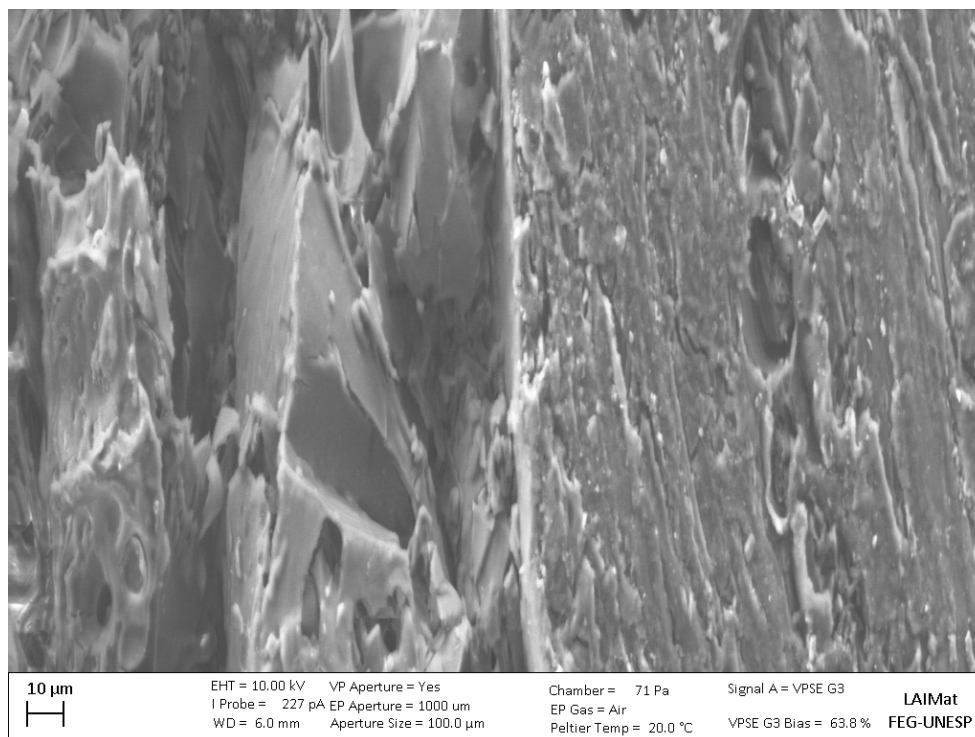
Fonte: Autor.

Segundo Boonstra et al. (2006) quanto maior a temperatura do tratamento térmico da madeira, cada vez mais a madeira apresenta-se friável. Fato que pode-se observar na Figura 76, o qual depois de usinada a superfície as fibras não apresentam sua tradicional forma, assim como os elementos de vaso, a degradação e consequente diminuição das hemiceluloses e celulose durante o tratamento térmico, causa a redução da resistência dessas fibras.

Batista (2012) verificou o mesmo efeito da friagem para temperaturas de tratamento térmico de *Eucalyptus grandis* acima de 160°C, durante a utilização da lâmina do microtomo para a preparação de amostras da madeira tratada termicamente para análise em microscópio eletrônico de varredura.

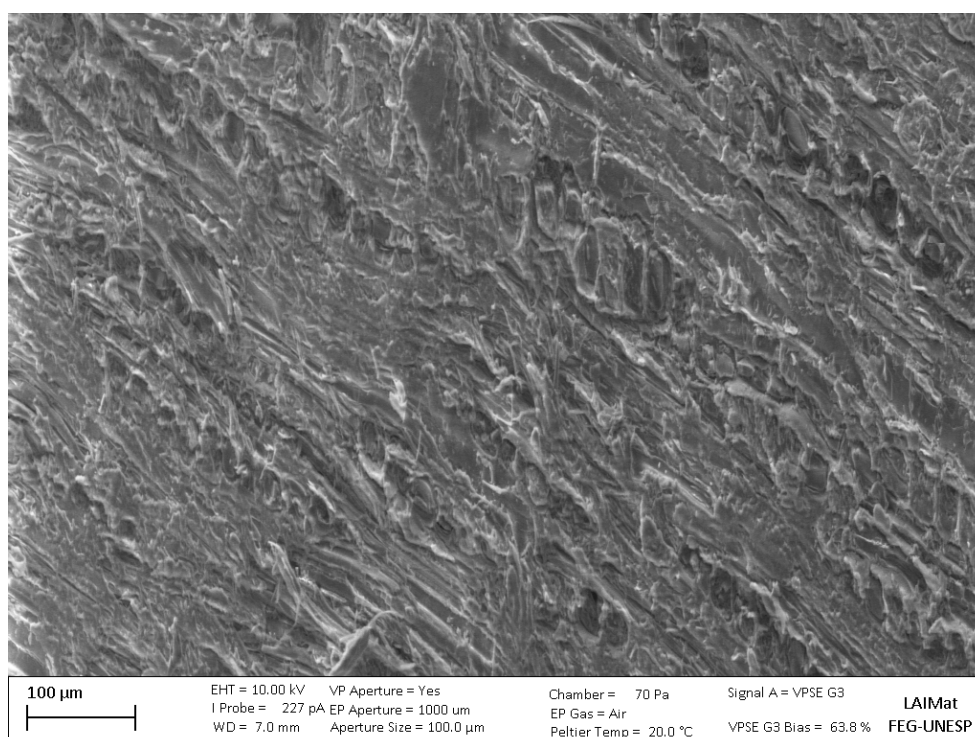
Embora as fibras sejam mais friáveis, as Figura 76 e Figura 77 mostram uma superfície mais irregular, pela presença de fibras arrancas ao invés de cortadas, e quando cortadas, percebe-se que foram dilaceradas proporcionando uma superfície mais felpuda.

Figura 77 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-1-3 (termorretificação a 200°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro revestida).



Fonte: Autor.

Figura 78 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-1-2 (termorretificação a 200°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro polida).

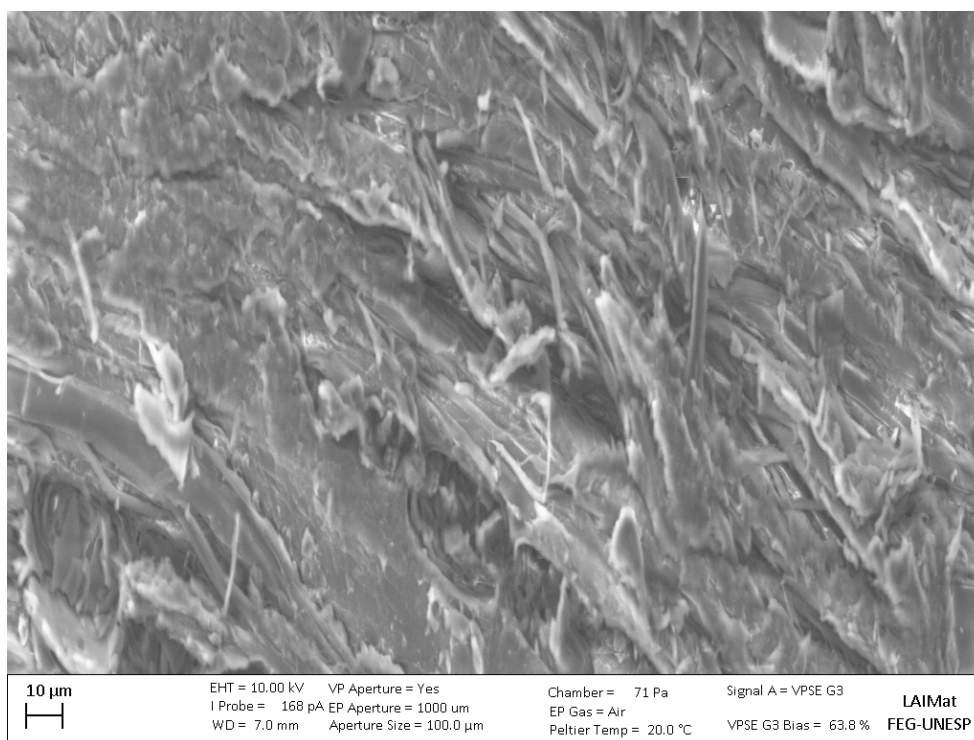


Fonte: Autor.

Comparando a Figura 77 que confere a superfície do arranjo 6-1-3 (termorretificação à 200°C, madeira de *Corymbia citriodora* e ferramenta de metal duro com revestimento) com a Figura 79 da superfície usinada do corpo de prova do arranjo 6-1-2 (termorretificação a 200°C, madeira de *Corymbia citriodora* e ferramenta de metal duro polido), verificamos que existe uma maior uniformidade na superfície 6-1-2 em relação à superfície do corpo de prova 6-1-3.

O que difere a usinagem de ambas é apenas o tipo de ferramenta utilizada, mas segundo a medição da rugosidade  $R_a$  e o teste ANOVA das médias da rugosidade com o uso de diferentes ferramentas, não está no nível de significância de 10% adotado por este estudo, embora a ferramenta de metal duro polida tenha apresentado um melhor desempenho em relação a ferramenta de metal duro com revestimento de  $TiB_2$ .

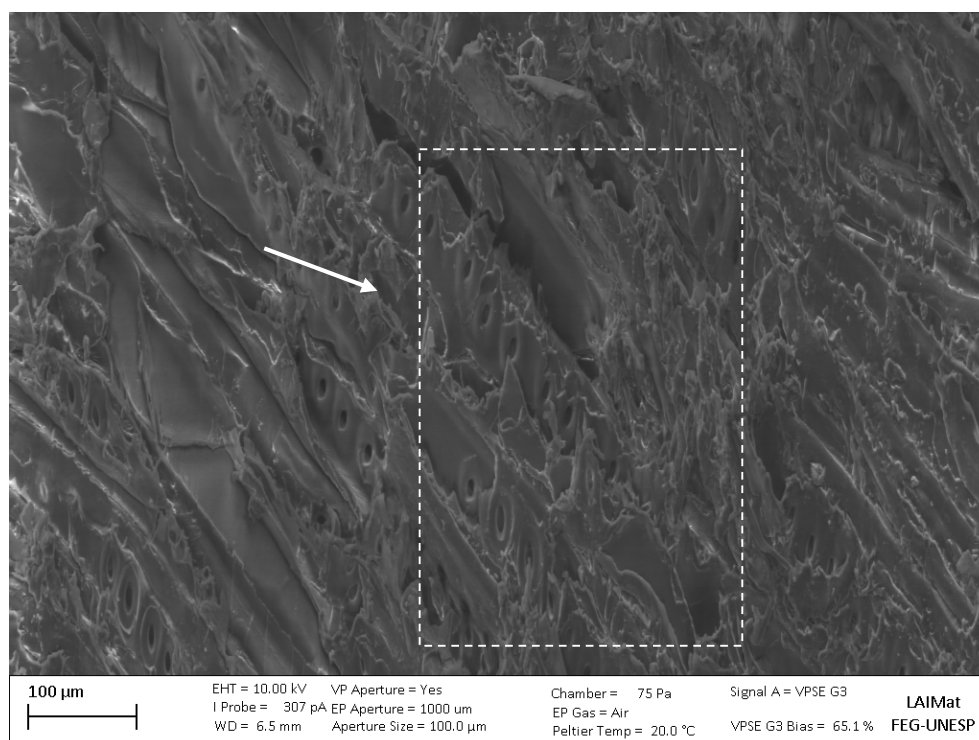
Figura 79 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-1-2 (termorretificação a 200°C, madeira de corymbia, ferramenta de metal duro polida).



Fonte: Autor.

Da Figura 80 à Figura 87 são exibidas as superfícies usinadas dos corpos de prova da madeira de *Pinus elliottii* com diferentes temperaturas de tratamentos térmicos e diferentes ferramentas, obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) para um aumento de 300x e 1000x.

Figura 80 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 1-2-2 (temperatura ambiente, madeira de pinus, ferramenta de metal duro polido).



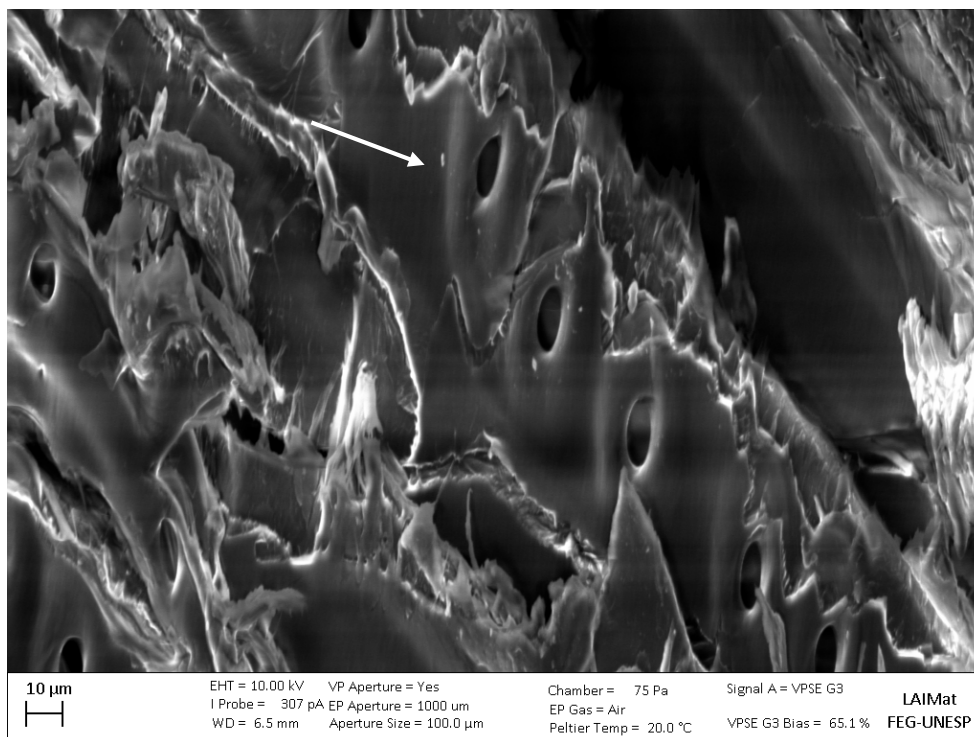
Fonte: Autor.

Na Figura 80 a superfície do corpo de prova com a combinação 1-2-2 (madeira sem tratamento térmico, madeira de pinus e ferramenta de metal duro polido) apresenta no detalhe indicado diversas fibras arrancadas ao invés de cortadas, contribuindo para a não uniformidade da superfície.

Observa-se pelas figuras seguintes que enquanto aumentada a temperatura de tratamento térmico, as fibras favorecem ao corte da ferramenta de torneamento desta forma tornando a superfície usinada mais uniforme.

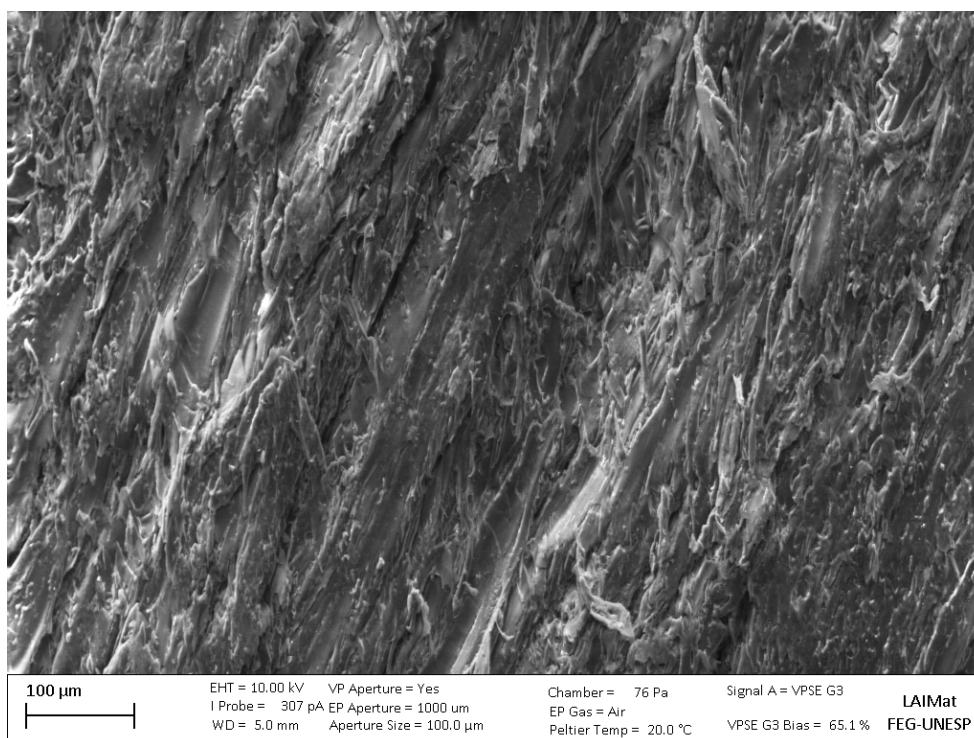
Verifica-se que as fibras são mais friáveis com o aumento da temperatura do tratamento térmico, principalmente a partir de 180°C como verificado por Batista (2012).

Figura 81 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 1-2-2 (temperatura ambiente, madeira de pinus, ferramenta de metal duro polido).



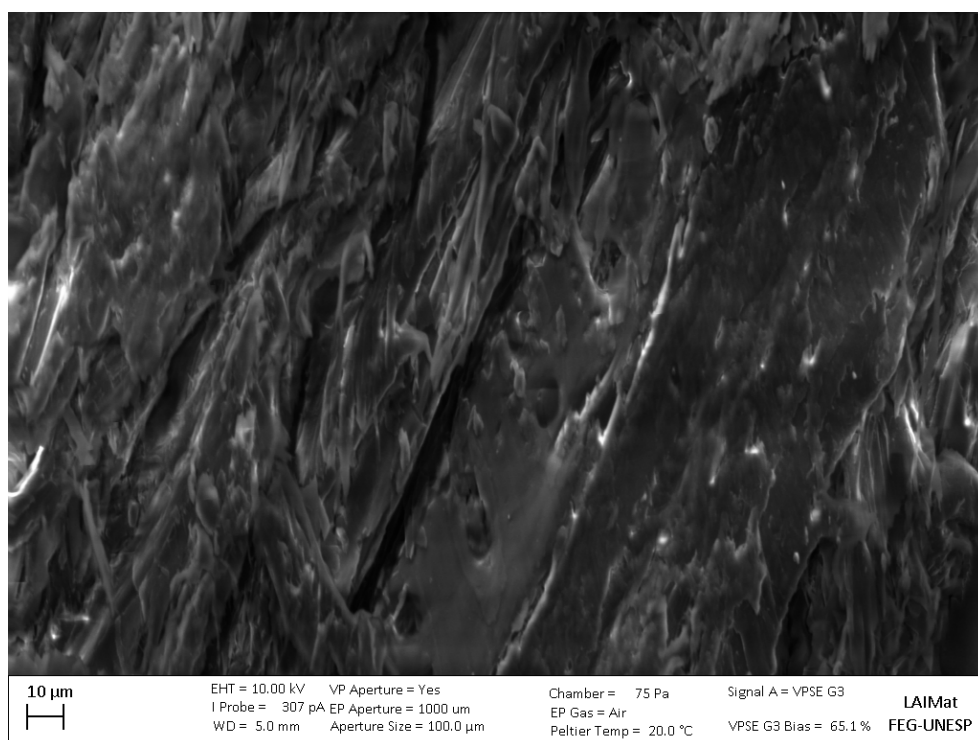
Fonte: Autor.

Figura 82 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 4-2-1 (termorretificação a 160°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).



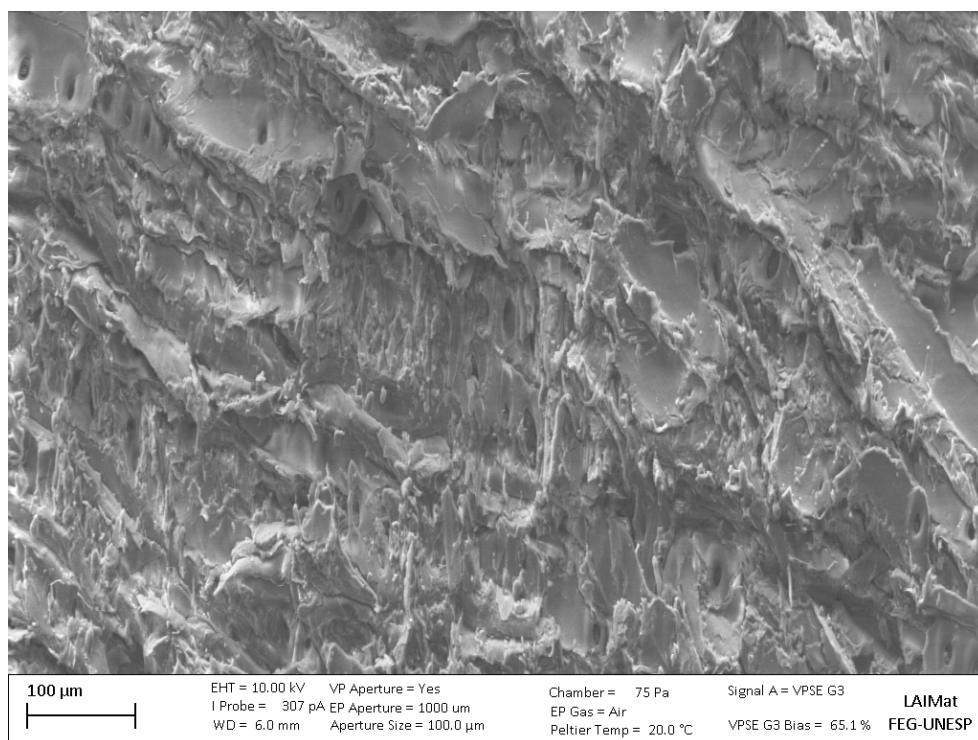
Fonte: Autor.

Figura 83 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 4-2-1 (termorretificação a 160°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).



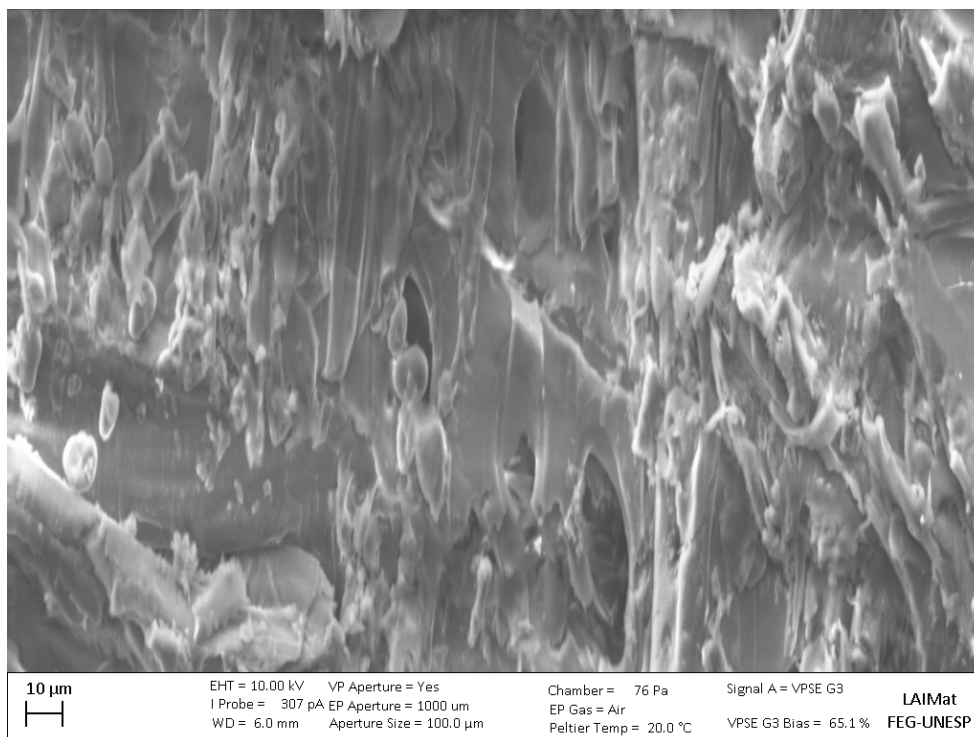
Fonte: Autor.

Figura 84 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 5-2-1 (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).



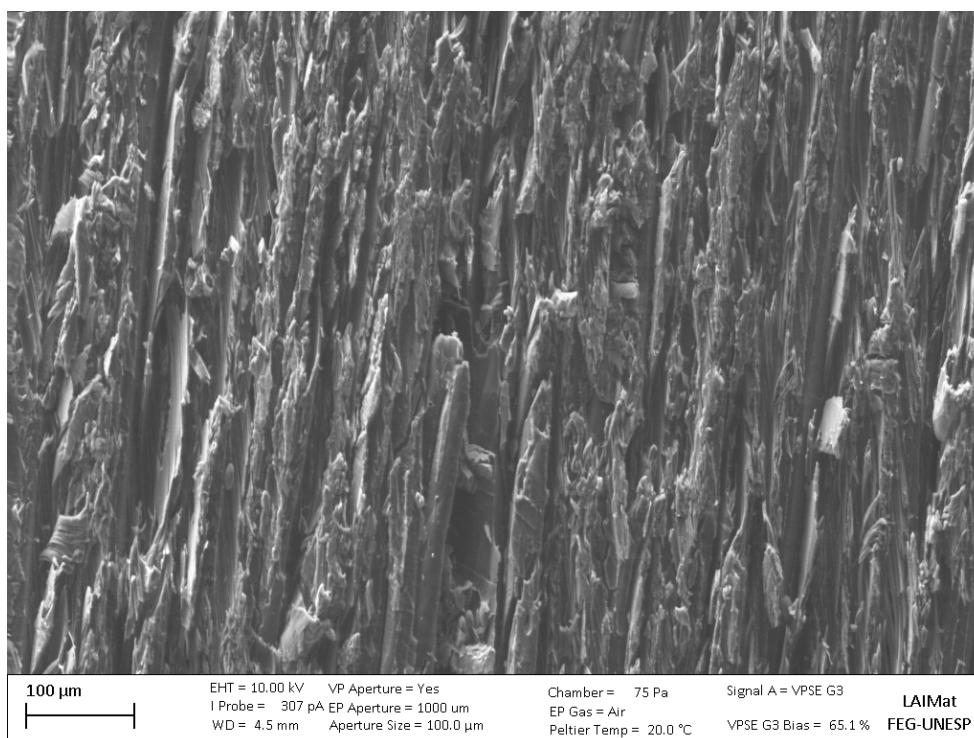
Fonte: Autor.

Figura 85 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 5-2-1 (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).



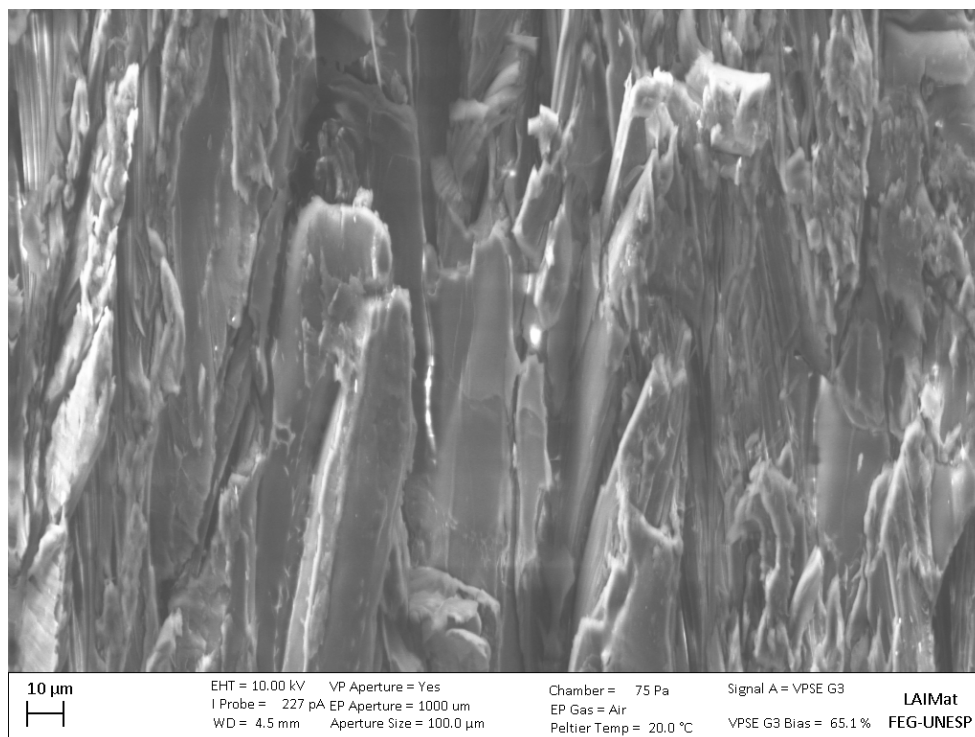
Fonte: Autor.

Figura 86 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-2-2 (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro polido).



Fonte: Autor.

Figura 87 - MEV da superfície usinada do corpo de prova 6-2-2 (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro polido).



Fonte: Autor.

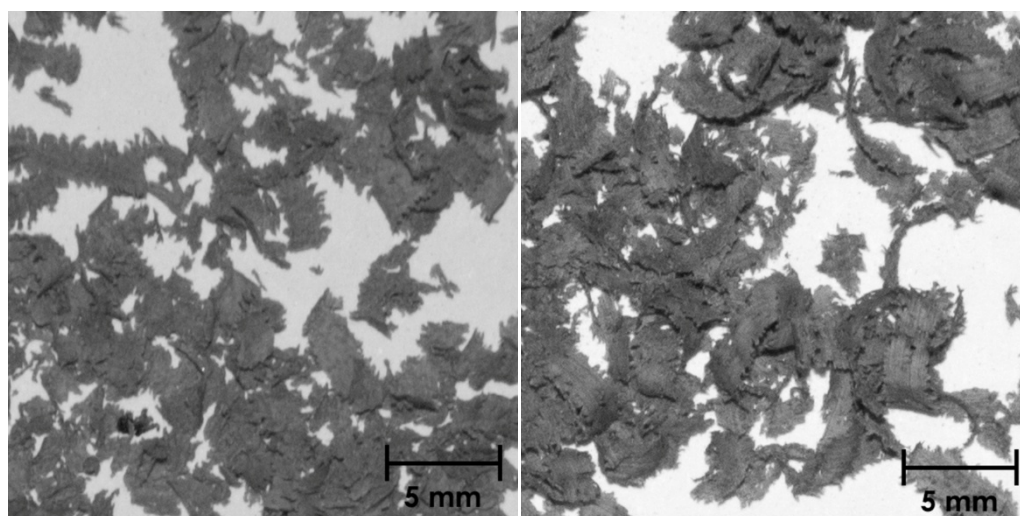
A Figura 84 e a Figura 85 apresentam a superfície com a menor rugosidade segundo as medições dentre os arranjos realizados nos ensaios de pinus, correspondente ao 5-2-1, sendo (termorretificação a 180°C, madeira de pinus, ferramenta de metal duro).

A madeira de pinus apresenta maior arrancamento de fibras em relação à madeira de corymbia, este fato se deve pela sua menor resistência (GONÇALVES, 2000) o arrancamento ao invés do corte das fibras, propicia a superfície uma grã mais felpuda em relação à superfície a qual as fibras são cortadas.

## 5.8 CAVACOS

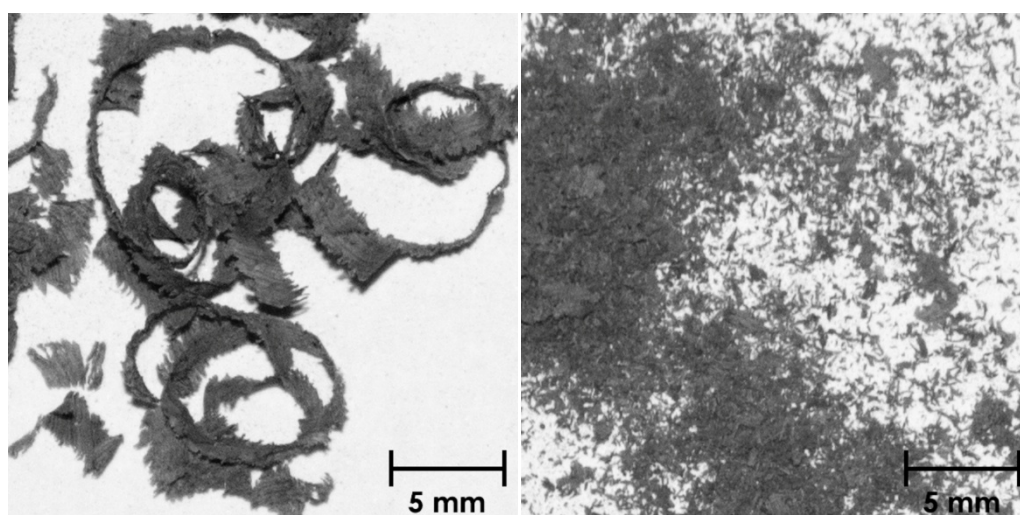
Na Figura 88 estão as imagens dos cavacos retirados a partir da usinagem em torno da madeira de *Corymbia citriodora* em diferentes arranjos de temperatura de tratamento térmico e ferramenta utilizada.

Figura 88 - Cavacos da usinagem do corpo de prova da madeira de *Corymbia citriodora*.



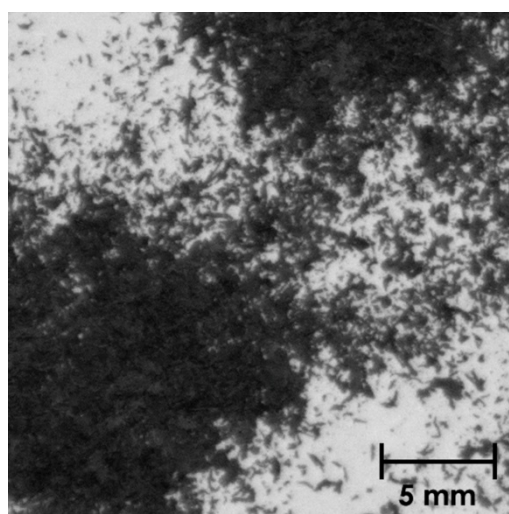
111

211



413

512



613

Fonte: Autor.

Observa-se que os cavacos vão tornando-se quebradiços conforme o aumento da temperatura do tratamento térmico.

Os cavacos mostrados na Figura 88, nos arranjos 111 (madeira sem tratamento térmico), 211 (madeira termorretificada a 100°C), 413 (madeira termorretificada a 160°C), apresentam um cavaco contínuo (mais comprido). Segundo Gonçalves (2000) este tipo de cavaco pode ser considerado como do Tipo II, pois a ferramenta impõe à madeira uma compressão paralela e provoca tensões de cisalhamento diagonais, prevalecendo a formação de um cavaco contínuo e aspirado. Este tipo de cavaco formado é o pretendido na usinagem da madeira, pois favorece a uma superfície com menor rugosidade e demanda menor consumo de energia no processo.

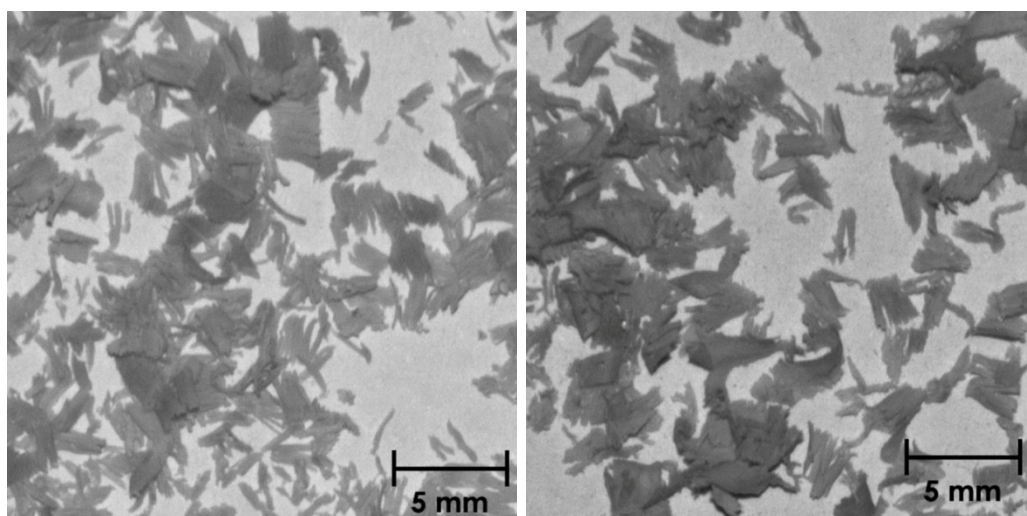
Na usinagem de madeira termicamente tratada a partir de da temperatura de 180°C, a fibra torna-se mais friável, como pode ser observado na Figura 88 arranjo 512 (tratamento térmico a 180°C) e arranjo 613 (madeira tratada termicamente a 200°C), fica evidente que o cavaco passou a ser mais quebradiço (friável), pois com as mesmas condições de usinagem apresentam-se com menores dimensões aos de temperaturas inferiores à 180°C de tratamento térmico.

Este fato se deve ao fenômeno da friabilidade, o qual a resistência das fibras é diminuída com o aumento da temperatura de termorretificação, tornando as fibras quebradiças. Loiola et al (2014) verificaram a diminuição da resistência da madeira tanto para as espécies de *Eucalyptus grandis*, quanto para *Pinus taeda*, quando tratados termicamente a temperatura de 160°C, comportamento este que se evidencia com o *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii*, por possuírem composição próxima, por serem anatomicamente e estruturalmente semelhantes.

Boonstra e Tjeerdsma (2006) verificaram que a hemicelulose é o primeiro polímero a se degradar com tratamento térmico com menores temperaturas, seguido da celulose, aumentando assim o teor de lignina na madeira (componente responsável pela rigidez do lenho), o que explica o fato do cavaco tornar-se quebradiço, provocando o fenômeno da friabilidade.

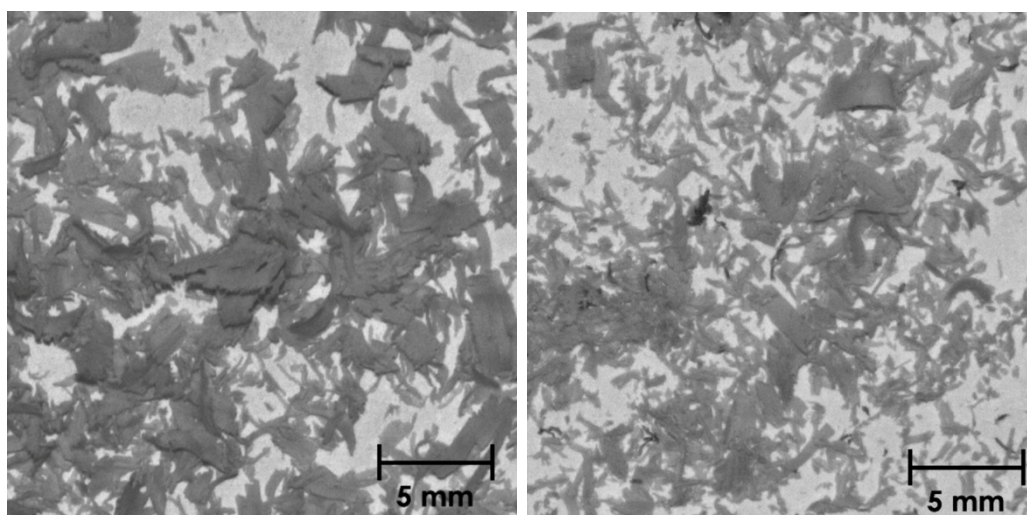
Na Figura 89 estão representadas as imagens dos cavacos obtidos através da usinagem em torno da madeira de *Pinus elliottii* com diferentes temperaturas de termorretificação e diferentes materiais de ferramenta de torneamento.

Figura 89 - Cavacos da usinagem do corpo de prova da madeira de *Pinus elliottii*.



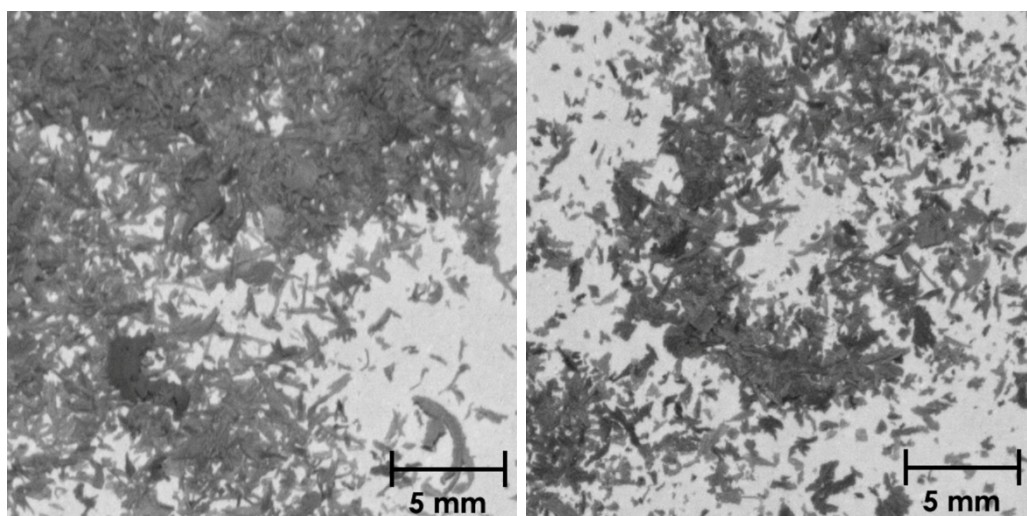
123

223



321

421



523

622

Fonte: Autor.

Os resultados equiparam-se com os obtidos com a madeira de *Corymbia citriodora*, pois verifica-se a formação de cavacos do tipo I (GONÇALVES, 2000) e o efeito da friabilidade a partir de temperaturas acima de 180°C de tratamento térmico, embora o tamanho dos cavacos encontrados para a madeira de *Pinus elliottii* para esta faixa de temperatura apresentem comprimentos maiores em relação a madeira de *Corymbia citriodora*, este fato deve-se pela característica da madeira de pinus possuir menor rigidez.

Para as madeiras de *Corymbia citriodora* e *Pinus taeda*, Silva (2012) encontrou o mesmo comportamento para ambas as madeiras com relação ao aumento do teor de lignina quando o aumento da temperatura de termorretificação, a resistência mecânica sofreu redução para ambas as espécies com o aumento da temperatura de termorretificação, para *Corymbia* observou-se um aumento da rigidez e um comportamento elasto-frágil, o qual pode-se justificar a diminuição do tamanho dos cavacos durante a usinagem com o aumento da temperatura de termorretificação. Para a madeira de *Pinus* a rigidez se manteve constante com o aumento da temperatura, o que evidencia a menor diferença encontrada das dimensões dos cavacos em relação à *Corymbia*.

Santos (2012) verificou o fenômeno da friabilidade em madeira de Eucalipto tratado a temperatura de 280°C, de forma que cavacos após a moagem se apresentaram com menores dimensões em relação a madeira não tratada termicamente.

Dzurenda, Orłowski e Grzeskiewics (2010) verificaram que na operação de serra-fita, a madeira termorretificada de Oak apresentou cavacos com menores dimensões em relação ao controle.

Aguilera e Muñoz (2011), encontraram uma relação das dimensões do cavaco do aplainamento das madeiras de *Acácia* e *Sequóia* com a potência e a rugosidade da superfície usinada, pois quanto menor o cavaco, menor a potência e menor a rugosidade. Assim como quanto menor a potência de corte, menor a rugosidade. Vega e Aguilera (2005) efeito análogo em fresamento (tupia) para *Pinus radiata*.

## 6 CONCLUSÕES

A densidade básica e aparente das madeiras de *Corymbia citriodora* e *Pinus elliottii* se apresentaram dentro do esperado quando comparado à literatura.

Na análise da potência efetiva de usinagem são significativos a espécie de madeira e a ferramenta empregada no torneamento.

A madeira de *Pinus elliottii* foi aquela que apresentou menor potência efetiva no torneamento devido à sua menor densidade.

A ferramenta de metal duro foi aquela que apresentou maior potência efetiva no processo, devido ao seu maior coeficiente de atrito ferramenta/superfície da peça.

A temperatura de tratamento térmico e a espécie da madeira foram os fatores que se apresentaram significativos na análise da rugosidade  $R_t$  da superfície usinada.

A rugosidade  $R_t$  se apresentou menor quando temperatura de termorretificação foi de 180°C e a espécie que apresentou menor rugosidade foi o *Pinus elliottii*.

Na análise rugosidade  $R_a$  da superfície usinada, a espécie da madeira foi quem se apresentou significativa, sendo a menor rugosidade encontrada na espécie de *Corymbia citriodora*.

Nenhum fator analisado se apresentou significativo na análise da temperatura na ponta da ferramenta de torneamento.

Na análise da temperatura de usinagem, os fatores temperatura de tratamento, espécie da madeira e ferramenta se apresentaram significativos.

A temperatura de usinagem aumentou com o aumento da temperatura de tratamento térmico.

A espécie que apresentou menor temperatura de usinagem foi *Corymbia citriodora*.

As ferramentas de metal duro polido e metal duro com revestimento de  $TiB_2$  apresentaram os melhores desempenhos proporcionando menores temperaturas de usinagem.

Os fatores analisados não demonstram ser significativos em relação à vibração do cabeçote de usinagem.

A análise qualitativa das micrografias das superfícies das madeira usinadas, demonstrou que existem a formação de defeitos de fibras arrancadas indesejadas tanto para a madeira de *Pinus elliottii* quanto para a madeira de *Corymbia citriodora*.

Na análise dos cavacos, verifica-se as dimensões diminuem com o aumento da temperatura do tratamento térmico, tornando a fibra mais friável.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILERA, A.; MUÑOZ, H. Rugosidad superficial y potencia de corte en el cepillado de Acácia melanoxyton y Sequóia sempervirens. **Maderas ciencia y tecnologia**. v. 13, n.1, p. 19-28, 2011.
- ANJOS, F. P. **Efeito da termorreificação nas propriedades físicas de três espécies madeiras da amazônia**. 2014. 66f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2014.
- ARAÚJO, S. O. **Propriedades de madeiras termorreificadas**. 2010. 93f. Tese (Doutorado em ciência florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287: **especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J. Influência do tempo e temperatura de retificação térmica na umidade de equilíbrio da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**. v. 38, n. 86, p. 225-261, jun. 2010.
- BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira em escala industrial pelo processo brasileiro Vap HolzSysteme®**. 2012. 339f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- BENJAMIN, C. A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Corymbia citriodora e Eucalyptus grandis**. 2006, 180f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Unesp, Campus de Botucatu, Botucatu, 2006.
- BERNARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments. **Robotics and computer integrated manufacturing**. v.18, pg 343-354, 2002.
- BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 1999. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. 2. ed., Florida. Krieger Publishing Company, 1982, 712p.
- BONDUELLE, G. M. Aplicação do planejamento de experimentos no controle de fabricação de chapas e fibras de madeira. **Cerne**, Lavras, v.6, n.2, p.001-010, 2000.
- BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz als Roh und Werkstoff**. V. 64, p. 204-2011, 2006.

BORREGA, M.; KÄRENLAMPI, P. P. Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. **Holz Roh Werkst**, Joensuu, v.66, n.1, p. 63-67, Out. 2007.

BRAGA, P. P. C. **Qualidade na usinagem e no acabamento da madeira *Coffea arabica***. 2011. 88f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

BRAGA, P. P. C.; SILVA, J. R. M.; NÉRI, A. C.; CALEGÁRIO, N.; LIMA, J. T. Qualidade da superfície da madeira de *Coffea arabica*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n.1, p. 21-28, mar. 2014.

BRITO, J. O. Densidade básica e retratibilidade de madeira de *Eucalyptus grandis* submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, v.12, n.2, p.182-188, jun. 2006.

BUDAKÇI, M.; İLÇE, A. C.; KORKUT, D. S.; GÜLERYEN, T. Evaluating the surface roughness of heat-treated wood cut with different circular saws. **Bioresources**. v. 8, n. 3, p. 4247-4258, 2011.

BUDAKÇI, M.; İLÇE, A.; GÜLERYEN, T.; UTAR, M. Determination of the surface roughness of Heat-treated wood materials plnd by cutters of a horizontal milling machine. **Bioresources**. v. 6, n. 4, p. 3189-3199, 2013.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154p.

CABRAL, S. C. **Sinterização de compósitos superabrasivos no sistema assistidos por altas pressões e altas temperaturas**, 2012. 120 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 2012.

CADEMARTORI, P. H. G., SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R.; STANGERLIN, D. M. Efeito da retificação térmica sobre as propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. XIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2012, Vitória. **ANAIS DO XIII EBRAMEM**, 2012.

CADEMARTORI, P. H. G. **Propriedades tecnológicas da madeira termorretificada de três espécies *Eucalyptus***. 2012. 132f. Tese (doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R.; STANGERLIN, D. M. Modification of static bending strength properties of *Eucalyptus grandis* Heat-treated wood. **Material Research**. v. 15, n.6, p. 992-927, 2012.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003. 152 p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 589p.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorretificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**.

2009. 149f. Tese (Doutorado em Ciências Agrônômicas) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2009.

CALONEGO, F. W.; SEVERO, E. T. D.; FURTADO, E. L. Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140°C, 160°C, 180°C, 200°C e 220°C. **Bioresource Technology**. n.101, p.9391-9394, 2010.

CAO, Y.; LU, J.; HUANG, Y.; ZHAO, Y., WU, Y. Evaluation of decay resistance for steam-heat-treated wood. **Bioresources**. v. 6, n. 4, p. 4696-4704, 2011.

CONFEDERATION OF FINNISH INDUSTRIES. **The nordic recipe for sucessfull innovation**. 1th ed. Helsinki: FTA, 2007. 80 p.

COSTES, J. P.; KO, P. L.; DECÈS-PETIT, C. ALTINTAS, Y. Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process. **Journal Of Wood Science**, London, v.50, n.1, p.28-34, 2004.

DEUS, P. R. **Análise do processo de fresamento de MDF em centro de usinagem CNC**. 2015. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2015.

DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G., MISSIO, A. L.; SCHNEID, E. Propriedades físicas da madeira termorretificada de quatro folhosas. **Floresta Ambient**. v.21, n.1, pg. 99-107, 2014.

DIAS JUNIOR, A. F.; SANTOS, P. V.; PACE, J. H. C.; CARVALHO, A. M.; LATORRACA, J. V. F. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais para uso em movelaria. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v.04, n.1, p.93-107, Mai. 2013.

DIAS JUNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M.; SANTOS, P. V.; SILVA, M., A. Usinagem da madeira de cinco espécies nativas brasileiras. **Reget**, Santa Maria, v. 18, n.3, p. 1200-1206, Dez. 2014.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272 p.

DZURENDA, L.; ORLOWSKI, K.; GRZERSKIEWICZ, M. Effect of thermal modification of Oak on sawdust granularity. **Drvna Industrija**. v. 61, n. 2, p. 89-94, 2010.

ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. São Paulo: Blücher, 2002. 293p.

ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I, J.; PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air. **Bioresources**, v. 3, n.1, p. 142-154, 2008.

ESTEVES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review. **Bioresources**, Raleigh, v. 4, n.1, p. 370-404, out. 2009.

ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I, J.; PEREIRA, H. M. Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR. **Maderas ciencia y tecnologia**, v. 15, n.2, p. 245-258, 2013.

EUFLOSINO, A. E. R. **Eficiência da termorreificação na resistência das madeiras de *Corymbia citriodora* e *Pinus taeda* a térmitas xilófagos**. 2012. 51f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) - Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, p. 796, 1977.

FABIYI, J. S.; OGUNLEYE, B. M. Mid-infrared spectroscopy and dynamic mechanical analysis of heat-treated obeche (*Triplochiton scleroxylon*) wood. **Maderas Ciencia y Tecnologia**. V. 17, n. 1, p. 5-16, 2015.

FERNANDES, J. A. **Ferramentas diamantadas para usinagem de madeira**. 2009. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) - Departamento de Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FERREIRA, J. J. **Ensaio de torneamento de diferentes espécies nativas brasileiras**. 2011. 30f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal rural do rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

FINISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® handbook**. 1th ed. Helsinki: FTA, 2003. 66 p.

GONÇALVES, M. T. T.; RUFFINO, R. T. Mecanismo de formação do cavaco na usinagem da madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 3., 1993, São Carlos. Anais... São Carlos: **EBRAMEN**, 1993. 1 CD-ROM.

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

GONTIJO, T. G. **Energia específica em cortes transversais em madeira roliça de *Eucalyptus* Sp.** 2012. 62f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) - Departamento de Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

GÜNDÜZ, G.; KORKUT, S.; KORKUT, D. S. The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine wood. **Bioresource Technology**. n.90, p.2275-2280, 2008.

GUNDUZ, G.; KORKUT, S.; AYDEMIR, D.; BEKAR, Í. The density, compression strength and surface hardness of heat treated hornbeam (*Carpinus betulus*) wood. **Maderas Ciencia y Tecnologia**, v. 11, n. 1, p. 61-70, 2009.

GOZELOTO, M.; GONÇALMES R. Dióxido de carbono em forma de névoa na refrigeração da ferramenta de corte, durante a usinagem da madeira. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p. 1426-1432, 2009.

HILL, C. A. S. Wood modification: an update. **Bioresources**. v. 6, n. 2, p. 918-919, 2011.

HUANG, X.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y.; PICHETTE, A. A spectrophotometric and chemical study on color modification on heat-treated wood during artificial weathering. **Applied Surface Science**. v. 258, p. 5360-5369, 2012.

HUANG, X.; KOCAEFE, D.; KOCAEFE, Y.; BOLUK, Y.; KRAUSE, C. Structural analysis of heat-treated birch (*Betula papyrifera*) surface during artificial weathering. **Applied Surface Science**. v. 264, p. 117-127, 2013.

KABOORANI, A. Thermal properties of composites made of heat-treated wood and polypropylene. **Journal of composite materials**. v. 43, n.22, p. 2599-2607, 2009.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A. J. Durability of heat-treated wood. **Holz als Roh**. v. 60, p. 1-6, 2002.

KASEMSIRI, P.; HIZIROGLU, S.; RIMDUSIT, S. Characterization of heat treated eastern redcedar (*Juniperus virginiana* L.). **Journal of materials processing technology**. v.21, n.2, p.1324-1330, 2012.

KESIK, H. S.; KORKUT, S.; HIZIROGLU, S.; SEVIK, H. An evaluation of properties of four heat treated wood species. *Industrial Crops and Products*, v.60, p.60-65, 2014.

KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and environment**. v.41, p.1074-1078, 2005.

KLOCK, U; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. Curitiba: Universidade Federal de Curitiba, 2005. 3 ed. 86p.

KOCAEFE, D.; PONCSAC, S.; DORÉ, G. YOUNSI, R. Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. **Holz als Roh und Werkstoff**. v.66, n.5, p.355-361, 2008.

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; TANG, J. BOUAZARA, M. Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: thermogravimetric study. **Journal of Material Science**. v.45, n.3, p.681-687, 2010.

KOCAEFE, D.; SAHA, S. Comparison of the protection effectiveness of acrylic polyurethane coatings containing bark extracts on the three heat-treated North American wood species: Surface degradation. **Applied Surface Science**. v. 258, p. 5283-5290, 2012.

KOCAEFE, D.; HUANG, X.; KOCAEFE, Y.; BOLUK, Y. Quantitative characterization of chemical degradation of heat-treated wood surfaces during artificial weathering using XPS. Surface and interface analysis. v. 45, p. 639-649, 2013.

KOCH, E. **Wood machining processes**. New York: Ronald, 1964. 530p.

KOL, H. S.; SEFIL, Y. The thermal conductivity of fir and beach wood heat-treated at 170, 180, 190, 200, and 212°C. **Journal of applied polymer science**. v. 112, p. 2473-2480. 2011.

KORKUT, S.; KORKUT, S.; BEKAR, I. BUDAKÇI, M.; DILIK, T.; ÇAKICIER, N. The effects of heat treatment on technological properties in Red-bud maple (*Acer trauvetteri* Medw.) wood. **Bioresource Technology**. n.99, p.1538-1543, 2008.

KORKUT, D. S.; KÖK, M. S.; KORKUT, S.; GÜRLEYEN, T. The effects of Heat Treatment on the physical and surface roughness of turkish hazel (*Corylus colurna* L) Wood. **International Journal of Molecular Sciences**. v. 9, p. 1772-1783, 2008.

KORKUT, S.; KARAYILMAZLAR, S.; HIZIROGLU, S. S.; SANLI, T. Some of the properties of heat-treated Sessile Oak (*Quercus petraea*). **Products Journal**. v.60, n.5, p.473–480, 2010.

KORKUT, S.; AYTIN, A. Evaluation of physical and mechanical prperties of wild cherry wood heat-treated using thermowood process. **Maderas ciencia y tecnologia**. v. 17, n. 1, p.171-178, 2015.

KUBOJIMA, Y.; OKANO, T.; OHTA, M. Bending strength and toughness of heat-treated wood. **Wood Science**. v. 46, p. 8-15, 2000.

LEKOUNOUGOU, S.; KOCAEFE, D.; OUMAROU, N. KOCAEFE, Y.; PONCSAK, S. Effect of thermal modification on mechanical properties of Canadian white birch (*Betula papyrifera*). **International wood products journal**. v. 2, n. 2, p. 101-107, 2011.

LOIOLA, P. L.; JUÍZO, C. G. F.; MARCHESAN, R.; SAKOWICZ, E.; ROCHA, R. P. The effect of the thermal modification temperature in the resistence to the parallel compression of fiber for eucalyptus grandis, pinus taeda nd tecnograndis wood. **Australian Journal of Basic And Applied Sciences**. v. 8, n. 18, p.512-520, 2014.

LOPES, J. P. **Uniformidade e estabilidade da cor da madeira termorretificada de Tectona grandis L. f.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

LOPES, J. O. Propriedades físicas da madeira de teca termorretificada. **Floresta e Ambiente**. Seropédica, v. 21, n.4, p. 569-577, dez. 2014.

LUCAS FILHO, F. C. **Análise da usinagem de madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis.** 2004. 176f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. C. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 297p.

MENEZES, W. M.; SANTINI, E. J.; SOUZA, J. T.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Thermal modification on the physical properties wood. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.44, n.6, p.1019-1024, jun.2014.

MILITZ, H. **Heat treatment technologies in Europe:** Scientific Background and technological state-of-art. In:Conference on enhancing the durability of lumber and Engineered Wood Products; 2002; Kissimmee, Orlando. Kissimmee: Forest Products Society; 2002.

MILITZ, H.; TJEERDSMA, B. **Heat treatment of wood by PLATO-process**. Wageningen: SHR Timber Research, 2001. 10 p. Disponível em: <<http://www.thermotreatedwood.com/Library/Technology/Netherlands.pdf>>. Acesso em: 3 dez. 2014.

MODES, K. S. **Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológicas das madeiras de Pinus teda e Eucalyptus grandis**. 2010. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Effect of thermal treatment on machining properties of Eucalyptus grandis and Pinus caribea var. hondurensis wood. PROCEEDINGS OF THE 51st INTERNATIONAL CONVENTION OF SOCIETY OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2008, Concepción. **Anais do congresso**. Wood Science and Technology, 2008. p. 1-9.

MOURA, L. F.; **Aspectos da usinagem e do acabamento de madeiras tratadas pelo processo de termorreificação**. Relatório parcial apresentado à Fapesp (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) referente ao primeiro ano da bolsa de pós-doutorado, Piracicaba. 86p. 2009.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O.; NOLASCO, A. N.; ULIANA, L. R. Effect of thermal rectification on machinability of Eucalyptus grandis and Pinus caribea var. hondurensis wood. **European journal wood production**. v. 69, p. 641-648, 2011.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Efeito da termorreificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de Eucalyptus grandis e Pinus caribea var. hondurensis. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 32, n.89, p. 069-076, mar. 2011.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Efeitos da termorreificação na perda de massa e propriedades mecânicas de Eucalyptus grandis e Pinus caribea var. hondurensis. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n.2, p. 305-314, mar. 2012.

NÉRI, A. C. **Medidas de forças de corte na madeira de eucalipto**. 1998. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1988.

NÉRI, A. C.; GONÇALVES, R.; HERNADEZ, R. E. Forças de corte ortogonal 90-0 em três espécies de madeira de Eucalipto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.2, p. 239-244, 1999.

NÉRI, A. C. **Parâmetros de corte na usinagem de madeiras de reflorestamento**. 2003. 157f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

OLIVEIRA, R. M. **Utilização de técnicas de caracterização em superfícies de madeiras tratadas termicamente**. 2009. 127 f. Tese (Doutorado em Física) Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 223p.

PALERMO, G. P. M. **Propriedades e comportamento tecnológico da madeira de Eucalyptus Grandis W. Hill Ex-Maiden visando a sua utilização em produtos de maior valor agregado**. 2010. 249f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Departamento de Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V.; MOURA, L. F.; NOLASCO, A. M.; CARVALHO, A. M.; GARCIA, A. M. Surface roughness of heat treated Eucalyptus grandis wood. **Maderas: Ciência e Tecnologia**. v. 16, n. 1, 0. 3-12, 2014.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M.; GARCIA, R. A. Avaliação da superfície da madeira de Eucalyptus grandis tratada termicamente. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 145-152, jan.-mar. 2015.

PALMA, H. A. L.; LEONELLO, E. C.; BALLARIN, A. W. Demarcação da madeira juvenil e adulta de Corymbia citriodora. **Cerne**, Lavras, v.16, suplemento, p.141-148, jul.2010.

PANG, J. S.; ANSARI, M. N. M.; ZAROOG, O. S.; ALI, M. H.; SAPUAN, S. M. Taguchi design optimization of machining parameters on the CNC end milling process of halloysite nanotube with aluminium reinforced epoxy matrix (HNT/Al/Ep) hybrid composite. **HBRC Journal**. v.10, vol.2, pg.138-144, ago. 2014.

PAULA, M. O; LOIOLA, P. L.; MOREIRA, G. R.; SEGUNDINHO, P. G. A. Análise da termomecânica da madeira de Corymbia citriodora submetida a gradientes térmicos. **Floresta e Ambiente**. v.21, n.3, p.358-368, jul-2014.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; L. F.; BRITO, J. O; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de Eucalyptus saligna e pinus caribaea var. hondurensis. **Cientia Florestalis**. n. 61, p. 122-132, 2002.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; MOURA, L. F.; BRITO, J. O. Efecct of thermal rectification on colors of Eucalyptus Salygna and Pinus Caribea. **Maderas**. v.14., n.2, p. 239-248, 2012.

PINHEIRO, C. **Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de Pinus elliottii**. 2014. 122f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.

POUBEL, D. S. **Efeito da termorretificação nas propriedades tecnológicas da madeira normal e de compressão de Pinus caribea Morelet**. 2011. 29f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

POUBEL, D. S.; GARCIA, R. G.; SANTOS, W. A.; OLIVEIRA, G. L.; ABREU, H. A. Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribea*. **Cerne**, Lavras, v. 19, n.3, p. 391-398, set. 2013.

PRIADI, T.; HIZIROGLU, S. Characterization of heat treated wood species. **Materials and Design**. v.49, n.1, p.575-582, 2013.

SALCA, E. A.; HIZIROGLU, S. Evaluation of hardness and surface quality of different wood species as function of heat treatment. **Materials and Design**. v.62, n.1, p.416-423, 2014.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2012.

SENAI. **Usinagem - tecnologia do corte**. 1. ed. São Paulo: SENAI, 1998. 96 p.

SHI, J. L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. **Holz Roh Werkst**. v. 65, p. 225-259, 2007.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. New York: Springer-Varlag, 1984. 245p.

SILVA, J. R. M.; MUNIZ, G. I. B.; LIMA, J. T.; BONDUELLE, A. F. Influência da morfologia das fibras na usinagem da madeira de *Eucalyptus grandis* hill ex Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.3, p.479-487, 2005.

SILVA, M. R. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto citriodora e Pinus taeda**. 2012. 223f. Tese (Doutorado em ciência e engenharia dos materiais) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, K. C. R. ; MOLINA, J. C. . Efeito da termorretificação nas propriedades de resistência e de rigidez da madeira de *Eucalipto citriodora*. **Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 13, p. 53-68, 2012.

SIQUEIRA, K. P.; MONTEFUSCO, A. R. G.; GUIMARÃES, A. B.; BONDUELLE, A. Principais metodologias de medição do estado de superfície. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Curitiba, v.5, n.2, p.203-210, 2003.

SOARES, S. R. S. **Sinterização TiB<sub>2</sub> em altas pressões**. 2003. 124 f. Tese (Pós-Graduação em Ciência dos Materiais) – UFRGS, Porto Alegre, 2003.

SORATTO, D. N. **Efeito das variáveis do tratamento térmico nas propriedades da madeira de Eucalyptus sp.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

SOUZA, A. M.; ETHUR, A. B. M.; LOPES, L. F. D.; ZANINI, R. R. **Introdução a projetos de experimentos**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2002. 119p.

TIBURCIO, U. F. O. **Medição e análise do acabamento superficial da madeira de Eucalipto na usinagem de torneamento cilíndrico e lixamento**. 2009. 102f. Tese (Doutorado em

Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

TIRYAKI, S.; AYDIN, A. An artificial neural network model for predicting compression strength of heat treated woods and comparison with a multiple regression model. **Construction and Building Materials**. v. 62, p.102-108, 2014.

TOMAK, E. D.; USTAOMER, D.; YILDIZ, S.; PESMAN, E. Changes in surface and mechanical properties of heat treated wood during natural weathering. **Measurement**. v. 53, p. 30-39, 2014.

UNSAL, O.; AYRILMIS, N. Variation in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. **Japan Wood Research Society**. V. 51, p. 405-409, 2005.

UNSAL, O.; CANDAN, Z.; KORKUT, S. Wettability and roughness characteristics of modified boards using a hot-press. **Industrial crops and products**. v. 34, p. 1455-1457, 2011.

VARANDA, L. D.; ALVES, M. C. S.; GONÇALVES, M. T.; SANTIAGO, L. F. F. Influência das variáveis de lixamento tubular na qualidade das peças de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, V.16, p.23-32, jul.2010.

VEGA, R. M.; AGUILERA, L. A. Caracterización de la rugosidad superficial y de la energía de corte durante el maquinado de *Pinus radiata*. **Bosque**. v. 26, n.1, p. 101-108, 2005.

VERNOIS, M. **Heat treatment of wood in France**. Paris: Centre Technique et de l'Ameublement, 2001. 6 p. Disponível em: <<http://www.thermotreatedwood.com/Library/Technology/France.pdf>>. Acesso em: 3 dez. 2014.

VITAL, B. R. Estabilidade dimensional e resistência à tração perpendicular de painéis fabricados com partículas termorretificadas oriundas de embalagens de *Pinus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.5, p.951-959, 2014.

XIE, Y. J.; LIU, Y. X.; SUN, Y. X. Heat-treated wood and its development in Europe. **Journal of forestry research**. V. 13, n. 3, p. 224-230, 2002.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Build Environment**. v.41, n.12, p.1762-1766, 2006.

ZANUNCIO, A. J.; FARIAS, E. S.; SILVEIRA, T. A. Termorretificação e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Floram**, Viçosa, v. 21, n.1, p. 85-90, jan. 2014.

ZHAO, G.; HUANG, C.; LIU, H.; ZOU, B.; ZHU, H.; WANG, J. Microstructure and mechanical properties of hot pressed TiB<sub>2</sub>-SiC composite ceramic tool materials at room and elevated temperatures. **Material Science and Engineering**. v. 606. p. 108-116, 2014.

WILKOWSKI, J.; MAREK, G. PAWEL, C.; IRENEUSZ, S.; LUBOMIR, J.; DUSAN, P. Influence of thermal modification of oak wood on cutting forces during milling. **Forestry and Wood Technology**, n.76, p.203-207, 2011.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. C. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* S. T. Black no município de Santa Maria RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.2, p. 177-183, 2003.