

**UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**LUIS FRANCISCO DE SOUZA**

**SECAGEM DE TÁBUAS DE *Pinus taeda*: EFEITO DA TEMPERATURA,  
VELOCIDADE DO AR E SENTIDO DE CORTE DA MADEIRA SOBRE A  
VELOCIDADE DE SECAGEM E DEFEITOS GERADOS NO MATERIAL SECO**

**JOINVILLE - SC**

**2018**

**LUIS FRANCISCO DE SOUZA**

**SECAGEM DE TÁBUAS DE *Pinus taeda*: EFEITO DA TEMPERATURA,  
VELOCIDADE DO AR E SENTIDO DE CORTE DA MADEIRA SOBRE A  
VELOCIDADE DE SECAGEM E DEFEITOS GERADOS NO MATERIAL SECO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia de Processos da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE como requisito final para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Ozair Souza.  
Coorientador: Prof. Dra. Elisabeth Wisbeck.

**JOINVILLE – SC**

**2018**

## CATALOGAÇÃO

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

S729s	<p>Souza, Luis Francisco de Secagem de tábuas de Pinus taeda: efeito da temperatura, velocidade do ar e sentido de corte da madeira sobre a velocidade de secagem e defeitos gerados no material seco/ Luis Francisco de Souza ; orientador Dr. Ozair Souza ; coorientador Dra. Elisabeth Wisbeck. – Joinville: UNIVILLE, 2018.</p> <p>128 p.: il. ; 30 cm</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)</p> <p>1. Madeira serrada - Secagem. 2. Madeira serrada - Defeitos. 3. Indústria de móveis. I. Souza, Ozair (orient.). II. Wisbeck, Elisabeth (coorient.). III. Título.</p> <p>CDD 645.4</p>
-------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

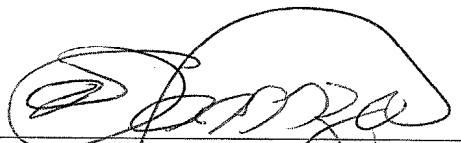
## Termo de Aprovação

### “Secagem de Tábuas de Pinus Taeda: Efeito da Temperatura, Velocidade do Ar e Sentido de Corte da Madeira sobre a Velocidade de Secagem e Defeitos gerados no Material Seco”

por

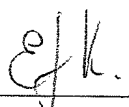
Luis Francisco de Souza

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.




---

Prof. Dr. Ozair Souza  
Orientador (UNIVILLE)



---

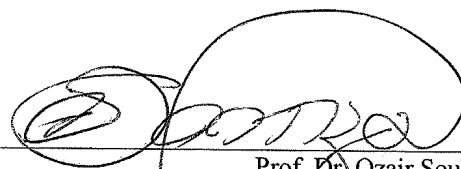
Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck  
Coorientadora (UNIVILLE)



---


Prof. Dr. Ozair Souza  
Coordenador do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

#### Banca Examinadora:



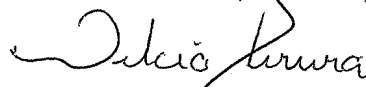
---

Prof. Dr. Ozair Souza  
Orientador (UNIVILLE)



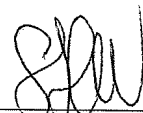
---

Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck  
Coorientadora (UNIVILLE)



---

Prof. Dr. Délcio Pereira  
(UDESC)



---

Profa. Dra. Sandra Helena Westrupp Medeiros  
(UNIVILLE)

Joinville, 20 de abril de 2018.

*“N3o desista nas primeiras tentativas, a persist4ncia 4 amiga da conquista.”*  
*Bill Gates*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força na caminhada durante todo período de estudo e elaboração desta dissertação de Mestrado.

Aos meus pais Tereza e Francisco, pela dedicação e educação que recebi durante toda minha vida.

A minha esposa Beatriz e a meu filho Guilherme, que me deram suporte e entenderam minha ausência durante as aulas e períodos de estudo em muitos feriados e finais de semana.

A meu orientador e coorientadora, Dr. Ozair Souza e Dra. Elisabeth Wisbeck, pela confiança, orientação e apoio depositado.

Ao amigo Sandro Keine, que proporcionou a realização do estágio de docência junto a sua disciplina na UDESC CEPLAN – campus São Bento do Sul, bem como pela colaboração e repasse de conhecimento para realização dos experimentos.

Ao amigo Agnaldo Arnold que juntamente com o amigo Sandro Keine abriram as portas do laboratório de ensaios da UDESC CEPLAN – campus São Bento do Sul, tornando possível utilizar a estrutura desta Universidade para realização dos experimentos.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou-me cursar e concluir tão importante degrau em minha carreira acadêmica.

Aos colegas da turma X do MEP, pelo espírito de companheirismo e ajuda mútua que tivemos durante a realização das aulas e trabalhos extraclasse.

## RESUMO

A utilização da madeira de *Pinus taeda* para fabricação de móveis destinados à exportação ocupa posição de destaque no polo moveleiro de São Bento do Sul, SC. Em virtude da necessidade de alto investimento para implantação de uma estrutura para a secagem convencional da madeira, muitas das empresas da região têm optado por adquirir a madeira pronta para uso, seca, com teor de umidade definido para recebimento. Por outro lado, muitas empresas que fornecem a madeira seca ao cliente têm encontrado dificuldades para entregar o produto dentro do teor de umidade desejado e com índices de defeitos de secagem, tais como rachaduras e empenamentos, nos níveis de aceitação para móveis destinados à exportação. Visando contribuir com o estudo da secagem desse tipo de madeira, buscou-se quantificar o efeito das variáveis operacionais temperatura ( $T = 40, 60$  e  $80^{\circ}\text{C}$ ), velocidade forçada do ar ( $u_{\infty} = 0, 0,6$  e  $1,2$  m/s) e sentido de corte da madeira (tangencial e radial) sobre a velocidade de secagem e defeitos mais comuns encontrados na madeira seca (rachaduras, tensões residuais e empenamentos). Para experimentação, foi empregado uma estufa de secagem com adaptação de um sistema de ventilação e controlador de velocidade forçada do ar no interior da câmara de secagem. Foram realizados nove experimentos em escala laboratorial, cada qual com nove corpos de prova de espessura 27 mm e comprimento 400 mm de madeira cortada no sentido tangencial e nove com corte radial, totalizando 18 diferentes ensaios. A partir de amostragens periódicas, foram construídas as curvas de secagem e determinadas as velocidades instantâneas e máximas de secagem para cada um dos ensaios. No final da secagem (teor de umidade  $\leq 10\%$ ), a qualidade da madeira foi avaliada e quantificado o número de defeitos apresentados. Apenas  $T$  e  $u_{\infty}$  apresentaram efeitos significativos ( $p < 0,05$ ) sobre a velocidade de secagem. Os maiores valores médios da taxa máxima de secagem ( $v_{m\acute{a}x} = 15$  U%/h) e fluxo de secagem ( $V_{m\acute{a}x} = 0,051$  g/cm<sup>2</sup>.h) foram obtidas com  $T = 80^{\circ}\text{C}$  e  $u_{\infty} = 1,2$  m/s, independentemente do tipo de corte da madeira. Para menores valores de  $T$  e  $u_{\infty}$  ( $40^{\circ}\text{C}$  e  $0$  m/s), os respectivos valores de velocidade foram da ordem de 15 vezes menores. Essa maior velocidade de secagem ocasionou maior ocorrência de defeitos na madeira seca com o corte tangencial, em comparação ao corte radial, principalmente, no defeito de rachaduras superficiais. No corte radial, a rachadura da madeira foi encontrada em apenas um dos 81 corpos de provas secos enquanto que, no corte tangencial, apenas alguns dos corpos de prova secos a  $40^{\circ}\text{C}$  não apresentaram este tipo de defeito. Apenas no empenamento do tipo torcimento, os corpos de prova de corte radial apresentaram maior incidência do que o corte tangencial. De uma maneira geral, ficou evidente que a madeira de *Pinus taeda* de corte radial é menos suscetível a defeitos provocados pela secagem do que o mesmo tipo de madeira cortado tangencialmente.

**Palavras-chave:** Madeiras para móveis, rachaduras em madeiras, secagem de madeira, secagem de *Pinus*, secagem de tábuas

## ABSTRACT

The use of *Pinus taeda* wood for the manufacture of furniture for export occupies a prominent position in the furniture pole of São Bento do Sul, SC. Due to the need for high investment in the implementation of a structure for the conventional drying of wood, many companies in the region have opted to purchase dried wood with a moisture content defined for receipt. On the other hand, many companies that provide dry wood to the customer have found problems to deliver the product within the desired moisture content and with indices of drying defects, such as cracks and warping in the acceptance levels for furniture destined for export. In order to contribute with the study of the drying of this type of wood, it was worked to quantify the effect of the temperature variables ( $T = 40, 60$  and  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), forced air velocity ( $u^{\infty} = 0, 0,6$  and  $1, 2\text{ m / s}$ ) and wood cutting direction (tangential and radial) on the speed of drying and most common defects found in dry wood (cracks, residual stresses and warping). A drying oven with adaptation of a ventilation system and forced air speed controller was used for experimentation. Nine experiments were performed in laboratory scale, each one with nine samples of 27 mm of thickness, 400 mm of length in the tangential wood cutting (flatsawn lumber) and nine with radial wood cutting (quarter sawn lumber), totaling 18 different experiments. From the periodic samplings the drying curves were constructed and the instantaneous and maximum drying rates were determined for each of the experiments. At the end of drying (moisture content  $\leq 10\%$ ), the quality of the wood was evaluated and the number of defects presented was quantified. Only  $T$  and  $u^{\infty}$  presented significant effects ( $p < 0,05$ ) on the drying rate. The highest mean values of the maximum drying rate ( $v_{\max} = 15\text{ U\% / h}$ ) and drying flow ( $V_{\max} = 0,051\text{ g / cm}^2\text{ h}$ ) were obtained with  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $u^{\infty} = 1,2\text{ m / s}$ , independently of the cutting type of the wood. For smaller values of  $T$  and  $u^{\infty}$  ( $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $0\text{ m / s}$ ) the respective velocity values were of the order of 15 times smaller. This higher drying speed caused a greater occurrence of defects in the dried wood with the tangential cut, in comparison to the radial cut, mainly in the defect of superficial cracks. In radial cutting, wood crack was found in only one of the 81 dried samples, while in the tangential cutting only a few of the dry samples at  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  did not show this type of defect. Only in the warping classified like twisted, the radial samples presented higher incidence than the tangential samples. In general, it has become apparent that radial cut *Pinus* wood is less susceptible to defects caused by drying than the same type of wood cut in the tangential direction.

**Key-words:** Furniture woods, Wood drying, Wood drying, Cracks in wood, Drying boards



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Vista superior de tábuas de <i>Pinus</i> sp. cortadas nos sentidos tangencial (a) e radial (b) aos anéis de crescimento da madeira.....	26
<b>Figura 2</b> – Anéis de crescimento em um tronco de uma folhosa.....	29
<b>Figura 3</b> - Representação tridimensional dos sentidos de corte radial e tangencial da madeira <i>Pinus</i> sp.....	30
<b>Figura 4</b> - Medidores elétricos de umidade da madeira: (A) Medidor de agulha (medidor do tipo resistência), (B) Medidor de contato (medidor do tipo capacitivo ou perda de potência). ....	31
<b>Figura 5</b> - Efeito das variações de umidade nas propriedades da madeira.....	34
<b>Figura 6</b> - Influência da velocidade do ar com umidade relativa de 65% sobre a taxa de secagem de madeira dura contendo diferentes teores de umidade.....	35
<b>Figura 7</b> - Fases da taxa de secagem durante um processo típico de secagem de sólidos porosos. ....	37
<b>Figura 8</b> - Desenho esquemático de um secador convencional.....	39
<b>Figura 9</b> - Ilustração da aparência da madeira com colapso.....	42
<b>Figura 10</b> - Tipos de empenamentos que ocorrem na madeira e suas respectivas denominações.....	44
<b>Figura 11</b> – Fluxograma do processo de obtenção de corpos de prova e amostras. ....	46
<b>Figura 12</b> - Produção de tábuas para obtenção dos corpos de prova e amostras: (a) Toras recebidas na serraria; (b) Obtenção de tábuas 2500x70x27 mm em serra fita; (c) Estoque de tábuas serradas para seleção; (d) Novo corte das tábuas selecionadas para envio à UDESC visando a confecção das amostras e corpos de prova .....	47
<b>Figura 13</b> - Planos de corte das tábuas: (a) Corte tangencial; (b) Corte radial.....	48
<b>Figura 14</b> - (a) Serra de bancada utilizada para o corte final dos corpos de prova (peças de maior comprimento) e (b) amostras para determinação do teor de umidade inicial (peças de menor comprimento), ambas devidamente identificadas.....	48
<b>Figura 15</b> - Esquema de corte da madeira para obtenção dos corpos de prova para secagem (1), amostras para determinação do teor de umidade inicial da madeira (1a e 1b) e descartes (extremidades de comprimento 300 mm). ....	49
<b>Figura 16</b> - Secador laboratorial utilizado nos experimentos de secagem da madeira <i>Pinus taeda</i> : (a) parte interna da estufa com resistência elétrica original (câmara de	

secagem); (b) ventiladores instalados sobre a resistência elétrica para obtenção da circulação forçada de ar; (c) chave liga/desliga dos ventiladores e variador de potência e respectiva caixa de comando (d), ambos instalados para o controle da velocidade de circulação do ar na câmara de secagem.....	49
<b>Figura 17</b> - Pontos no interior da estufa em que a velocidade de circulação do ar foi medida. ....	51
<b>Figura 18</b> - Interior da estufa mostrando o anemômetro digital empregado no ajuste da velocidade do ar de secagem e a disposição dos dezoito corpos de prova intercalados por um corte tangencial e outro radial.....	51
<b>Figura 19</b> - Identificação do local e do comprimento da amostra do corpo de prova para confecção da peça a ser utilizada na classificação da tensão interna. ....	57
<b>Figura 20</b> - Tipo de corte realizado no tarugo de madeira para confecção da peça (B) a ser utilizada na classificação da tensão interna. A seção A do tarugo é descarte. ....	57
<b>Figura 21</b> - Classificação das tensões de secagem em função da inclinação das laterais da amostra em forma de U. ....	57
<b>Figura 22</b> - Valores médios dos tempos final de secagem de <i>Pinus taeda</i> para o corte da madeira tangencial e radial, a 40, 60 e 80 °C com 0,0, 0,6 e 1,2 m/s de circulação de ar. As barras indicam a média $\pm$ desvio padrão. Letras iguais significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com 95% de confiança.....	61
<b>Figura 23</b> - Curvas médias da cinética de secagem da madeira <i>Pinus taeda</i> (U% x h) empregando o corte da madeira (A) tangencial e (B) radial nas temperaturas (T) de 40, 60 e 80 °C com velocidade de circulação de ar ( $u_{\infty}$ ) de 0,0 (sem ventilação), 0,6 e 1,2 m/s. ....	62
<b>Figura 24</b> - Valores médios da velocidade instantânea de secagem da madeira <i>Pinus taeda</i> empregando o corte da madeira tangencial e radial, durante o período de secagem com variação do teor de umidade de $U_0\%$ (madeira verde) até $U\% = 30\%$ . ....	64
<b>Figura 25</b> - Valores médios da velocidade instantânea de secagem da madeira <i>Pinus taeda</i> empregando o corte da madeira tangencial e radial, durante o período de secagem com variação do teor de umidade de $U_0\%$ (madeira verde) até $U\% = 10\%$ . ....	64
<b>Figura 26</b> - Valores médios da velocidade instantânea de secagem ( $v$ ) da madeira <i>Pinus taeda</i> empregando o corte da madeira tangencial e radial, durante o período de secagem com variação do teor de umidade de $U\% 30$ a $10\%$ .....	65

- Figura 27** - (a) Efeito da temperatura ( $T$ : 40 e 60 °C) e da velocidade do ar ( $u_{\infty}$ : 0,0 e 0,6 m/s) sobre a taxa ou velocidade máxima de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ) de *Pinus taeda* e (b) efeito das três variáveis conjuntamente. Na equação apresentada, a variável  $v$  representa a velocidade do ar  $u_{\infty}$ . .....69
- Figura 28** - (a) Efeito da temperatura ( $T$ : 60 e 80 °C) e da velocidade do ar ( $u_{\infty}$ : 0,6 e 1,2 m/s) sobre a taxa ou velocidade máxima de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ) de *Pinus taeda* e (b) efeito das três variáveis conjuntamente. Na equação apresentada, a variável  $v$  representa a velocidade do ar  $u_{\infty}$ . .....71
- Figura 29** - Valores médios das velocidades máximas de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ : U%/h) de *Pinus taeda* para o corte da madeira tangencial e radial, a 40, 60 e 80 °C com 0,0, 0,6 e 1,2 m/s de circulação de ar. As barras indicam a média  $\pm$  desvio padrão. Letras iguais significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com 95% de confiança. ....74
- Figura 30** - Incidência de rachaduras de face na secagem de madeira de *Pinus taeda* a 40°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de: (a) 0 (sem circulação forçada de ar), (b) 0,6 m/s e (c) 1,2 m/s. O número 9 representa o número de corpos de prova utilizado em cada ensaio .....75
- Figura 31** - Incidência de rachaduras de face na secagem de madeira de *Pinus taeda* a 60°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de: (a)  $u_{\infty} = 0$  (sem circulação forçada de ar), (b)  $u_{\infty} = 0,6$  m/s e (c)  $u_{\infty} = 1,2$  m/s. O número 9 representa o número de corpos de prova utilizado em cada ensaio. ....75
- Figura 32** - Incidência de rachaduras de face na secagem de madeira de *Pinus taeda* a 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de: (a)  $u_{\infty} = 0$  (sem circulação forçada de ar), (b)  $u_{\infty} = 0,6$  m/s e (c)  $u_{\infty} = 1,2$  m/s. O número 9 representa o número de corpos de prova utilizado em cada ensaio. ....76
- Figura 33** - Rachaduras de face (mm) na secagem de madeira *Pinus taeda* a 40, 60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s. As barras indicam a média  $\pm$  desvio padrão. Letras iguais, entre cada tipo de corte, significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com 95% de confiança. ....77
- Figura 34** - Empenamentos (mm) na secagem de madeira *Pinus taeda* secados a 40, 60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade forçada do ar de 0 (sem circulação de ar), 0,6 e 1,2 m/s. As barras indicam a média  $\pm$  desvio

padrão. Letras iguais, entre cada tipo de corte, significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com 95% de confiança .....80

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Identificação dos ensaios de secagem de <i>Pinus taeda</i> com corte tangencial (Tang) e radial (Rad) para realização dos experimentos de secagem com diferentes temperaturas e velocidade do ar na câmara de secagem.....	50
<b>Tabela 2</b> - Planejamento fatorial dos experimentos para a secagem de <i>Pinus taeda</i> . Os índices (-) e (+) indicam o nível de cada variável como inferior e superior, respectivamente. ....	54
<b>Tabela 3</b> - Planejamento fatorial dos experimentos para a secagem de <i>Pinus taeda</i> . Os índices (-) e (+) indicam o nível de cada variável como inferior e superior, respectivamente. ....	55
<b>Tabela 4</b> - Valores médios de área superficial de secagem (A), massa seca (MS), massa úmida inicial (MV0) e teor de umidade inicial (U0%) dos corpos de provas de <i>Pinus taeda</i> com corte tangencial (T) e radial (R) submetidos aos ensaios de secagem com diferentes temperaturas (40, 60 e 80 °C) e diferentes velocidades de ar forçado (0, 0,6, 1,2 m/s). ....	59
<b>Tabela 5</b> - Valores médios do tempo final de secagem ( $t_f$ ) e teor de umidade final $U_f\%$ obtidos nos ensaios de secagem da madeira <i>Pinus taeda</i> . ....	60
<b>Tabela 6</b> - Valores médios de velocidades máximas de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ e $V_{m\acute{a}x}$ ) dos corpos de provas de <i>Pinus taeda</i> com corte tangencial (Tang) e radial (Rad) secados em diferentes temperaturas ( $T$ ) e velocidades de ar forçado ( $u_\infty$ ). ....	67
<b>Tabela 7</b> - Efeitos principais e suas interações sobre a velocidade máxima de secagem obtidos no planejamento fatorial $2^3$ variando-se a temperatura de secagem (40 e 60 °C), velocidade forçada de ar (0,0 e 0,6 m/s) e tipo de corte da madeira (tangencial e radial) <i>Pinus taeda</i> . ....	68
<b>Tabela 8</b> - Planejamento fatorial $2^3$ variando-se a temperatura de secagem (60 e 80 °C), a velocidade do ar (0,6 e 1,2 m/s) e o tipo de corte da madeira (tangencial - T e radial - R) e os efeitos principais e suas interações sobre a velocidade máxima de secagem.....	70
<b>Tabela 9</b> – Valores de $v_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e valores de $v_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo modelo do planejamento experimental (1) com temperatura de secagem de 40 e 60 °C, velocidade do ar de 0,0 e 0,6 m/s e do planejamento experimental (2) com temperatura de secagem de 60 e 80 °C, a velocidade do ar de 0,6 e 1,2 m/s.....	73

<b>Tabela 10</b> - Percentual de corpos de prova com rachaduras superficiais pela secagem de madeira <i>Pinus taeda</i> a 40,60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial (Tang) e radial (Rad) com velocidade do ar ( $v$ ) de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s.....	77
<b>Tabela 11</b> - Percentual de corpos de prova com empenamentos do tipo arqueamento, encurvamento, encanoamento e torcimento pela secagem de madeira <i>Pinus taeda</i> a 40,60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial (Tang.) e radial (Rad.) com velocidade do ar ( $v$ ) de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s. ....	79
<b>Tabela 12</b> - Classificação dos corpos de prova em termos da tensão interna quando secos a 40,60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s .....	82
<b>Tabela 13</b> - Classificação da incidência de defeitos .....	92

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Frequência dos defeitos de secagem em função do número de corpos de prova secos que apresentaram defeitos. ....	55
<b>Quadro 2</b> - Tipo de empenamento e identificação da sua magnitude em função no número de corpos de prova que apresentaram o defeito.....	56
<b>Quadro 3</b> - Comprimento das rachaduras de face (R) em relação ao comprimento do corpo de prova e classificação do defeito. ....	56

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas.
DEPEC	Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos do Banco Bradesco.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
Mm <sup>3</sup>	Milhões de Metros Cúbicos.
MS	Massa da madeira na condição seca (seca)
MV	Massa verde ou massa da madeira na condição úmida (kg)
PS	Potencial de secagem
PSF	Ponto de saturação das fibras
R	Rachadura
Rad	Corte radial da madeira
SINDIMA	Sindicato do Comércio Atacadista de Madeiras do Estado de São Paulo.
Tang	Corte tangencial da madeira
Tbs	Temperatura de bulbo seco
Tbu	Temperatura de bulbo úmido
U <sub>E</sub>	Teor de umidade de equilíbrio
UR	Umidade relativa



## LISTA DE SIMBOLOS

T	Temperatura de secagem (°C)
t	Tempo de secagem (h)
$u_{\infty}$	Velocidade do ar de secagem (m/s)
U%	Teor de umidade (%)
$v$	Velocidade instantânea de secagem (g/cm <sup>2</sup> .h)
$v_{\max}$	Velocidade máxima de secagem (g/cm <sup>2</sup> .h)
$\rho$	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
$\Delta U$	Varição do teor de umidade.
$\Delta t$	Varição do tempo de secagem.
$p < 0,05$	Margem de erro de 5% (Probabilidade de significância)

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	<b>23</b>
1.1. Objetivo Geral.....	23
1.2. Objetivos Específicos.....	23
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>24</b>
2.1. Cultivo e comercialização de madeiras.....	24
2.1.1. Importância da secagem de madeiras.....	26
2.2. Aspectos físicos relacionados a secagem .....	27
2.2.1. Tipos de água existente na madeira.....	27
2.2.1.1. Movimento de água capilar.....	27
2.2.1.2. Movimento de água de impregnação ou higroscópica – difusão .....	28
2.3. Fatores que influenciam no processo de secagem.....	29
2.3.1. Fatores inerentes à madeira.....	29
2.3.1.1. Estrutura anatômica.....	29
2.3.1.2. Teor de umidade.....	31
2.3.1.3. Massa Específica ou Densidade .....	32
2.3.1.4. Espessura da madeira.....	32
2.3.2. Fatores inerentes ao ambiente de secagem .....	32
2.3.2.1. Temperatura .....	32
2.3.2.2. Umidade relativa do ar.....	34
2.3.2.3. Umidade de equilíbrio da madeira.....	34
2.3.2.4. Velocidade do ar.....	35
2.4. O processo de secagem .....	36
2.4.1. Fase de taxa constante. ....	38
2.4.2. Primeira fase da taxa da secagem decrescente.....	38
2.4.3. Segunda fase da taxa da secagem decrescente.....	38
2.5. Secagem convencional de madeiras .....	39
2.6. Defeitos causados pela secagem .....	41

2.6.1. Colapso .....	41
2.6.2. Rachaduras .....	42
2.6.3. Encruamento .....	44
2.6.4. Empenamentos .....	44
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>45</b>
3.1. Obtenção dos corpos de prova .....	45
3.2. Ensaio de secagem.....	49
3.3. Análise do teor de umidade e cálculo dos parâmetros cinéticos de secagem ..	52
3.3.1. Determinação do teor de umidade inicial .....	52
3.3.2. Determinação das velocidades de secagem .....	52
3.3.3. Estimativa dos efeitos das variáveis de processos sobre o comportamento da cinética de secagem.....	54
3.4 Avaliação da qualidade da secagem .....	55
3.4.1. Empenamento .....	56
3.4.2. Rachaduras .....	56
3.4.3. Tensões residuais .....	56
3.5 Análise estatística .....	57
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>59</b>
4.1 Teor de umidade inicial dos corpos de prova submetidos à secagem.....	59
4.2 Cinética de secagem da madeira de <i>Pinus taeda</i> .....	60
4.2.1. Velocidades de secagem .....	63
4.3 Influência da temperatura de secagem, velocidade forçada de ar e do tipo de corte da madeira sobre a taxa máxima de secagem.....	67
4.4 Defeitos de secagem .....	74
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE D .....</b>	<b>119</b>

<b>APÊNDICE E .....</b>	<b>124</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>125</b>

## INTRODUÇÃO

Dentre os diversos materiais usados pelo homem, a madeira destaca-se pela variabilidade natural tanto em suas propriedades físicas e mecânicas como, também, pelas características estéticas, permitindo sua utilização em variada gama de aplicações e ambientes (JANKOWSKI; SANTOS; ANDRADE, 2003).

De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013), tomando como base o ano de 2012, a madeira de *Pinus* sp ocupou a segunda posição em área plantada no País (1,56 milhões de ha), sendo que a maior concentração está localizada nos estados do Paraná (619.731 ha), Santa Catarina (539.377 ha) e Rio Grande do Sul (164.832 ha). Ela é utilizada, principalmente, como matéria-prima nas indústrias de papel e celulose, na fabricação de diversos tipos de lâminas e chapas, na construção civil e na confecção de embalagens, móveis e marcenaria em geral.

Conforme a ABRAF (2013), no período de 2002 a 2012, a produção de madeira serrada aumentou de 8,3 Mm<sup>3</sup> anuais, para 9,2 Mm<sup>3</sup> e o consumo evoluiu de 6,4 para 8,3 Mm<sup>3</sup>. Os principais segmentos consumidores do mercado brasileiro foram as indústrias de móveis e da construção civil.

Exceto para o caso das indústrias de papel e celulose, onde a madeira é utilizada úmida, a madeira é, normalmente, submetida ao processo de secagem após ser serrada. Segundo Santos (2002), a adequada secagem da madeira serrada, antes da sua transformação em bens e produtos, é reconhecidamente a fase mais importante de todo o processamento que visa agregar valor ao produto final.

Embora as primeiras notícias acerca da introdução de estufas para secagem de madeira no Brasil datam de 1953 (TOMASELLI, 1974), não é raro encontrar madeiras sendo comercializadas no mercado com problemas de qualidade, muitos deles gerados por um processo de secagem mal conduzido ou por deficiências técnicas envolvendo as condições dos equipamentos utilizados no processo.

Visando contribuir com o estudo da melhoria da qualidade da madeira *Pinus taeda* destinada à indústria de móveis, o presente trabalho buscou avaliar a influência das condições operacionais de secagem (temperatura e velocidade do ar de secagem) e do tipo de corte da madeira (tangencial e radial) sobre os defeitos mais comuns encontrados em tábuas durante a sua secagem. Não foram encontradas na

literatura especializada, publicações científicas que tratam, especificamente, da secagem dessa espécie de madeira.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência do tipo de corte da madeira *Pinus taeda* spp. e das condições operacionais de secagem convencional (temperatura e velocidade do ar) sobre a velocidade do processo e surgimento de defeitos na madeira seca (rachadura superficial, empenamentos e tensão interna).

### 1.2. Objetivos Específicos

- Obter a cinética de secagem convencional da madeira *Pinus taeda* spp. cortada nos sentidos tangencial e radial, nas temperaturas  $T$  de 40, 60 e 80°C e nas velocidades do ar  $u_{\infty}$  de 0, 0,6 e 1,2 m/s, determinando os respectivos valores de velocidade máxima de secagem.
- Quantificar o efeito das variáveis  $T$ ,  $u_{\infty}$  e sentido de corte sobre a velocidade máxima de secagem e avaliar o modelo matemático obtido a partir da análise de superfície de resposta de dois projetos fatoriais  $3^2$  propostos.
- Identificar, em cada um dos experimentos de secagem convencional, realizados a  $T$  e  $u_{\infty}$  no qual surgiram as maiores quantidades de defeitos visando indicar as condições operacionais mais adequadas para cada tipo de corte de madeira avaliada.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Cultivo e comercialização de madeiras

De acordo com dados publicados pelo Sindicato do comércio atacadista de madeiras do estado de São Paulo, a produção mundial de madeira em tora nativa e plantada em 2010 foi da ordem de 1,1 bilhão de m<sup>3</sup>, gerando uma receita anual de US\$ 95 bilhões de dólares. Apenas Indonésia, Brasil, Índia e Malásia detém  $\frac{3}{4}$  da produção do volume mundial produzido (SINDIMA, 2013).

Conforme o Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos do Banco Bradesco (DEPEC, 2017), com base em dados de 2015, cerca de 84,5% dos móveis comercializados no Brasil utilizam madeiras como matéria-prima. A indústria brasileira de móveis é composta por 18,7 mil empresas, empregando 328,6 mil empregados. A região Sul e Sudeste do Brasil concentra 80% das empresas, 83% dos empregados e 73% do faturamento da indústria de móveis no país. Ainda neste cenário, a região sul brasileira é líder na exportação de móveis, sendo Santa Catarina o estado de maior exportação (33,9%), seguido de Rio Grande do Sul (31,1%) e Paraná (14,1%).

Dentre as madeiras mais utilizadas para a fabricação de móveis em Santa Catarina, destacam-se as do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*. Santos et.al. (2014) realizaram estudo junto a estabelecimentos responsáveis pelo comércio de madeira serrada na microrregião geográfica de Florianópolis e verificaram que dentre os 108 empreendimentos visitados 62% trabalha conjuntamente com madeiras de espécies tropicais e exóticas, cerca de 12% trabalham somente com madeiras tropicais, enquanto 26% afirmaram utilizar apenas madeiras de espécies exóticas. Dentre os 95 empreendimentos que comercializam espécies exóticas, 94 utilizam pinus e 73 deles comercializam também eucalipto. Os autores constataram um aumento gradativo do consumo das madeiras exóticas na microrregião em detrimento ao consumo de madeiras tropicais como, por exemplo, o angelim (*Hymenolobium* sp.), encontrada em 93% dos estabelecimentos.

No Brasil, espécies de *Pinus* vêm sendo cultivadas há mais de um século para diversos fins. Os primeiros plantios com espécies subtropicais iniciaram por volta de 1936. Com o programa de incentivo fiscal ao "reflorestamento" em meados dos anos 1960, iniciaram-se os plantios comerciais sob regime de silvicultura intensiva nas regiões Sul e Sudeste (REMADE, 2013).



O clima brasileiro, com suas condições favoráveis de insolação e umidade, fez com que a taxa de crescimento anual dessas árvores fosse multiplicada por dez, ou mais, em comparação às árvores americanas. A madeira brasileira é anatomicamente semelhante à americana, embora os anéis do lenho inicial sejam muito mais largos (GONZAGA, 2006).

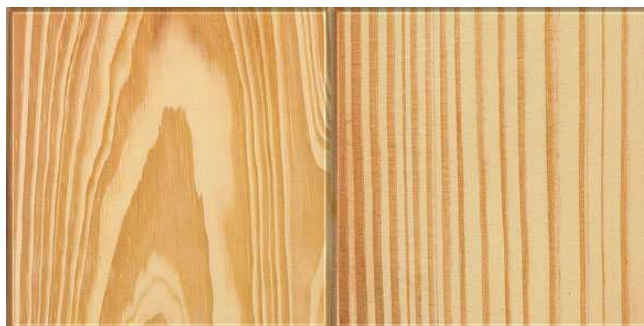
Atualmente no Brasil a silvicultura da madeira de *Pinus* sp. é praticada, principalmente, nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul. A produção de madeira de pinus spp tornou-se viável em boa parte do Brasil, constituindo uma importante fonte de madeira para usos gerais, englobando a fabricação de celulose e papel, lâminas e chapas de diversos tipos, madeira serrada para fins estruturais, confecção de embalagens, móveis e marcenaria em geral. As árvores alcançam de 25 a 30 m de altura (ABRAF, 2013).

As espécies mais usadas para fabricação de móveis são o *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda*, oriundas dos Estados Unidos (REMADE, 2013).

No Brasil, o *Pinus elliottii* é mais plantado nas regiões sul e sudeste. Porém, em menor escala do que o *P. taeda*, devido que sua madeira não é usada pelas indústrias de celulose e papel, e sim na produção de madeira para processamento mecânico e na extração de resina. A variedade *P. elliottii* cresce mais do que *P. taeda* em regiões de baixa altitude, como na planície costeira de toda a região Sul, com bom desenvolvimento, mesmo em solos com lençol freático próximo à superfície. A produção de madeira adulta tem início mais cedo, a partir dos sete a oito anos de idade, ao contrário do *P. taeda*, que começa com 12 a 15 anos. Esta característica apresenta uma vantagem importante para a produção de madeira, destinada ao processamento mecânico (REMADE, 2013).

A madeira de *Pinus* sp. Que é ilustrada na Figura 1, é considerada leve, possui cerne e alburno indistintos e é de cor natural bege-clara uniforme, levemente amarelada. Apresenta textura fina, grã-direita, superfície lisa ao tato e brilho pouco realçado com cheiro e gosto imperceptíveis. (GONZAGA, 2006).

Figura 1 - Vista superior de tábuas de *Pinus* sp. cortadas nos sentidos tangencial (a) e radial (b) aos anéis de crescimento da madeira.



(a)

(b)

Fonte: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT ,2017.

### 2.1.1. Importância da secagem de madeiras

Conforme Jankowski (1990), a transformação da madeira bruta em produtos requer a sua secagem prévia pelas seguintes razões:

- a) redução da movimentação dimensional e como consequência, as peças de madeira podem ser produzidas com maior precisão de dimensões, proporcionando melhor desempenho durante o uso,
- b) aumento da resistência da madeira após a secagem contra fungos manchadores e apodrecedores, e contra a maioria de insetos,
- c) melhora as propriedades mecânicas da madeira, tais como a resistência à flexão, compressão e dureza,
- d) a resistência das uniões ou juntas feitas com pregos e parafusos é maior na madeira seca,
- e) a madeira úmida não é adequada para processos de colagem,
- f) a maioria das deformações, empenamentos e rachaduras ocorrem durante a secagem, assim, produtos feitos com madeira seca estarão imunes a esses defeitos,
- g) a madeira somente pode receber pintura, verniz ou outros acabamentos se, pelo menos, for seca ao ar livre,
- h) a secagem aumenta a resistência elétrica da madeira, tornando-a isolante e melhorando suas propriedades de isolamento térmico e
- i) facilita as operações de beneficiamento secundário de usinagem, como torneamento, furação e colagem.

## 2.2. Aspectos físicos relacionados a secagem

### 2.2.1. Tipos de água existente na madeira

São dois os tipos de água na madeira: água livre ou capilar, localizada nos lúmens celulares e espaços intercelulares e água de impregnação que se encontra nos espaços submicroscópicos da parede celular. Durante a secagem, a primeira água retirada é a água livre que se encontra retida por forças capilares. Em seguida, ocorre a remoção da água de impregnação, a qual é a que normalmente interfere na maioria das propriedades físicas e mecânicas da madeira (MELLADO, 2007; KEINE, 1997).

Os movimentos dessas águas na madeira, durante um processo de secagem, podem ser divididos, respectivamente, em duas partes principais: movimento da água líquida acima do ponto de saturação das fibras (PSF) e movimento da água impregnada ou vapor d'água abaixo do ponto de saturação das fibras (TIME, 1998).

O PSF ocorre quando as paredes celulares estão saturadas com água higroscópica e não há água livre na forma líquida nos lumens celulares. Pode-se considerar que este ponto é alcançado quando há equilíbrio entre a madeira e o ar com 99% de umidade relativa (ELEOTÉRIO, 2009; WOOD HANDBOOK, 2010).

Segundo Siau (1984), para a remoção de águas contidas em madeiras por secagem, várias forças agem ao mesmo tempo para forçar a movimentação da umidade, destacando-se os fenômenos físicos da capilaridade e da difusão.

#### 2.2.1.1. Movimento de água capilar

A distinção entre materiais porosos e materiais capilares porosos está baseada na presença do tamanho dos poros. Os materiais porosos são aqueles que têm um diâmetro de poro maior ou igual a  $0,1 \mu\text{m}$  e os materiais capilares porosos tem um diâmetro menor que  $0,1 \mu\text{m}$ . A madeira pertence ao grupo capilar poroso, o qual é higroscópico. (TORRES, 2009).

A água movimenta-se na madeira no sentido longitudinal, tangencial e radial. Para Stamm (1964), o fluxo de água capilar no sentido das fibras é pelo menos 50 vezes maior do que o movimento perpendicular às mesmas. Nas coníferas, como é o

caso do gênero *Pinus*, isto deve-se em parte a presença de canais resiníferos que possuem diâmetros maiores que os demais elementos.

A água de capilaridade está presente na forma líquida dentro da cavidade celular ou dos espaços da madeira. A porosidade define a quantidade de água capilar que pode ser retida na madeira. A água capilar não causa retração ou inchamento da madeira ou alteração em outras propriedades físicas. Existindo água capilar, as paredes celulares estão saturadas com a água higroscópica ou de impregnação (SIAU, 1984).

#### 2.2.1.2. Movimento de água de impregnação ou higroscópica – difusão

Água impregnada refere-se à água, em uma célula de madeira quando o teor de umidade é menor que cerca de 30%. É a água quimicamente ligada à parede celular da madeira. Para remover este tipo de água para que o teor de umidade diminua abaixo de 30%, uma quantidade crescente de energia se faz necessária (DENIG; WENGERT; SIMPSON, 2000).

Difusão de água impregnada move a umidade de áreas de alta concentração do difundente para áreas de baixa concentração. Difusão na direção longitudinal é de cerca de 10 a 15 vezes mais rápida do que a difusão radial ou tangencial; e a difusão radial é um pouco mais rápida do que a difusão tangencial (WOOD HANDBOOK, 2010).

A forma mais comum de descrever quantitativamente os aspectos do movimento de umidade na madeira é assumindo que a taxa de troca de umidade é governada pelo processo de difusão (difusão molecular). A difusão na madeira é governada por dois mecanismos: difusão de vapor através dos lumens e difusão de água ligada às paredes das células (TIME, 1998).

À medida que a madeira perde água (dessorção) ela se retrai, porém, o ganho de água (adsorção) caracteriza o inchamento. Praticamente, toda a movimentação dimensional ocorre entre o PSF e 0% de umidade, ou seja; as variações dimensionais correspondem à dessorção ou adsorção da água higroscópica localizada nas paredes das fibras (JANKOWSKY; GALINA, 2013).

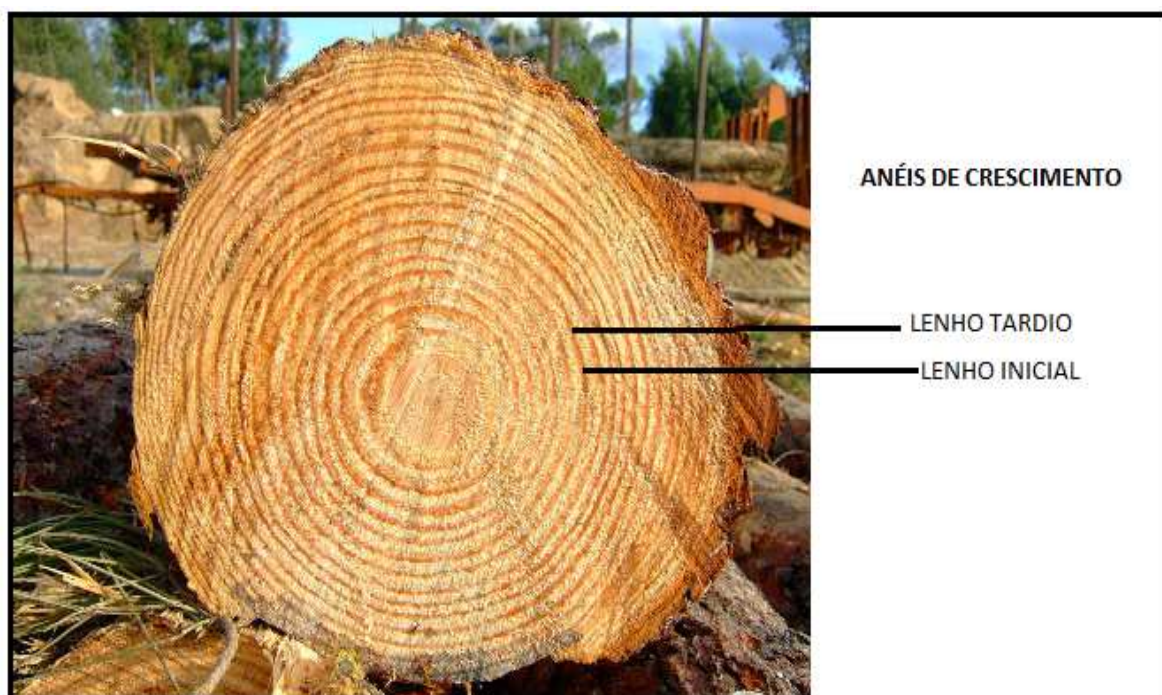
## 2.3. Fatores que influenciam no processo de secagem

### 2.3.1. Fatores inerentes à madeira

#### 2.3.1.1. Estrutura anatômica

Conforme pode ser observado na Figura 2, o tronco de uma árvore produtora de madeira pode ser descrito como uma pilha de cones superpostos. Em corte transversal, o tronco apresenta um desenho de círculos concêntricos, chamados anéis de crescimento ou anéis anuais. Em clima temperado, um anel “anual” apresenta duas faixas chamadas de lenho inicial ou primaveril, mais largo e lenho tardio, ou lenho estival ou outonal, mais compacto e mais rígido (GONZAGA, 2006).

Figura 2 – Anéis de crescimento em um tronco de uma folhosa.

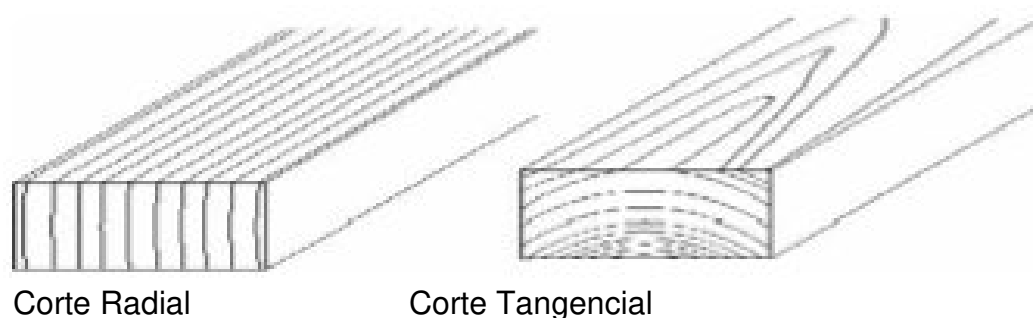


Fonte: Primária, 2018.

O lenho inicial tem objetivo de condução da seiva e possuem coloração mais clara. O lenho tardio é composto por células de parede mais grossa e vasos com diâmetros menores, esta estrutura fornece sustentação a árvore e possui coloração mais escura (GONZAGA, 2006).

De acordo com Denig et al. (2000), o comportamento e as características da madeira (tais como a resistência, rigidez, e as propriedades físicas, como o encolhimento) variam, dependendo de como as células são alinhadas. Isto é, a madeira é anisotrópica. As células são alinhadas em três direções: longitudinal, radial e tangencial. Na direção longitudinal predomina para cima e para baixo da árvore. Aproximadamente 85% a 95% das células estão alinhados nesta direção. Na direção radial é o sentido do lenho a partir da casca para dentro, para a medula. Estas células radialmente orientadas são chamadas de células dos raios. Na tangencial é a direção tangente aos anéis de crescimento quando exibindo a extremidade de uma tora. Quando a face da madeira serrada é de superfície tangencial, a madeira serrada é chamada de corte tangencial; e quando a face larga da madeira serrada é de superfície radial, a madeira serrada é chamada de corte radial, como demonstra a Figura 3.

Figura 3 - Representação tridimensional dos sentidos de corte radial e tangencial da madeira *Pinus sp.*



Fonte: Denig, Wengert e Simpson (2000).

Conforme os autores, madeira serrada no sentido tangencial seca mais rápido do que a madeira serrada no sentido radial. Desta forma a madeira serrada no sentido tangencial tem um risco muito maior de desenvolver trincas de superfície e trincas internas (favo de mel). A madeira serrada no sentido tangencial também tem uma maior tendência para o encanoamento durante a secagem. Já a madeira serrada no sentido radial é bastante estável, diminuindo de largura cerca de metade do que diminui a madeira serrada no sentido tangencial, e tem pouca tendência para o defeito de encanoamento.

### 2.3.1.2. Teor de umidade

Para Figueroa (2012), a diminuição da umidade da madeira através de um processo de secagem com temperaturas mais elevadas leva ao aparecimento de tensões internas e fendas na parede celular. Estas tensões internas e fendas na estrutura da madeira levam a diminuição da resistência mecânica de suas propriedades.

A umidade da madeira é normalmente expressa como teor de umidade percentual (U%) e representa a massa de água que a madeira possui por unidade de massa seca. Quatro métodos de determinação do teor de umidade são descritos nas normas ASTM D 4442 (ASTM, 2007) dentre os quais o método da secagem em estufa tem sido o mais utilizado para a determinação de U% devido à sua simplicidade de execução; porém é considerado lento e requer o corte da madeira para retirada de amostras. O método elétrico é o mais rápido, não requer o corte da madeira, mas é geralmente limitado a valores de umidade menores que 30% (WOOD HANDBOOK, 2010).

Vários modelos de medidores elétricos se encontram disponíveis no mercado e segundo Jankowski e Galina (2013) os mais utilizados têm sido os do tipo capacitivo, ilustrado na Figura 4A e os do tipo resistência, ilustrado na Figura 4B. Figura 4 - Medidores elétricos de umidade da madeira: (A) Medidor de agulha (medidor do tipo resistência), (B) Medidor de contato (medidor do tipo capacitivo ou perda de potência).



Fonte: Jankowski e Galina (2013).

Em árvores recém-cortadas, o valor de U% varia entre, aproximadamente, 50% e 200%. No entanto, é necessário um U% entre 8% e 15% para uso final, dependendo da localização e tipo de uso (RÉMOND; PASSARD; PERRÉ, 2007).

### 2.3.1.3. Massa Específica ou Densidade

Densidade ou massa específica é conceituada como a massa da madeira por unidade de volume. O aumento da densidade com a umidade da madeira ocorre de forma mais acentuada acima do ponto de saturação da fibra, pois nesta condição não há mais o inchamento da madeira (SIAU, 1984; ELEOTÉRIO, 2009).

Em geral, as espécies mais leves secam mais rápido do que as espécies mais pesadas porque a estrutura da madeira mais leve contém mais aberturas por unidade de volume e a umidade move-se através do ar mais rápido do que através das paredes celulares da madeira (WOOD HANDBOOK, 2010).

### 2.3.1.4. Espessura da madeira

Quando a madeira está sendo seca, a umidade evapora de todas as superfícies, mas principalmente das faces largas das tábuas. Porém, para Denig et al. (2000), é a espessura da madeira a dimensão mais crítica. Quanto mais espessa é a madeira, maior será o tempo de secagem e mais difícil será para secar sem criar defeitos.

Segundo Jankowski (2000), quanto mais espessa for a peça de madeira maior será a relação entre a massa de água a ser retirada e a superfície de evaporação, e menor será a taxa de movimentação por difusão. Como agravante no processo de secagem, será necessário um tempo de secagem maior para atingir um mesmo teor de umidade final (JANKOWSKI, 2000).

## 2.3.2. Fatores inerentes ao ambiente de secagem

### 2.3.2.1. Temperatura

Conforme Klitzke (2002), como a secagem se processa do interior para a superfície, se a temperatura for constante, a taxa de evaporação diminuirá gradativamente à medida que diminui o teor de umidade da madeira e aumenta a pressão parcial de vapor da água no ar. Por este motivo, caso se deseja manter a taxa de secagem constante durante todo o processo, deve-se aumentar gradualmente a temperatura para fornecer mais energia às moléculas de água e, deste modo,



aumentar a pressão de vapor do difundente. Além disto, com o aumento da temperatura reduz-se a umidade relativa do ar na câmara de secagem pelo aumento da pressão de saturação da água.

Para Denig et al. (2000), quanto maior a temperatura da madeira, mais rapidamente se movimentam as moléculas de água no interior da peça o que resultou numa velocidade de secagem mais uniforme durante todo o processo. No entanto, os autores verificaram que quanto maior a temperatura de secagem, maior foi a quantidade de peças com o defeito de empenamento.

Fernandes, Costa e Thomas (2006) efetuaram testes experimentais com o objetivo de estabelecer o comportamento da temperatura no centro de uma peça de madeira da espécie *Pinus sp.* de 1 polegada de espessura, fixando as temperaturas de secagem em 80, 90 e 100 °C. Os testes foram realizados para madeira seca e para madeira verde e indicaram que para madeira seca foram necessários 35 min para que o ponto central da peça alcançasse 56 °C (normatização fitossanitária), não importando, significativamente a temperatura externa. Para madeira úmida foram necessárias em torno de 5,5 h para que o ponto central atingisse a mesma temperatura. A partir dos resultados apresentados pelos autores e em função da espessura da peça é possível esperar, numa secagem a T constante, valores de temperatura no centro da peça bem menores do que a do ar na câmara de secagem.

Para dimensionar o efeito da temperatura e do teor de umidade na secagem de madeiras, Rémond, Passard e Perré (2007) utilizaram chapas de aço de espessura de até 90 mm submetidas à secagem a 70, 75 e 80 °C. Uma simples análise de transferência de calor e de massa realizada pelos autores provou que o tempo de secagem foi proporcional à espessura da placa. A partir dos resultados obtidos, foi proposto um modelo matemático capaz de simular a transferência de calor e de massa e o comportamento mecânico de uma placa de madeira durante a secagem. Para os autores, no início do processo a velocidade de secagem ocorreu basicamente devido à umidade na superfície e, num segundo momento, foi devido à velocidade de difusão do vapor de água no interior da placa, a qual foi função do quadrado da espessura da placa.

### 2.3.2.2. Umidade relativa do ar

Com o aumento da temperatura sem o aumento da umidade absoluta do ar, ocorre a diminuição da umidade relativa do ar (UR). Entre a umidade relativa do ar e a temperatura, se estabelece um equilíbrio higroscópico de elevada importância para a secagem da madeira, por que através desta relação é possível controlar e regular o processo de secagem (KLITZKE, 2002).

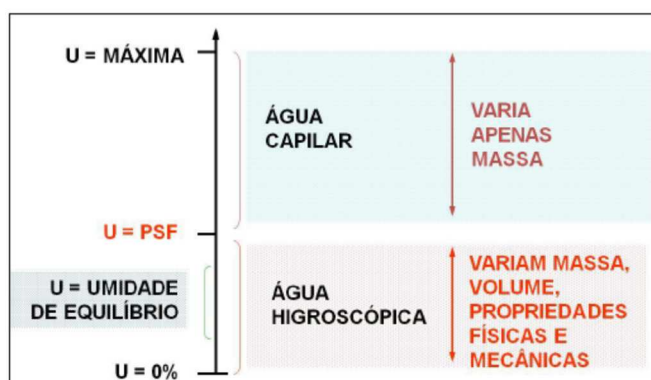
A umidade relativa do ar em torno da madeira deve ser o mais baixo possível para que o ambiente que a rodeia consiga de ser capaz de receber a umidade proveniente da madeira. A UR do ar é a razão entre a quantidade de água no ar (pressão parcial de vapor) e a quantidade máxima de água que o ar pode ter na mesma temperatura (pressão de saturação) (DENIG et al., 2000).

### 2.3.2.3. Umidade de equilíbrio da madeira

Entende-se como umidade de equilíbrio (UE) o teor de umidade da madeira em equilíbrio com o meio que a circunda (vizinhança). Conforme o manual da madeira ((WOOD HANDBOOK, 2010) o parâmetro UE pode ser entendido como o conteúdo de umidade em que a madeira pode tanto ganhar como perder umidade.

De acordo com Jankowski e Galina (2013), conforme pode ser verificado na Figura 5, a faixa de variação da UE corresponde a variações no teor de umidade higroscópica (abaixo do PSF), com as consequentes variações nas propriedades e nas dimensões do material.

Figura 5 - Efeito das variações de umidade nas propriedades da madeira.



Fonte: Jankowski e Galina (2013).

A UE da madeira aumenta com o aumento da UR do ar até que as paredes celulares fiquem saturadas, o que ocorre quando a umidade relativa do ar chega próximo de 100% (KEINE, 1997).

Para Klitzke (2002), elevando-se a temperatura do ar na câmara de secagem, se reduz a umidade de equilíbrio ocasionando a redução no teor de umidade da madeira.

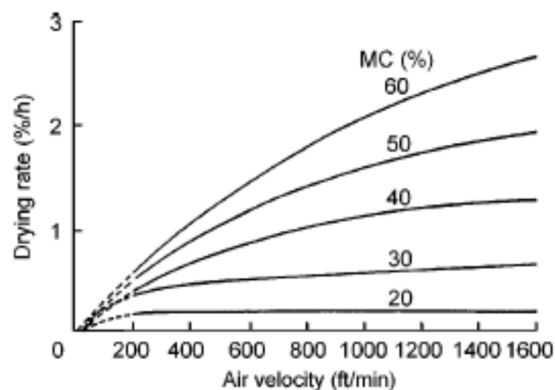
#### 2.3.2.4. Velocidade do ar

O impacto da circulação do ar na taxa de transferência de calor é mais acentuado acima do PSF e diminui de forma progressiva à medida que o teor de umidade da madeira decresce abaixo deste ponto (KLITZKE, 2002).

De acordo com DENIG et al. (2000), durante a secagem, o movimento do ar através de uma pilha de madeira serrada deve ser adequado para trazer a energia para a pilha, para remover a umidade evaporada e para manter a umidade relativa desejada. A velocidade do ar, quando a madeira possui teor de umidade superior a 40%, afeta a taxa de secagem, conforme pode ser visto na Figura 6.

Velocidades mais altas resultam em secagem mais rápida, umidade relativa e secagem mais uniforme dentro da pilha. Porém a secagem mais rápida pode aumentar o risco de rachaduras, mas, de forma inversa, pode diminuir a quantidade de empenamentos. Abaixo de 20% de umidade, a velocidade do ar tem pouco efeito sobre a taxa ou qualidade da secagem. Isto é, a relação entre a velocidade e a taxa de secagem é quase uma linha horizontal a 20% de teor de umidade.

Figura 6 - Influência da velocidade do ar com umidade relativa de 65% sobre a taxa de secagem de madeira dura contendo diferentes teores de umidade.



Fonte: Denig et al. (2000).

A velocidade do ar é normalmente medida no lado da saída da pilha por ser mais fácil medir. É difícil medir a velocidade com precisão na entrada da pilha. Velocidades do ar entre 2 e 4 m/s são indicadas como adequadas para a maioria das espécies de madeira, entretanto madeiras permeáveis ou com elevado teor de umidade inicial podem utilizar velocidades acima de 4 m/s para uma secagem rápida (HILDEBRAND, 1970 apud MELO, 2005).

Santini e Haselein (2002) realizaram pesquisa com o objetivo de avaliar o efeito da temperatura e da velocidade do ar sobre a taxa de secagem, calculada pela relação entre a percentagem de água evaporada e o tempo decorrido durante a secagem da madeira serrada de *Pinus elliottii* spp. Os autores concluíram que o efeito da velocidade do ar foi mais pronunciado na alta temperatura, em que o uso de velocidade do ar de 5,0 m/s reduziu pela metade o tempo de secagem, em comparação com a velocidade de 2,3 m/s. A taxa de secagem mostrou uma relação diretamente proporcional com a temperatura, velocidade do ar e teor de umidade da madeira. Na temperatura de 110 °C e velocidade de 5,0 m/s, a taxa foi praticamente o dobro daquela obtida com 2,3 m/s, durante todo o período de secagem. A influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem foi decrescente à medida que diminuiu o teor de umidade e se tornou quase desprezível na secagem à baixa temperatura.

#### 2.4. O processo de secagem

A secagem da madeira é o balanço dinâmico entre a transferência de calor da corrente de ar para a madeira, a evaporação superficial, a difusão de umidade no interior do meio, o fluxo de água capilar nas cavidades da madeira e o desprendimento de moléculas de água das cadeias de celulose. Dominar os efeitos que diferentes fatores tenham sobre este fenômeno constitui a tecnologia da secagem da madeira (KEINE, 1997).

Em qualquer processo de transformação da madeira em produtos, a secagem pode ser definida como a fase intermediária que mais agrega valor ao produto final (SANTOS, 2002).

Martins (1988) define a secagem como o processo de redução do teor de umidade, com intuito de levar a madeira a um teor de umidade definitivo, com poucos defeitos, no menor tempo possível e de uma forma viável economicamente para o uso pretendido.

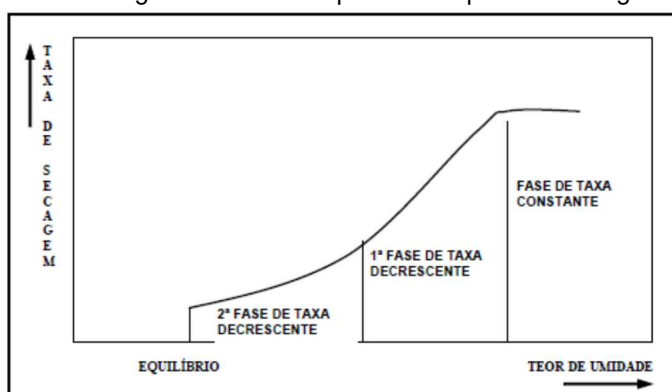
Segundo Melo (2005), um processo de secagem pode ser realizado de forma natural ou artificial. No primeiro processo a secagem é feita ao ar livre. E no segundo são utilizadas câmaras isoladas do ambiente externo como secadores ou estufas, onde a umidade, velocidade do ar de secagem e a temperatura interna podem ser controladas.

Jankowski, Santos e Andrade (2003) relatam que o objetivo principal da secagem artificial é fomentar o equilíbrio entre a velocidade de evaporação da água na superfície da madeira, a taxa de movimentação interna (tanto de calor como de umidade) e as reações da madeira durante o processo. Busca-se tornar a secagem um processo rápido e com nível de perdas e padrão de qualidade aceitáveis para o produto que se pretende secar.

Segundo Santini (1996), para que a secagem da madeira ocorra de maneira adequada, a umidade relativa dentro da estufa deve ser controlada. Quando essa umidade é maior do que a desejada, o ar interno é substituído pelo ar externo mais seco através de aberturas conhecidas como janelas de ventilação. Mas quando a umidade relativa dentro da estufa é menor do que a necessária, deve ser adicionada umidade através de pulverização de vapor ou água atomizada.

A madeira é um material poroso e higroscópico, contendo água no estado líquido dentro de suas fibras e água adsorvida junto aos componentes da parede celular. Durante a secagem de um material poroso por convecção, ocorrem três estágios distintos, como pode ser observado na Figura 7, os quais determinam a curva característica de secagem do material (JANKOWSKI; SANTOS; ANDRADE, 2003): fase de taxa constante de secagem, 1ª fase de taxa decrescente e 2ª fase de taxa decrescente.

Figura 7 - Fases da taxa de secagem durante um processo típico de secagem de sólidos porosos.



Fonte: Jankowski, Santos e Andrade (2003).

#### 2.4.1. Fase de taxa constante.

Na primeira fase (taxa de secagem constante) ocorre a evaporação da água na superfície do material e a movimentação da água líquida, do interior até a superfície de evaporação guiado por forças de capilaridade. Pela superfície ocorre o deslocamento de uma corrente de ar, caracterizando uma secagem por convecção. O calor da corrente de ar é transferido para a superfície da madeira, promovendo a vaporização da água existente, que no estado de vapor é transferida para a corrente de ar (MELLADO, 2007).

#### 2.4.2. Primeira fase da taxa da secagem decrescente

À medida que o material perde umidade, a vaporização da água na superfície provocará um gradiente de umidade (principalmente no sentido da espessura) e parte da energia aquecerá a madeira. Neste ponto em que a quantidade de água líquida que chega até a superfície é menor que a quantidade de água evaporada dá-se o início da primeira fase de taxa de secagem decrescente, durante a qual a linha de vaporização penetra na madeira em direção ao centro (JANKOWSKI; SANTOS; ANDRADE, 2003).

#### 2.4.3. Segunda fase da taxa da secagem decrescente

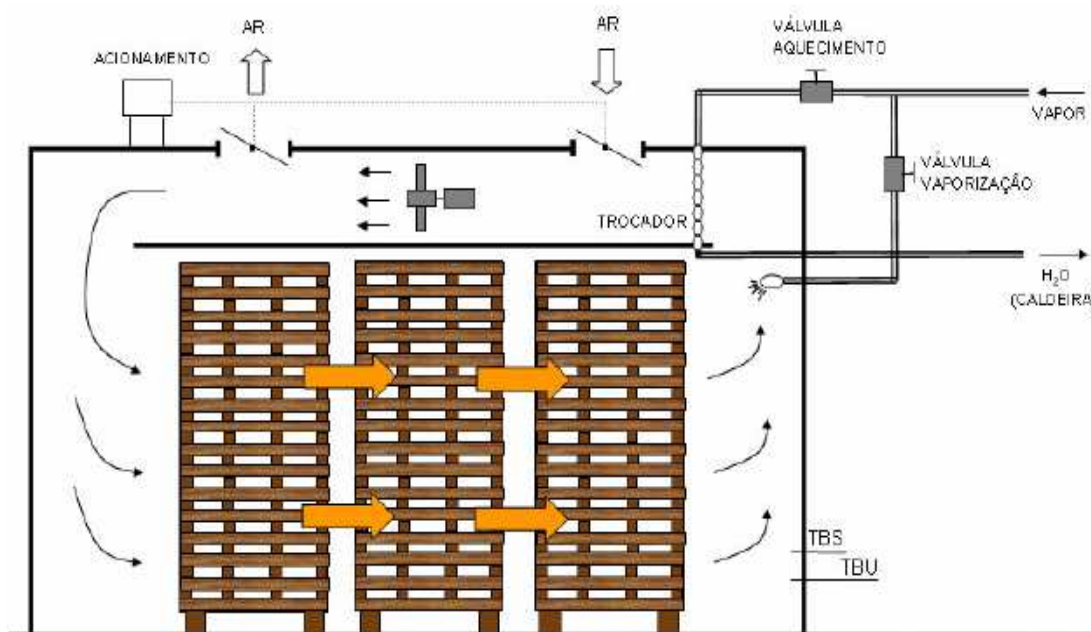
Tem início quando a linha de evaporação de água se restringe ao centro da madeira. Neste ponto não há mais água livre na madeira. A continuação da secagem passa a ser controlada pela resistência interna da madeira até o teor de umidade de equilíbrio ser alcançado. Nesta fase, a velocidade de secagem tende a zero. As características do ar (temperatura, umidade relativa e velocidade) já não têm grande influência. A velocidade de evaporação depende da umidade média da madeira e da temperatura em que se encontra a madeira. Neste ponto, a velocidade do ar parece não ter ação direta (MELLADO, 2007).

## 2.5. Secagem convencional de madeiras

A secagem convencional da madeira é realizada por um dispositivo chamado secador convencional. Jankowski (2000), define o secador convencional para madeiras como um equipamento projetado para a secagem de madeira serrada, com um sistema de aquecimento para operar a temperaturas entre 40 °C e 90 °C, um sistema de ventilação para forçar o fluxo de ar através da pilha de madeira, um sistema de umidificação e janelas que permitam a saída do ar saturado e entrada de ar externo (não saturado).

Na Figura 8 é possível observar a estrutura esquemática de um secador convencional.

Figura 8 - Desenho esquemático de um secador convencional.



Fonte: Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (2004).

Dado o valor agregado pela secagem de madeira, há uma série de diferentes tecnologias que têm sido desenvolvidas para a secagem da madeira comercial. É muito difícil de remover a umidade da madeira mecanicamente, por isso a maioria das tecnologias dependem de remoção da água na forma de vapor e fornecendo o calor latente necessário para a evaporação. A maioria dos processos usam o ar atmosférico como agente convectivo e aquecimento da madeira bem controlada (MC CURDY, 2005).

Num processo de secagem industrial, o objetivo principal é a redução no tempo de permanência da madeira na estufa, que para ser alcançado requer não apenas um secador eficiente, mas também uma série de cuidados básicos em relação à madeira e ao controle do processo. As principais características do secador que irão afetar a sua eficiência são o material de construção, a circulação do ar, a potência térmica e a capacidade da troca de ar (JANKOWSKI, 2000). Para o autor, a secagem é a operação intermediária que mais contribui para adicionar valor aos produtos manufaturados da madeira e é também uma das fases de maior custo na indústria de transformação.

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), a secagem convencional proporciona consideráveis benefícios adicionais, como a redução do período de tempo na secagem, acarretando giro mais rápido do capital investido em madeira estocada, permite o ajuste do teor de umidade da madeira de acordo com as condições climáticas do local de uso, em qualquer época do ano, possibilita conseguir teores de umidade mais baixos do que aqueles alcançados pela secagem ao ar livre, diminui os defeitos de secagem como rachaduras, empenamentos e encanoamentos, se for conduzida de acordo com técnicas adequadas e acaba com fungos e insetos presentes na madeira.

Andrade (2000) e Aquino-González et al. (2010) indicaram como ideal a secagem de madeira por programas de secagem utilizando diferentes ranges de temperaturas para diferentes espécies de madeiras.

Um programa de secagem é um compromisso cuidadosamente desenvolvido entre a necessidade de secar a madeira serrada tão rápido quanto possível junto com a eficiência econômica e a necessidade de evitar as condições de secagem severas que conduzam a defeitos de secagem. Na maioria dos programas, a temperatura é aumentada gradualmente e a umidade relativa diminuída, reduzindo assim a umidade de equilíbrio da madeira. O programa deve ser desenvolvido de modo que as tensões de secagem não excedam a força da madeira a qualquer temperatura e teor de umidade. Caso contrário, a madeira vai rachar na superfície ou internamente ou ser esmagada pelas forças que colapsam as células da madeira (WOOD HANDBOOK, 2010).

Em um programa de secagem podem ser reconhecidas três fases distintas (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; ANDRADE, 2000; MELO, 2005): aquecimento, secagem propriamente dita e uniformização/condicionamento. Essa última,



necessária para os casos em que se quer homogeneizar o máximo possível à umidade em todas as peças da pilha de madeira e eliminar suas tensões internas, mediante o reumedecimento das camadas superficiais. A temperatura e a umidade relativa na fase de uniformização e condicionamento dependem da temperatura final prevista no programa e do teor de umidade final desejado para a madeira.

## 2.6. Defeitos causados pela secagem

Jankowski (2000) relata que o padrão de qualidade pretendido é outro importante aspecto usualmente desconsiderado pela indústria madeireira. Na maioria das situações isto ocorre porque o usuário simplesmente desconhece o significado do termo qualidade. As principais características de qualidade para madeira seca são: o teor de umidade compatível com o uso pretendido, mínimo de variação no teor de umidade, tanto dentro de cada peça como entre todas as peças, livre de tensões de secagem e livre de defeitos visíveis, como por exemplo, rachaduras, empenamentos e colapso.

Os principais defeitos gerados durante o processo de secagem são os empenos, as rachaduras, o colapso e o encruamento. Todos estes problemas devem-se aos efeitos produzidos pela variação da temperatura e da umidade no interior da câmara de secagem. Para neutralizar o surgimento destes defeitos, deve-se manter a temperatura e umidade o mais próximo possível das condições ideais. Importante destacar que estas condições variam para cada tipo de madeira (MELO, 2005).

Os defeitos mais importantes de secagem podem ser agrupados em quatro categorias: o colapso, as rachaduras, o encruamento e os empenamentos.

### 2.6.1. Colapso

O colapso é definido como sendo ondulações nas superfícies das peças de madeira, que podem apresentar-se bastante distorcidas. O colapso é basicamente ocasionado por forças geradas durante a movimentação da água capilar que deformam as células. Os fatores que influem no colapso da madeira são o pequeno diâmetro dos capilares, altas temperaturas no início da secagem, baixa densidade da madeira e alta tensão superficial do líquido que é removido da madeira (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

O colapso tem início na falta de controle da temperatura durante a secagem em estufa. No decorrer do processo, a temperatura não pode ser excessivamente alta, até que se conclua a remoção da água livre. É necessário manter a saturação de umidade adequada em forma de vapor (GONZAGA, 2006).

A madeira se apresenta com a superfície ondulada ou com retração mais acentuada em áreas bem definidas, com a aparência de ter sido esmagada, como ilustra a Figura 9. O colapso somente ocorre enquanto houver água livre na madeira, ou seja, o teor de umidade estará acima do PSF (JANKOWSKI; GALINA 2013).

Figura 9 - Ilustração da aparência da madeira com colapso.



Fonte: Jankowski e Galina (2013).

### 2.6.2. Rachaduras

Galvão e Jankowsky (1985) citam que as rachaduras aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre regiões vizinhas da mesma peça de madeira durante o processo de secagem. Essa diferença leva ao aparecimento de tensões que são superiores a resistência dos tecidos lenhosos, ocasionando a ruptura da madeira.

Já as rachaduras em favos ocorrem no interior das peças de madeira, não sendo visíveis antes do corte da peça. São oriundas das tensões geradas durante a primeira fase da secagem, sempre que essas tensões superem a “resistência à tração” no sentido perpendicular às fibras. Nesse caso ocorre ruptura dos tecidos e redução da

resistência da madeira. Ocorre também quando a temperatura inicial é muito alta, não tendo sido mantida a necessária saturação de vapor, compensadora das tensões (GONZAGA, 2006).

Quando a força da tensão de tração na superfície for maior que a resistência mecânica do material, o resultado será o aparecimento de rachaduras superficiais, no sentido longitudinal. Ocorrência parecida é verificada nos topos das peças de madeira serrada, uma vez que a taxa de movimentação da umidade (tanto capilar como higroscópica) é maior no sentido das fibras (longitudinal) do que no sentido transversal. Como resultado, a região próxima ao topo seca mais rápido que o restante da peça, dando origem ao desenvolvimento de tensões transversais que podem causar a incidência de rachaduras no sentido dos raios. As rachaduras se originam quando a secagem é muito drástica, o que faz com que a superfície fique muito mais seca do que a parte interna (JANKOWSKI; GALINA, 2013).

Ananias, Sepúlveda e VAZ (2007) concluíram que a percentagem de rachaduras internas dentro dos anéis durante a secagem industrial do *Pinus radiata* é significativamente influenciada pelo local de origem, o tipo de madeira e a altura da árvore. Madeiras originadas a partir de áreas arenosas apresentam uma porcentagem significativamente maior de rachaduras internas dentro dos anéis que a madeira a partir de áreas calcárias. A porcentagem de rachaduras internas dentro dos anéis é significativamente mais elevada no centro da madeira. A madeira da copa tem uma porcentagem significativamente mais elevada de rachaduras internas dentro dos anéis.

Conforme aponta Santos (2002), a localização das rachaduras é basicamente no topo e na superfície das peças, cuja incidência verifica-se principalmente durante as primeiras fases da secagem. Posteriormente, podem surgir rachaduras internas, que só podem ser vistas no interior das peças mediante o seccionamento transversal das mesmas.

Segundo Jankowsky (1990), na secagem da madeira, as rachaduras superficiais podem acontecer quando as condições são muito severas, a baixa umidade relativa provoca a rápida secagem das camadas superficiais a valores abaixo do PSF, enquanto as camadas internas estão com mais de 30% de umidade. Como as camadas internas impedem as superficiais de se retraírem, aparecem tensões que excedem a resistência da madeira à tração perpendicular às fibras e provocam o

rompimento dos tecidos lenhosos. Isto normalmente ocorre nos tecidos que compõem os raios.

### 2.6.3. Encruamento

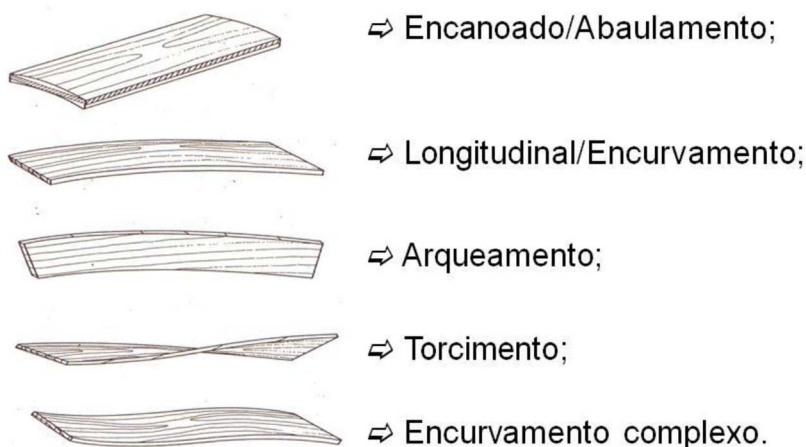
Quando submetida erroneamente a tensões excessivas durante a secagem, a madeira adquire tensões permanentes, ficando as fibras externas sob compressão e as internas sob tração. Quando a madeira passar pelo processo de desdobro ou usinagem, a peça apresentará empenamentos inesperados (GONZAGA, 2006).

### 2.6.4. Empenamentos

São definidos como qualquer distorção da peça de madeira em relação aos planos originais de sua superfície (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

No empenamento, a peça sofre distorções em relação aos planos originais em que foi cortada. O empenamento encanoado ocorre sempre que uma das superfícies da tábua se contrai mais do que a outra. No longitudinal, decorre das irregularidades da grã, do corte da peça, ou do lenho de reação, em árvores que crescem em terreno de forte inclinação. No torcido, o tecido fibroso de algumas espécies cresce em espiral. A Figura 10 ilustra os principais tipos de empenamentos e suas denominações mais comuns (JANKOWSKI; GALINA, 2013).

Figura 10 - Tipos de empenamentos que ocorrem na madeira e suas respectivas denominações.



Fonte: Jankowski e Galina (2013).

### 3. METODOLOGIA

Este estudo tem por objetivo avaliar a influência do tipo de corte da madeira *Pinus taeda* spp. e das condições operacionais de secagem convencional, temperatura e velocidade do ar, sobre a velocidade do processo e surgimento de defeitos na madeira seca como a rachadura superficial, empenamentos e tensões internas.

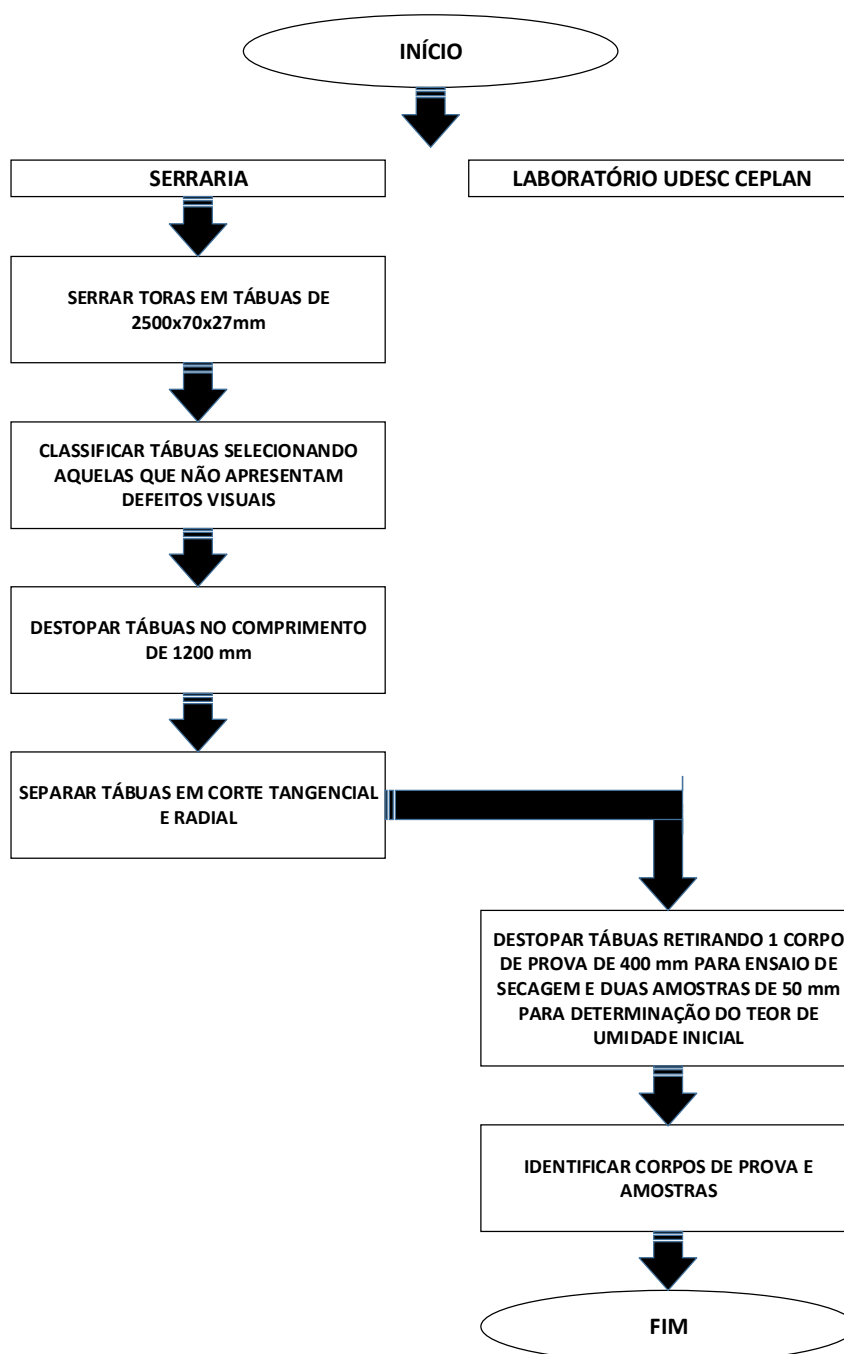
Para tanto, a cinética de secagem convencional da madeira *Pinus taeda* spp. foi determinada para os sentidos tangencial e radial, nas temperaturas de 40, 60 e 80 °C, nas velocidades do ar de 0, 0,6 e 1,2 m/s. Posteriormente, quantificou-se o efeito das variáveis sentido de corte, temperatura e velocidade do ar sobre a velocidade máxima de secagem, por meio de análise de superfície de resposta. Por fim, foram identificadas as condições operacionais que ocasionaram maiores quantidades de defeitos, para que fosse possível indicar condições de adequadas de secagem em relação a cada tipo de corte de madeira.

A metodologia aplicada para atender o objetivo anteriormente exposto é detalhada a seguir.

#### 3.1. Obtenção dos corpos de prova

Para os ensaios de secagem, foram utilizados corpos de prova e amostras em madeira, obtidos pelos processos descritos na Figura 11.

Figura 11 – Fluxograma do processo de obtenção de corpos de prova e amostras.



Na sequência serão descritos os materiais empregados e as etapas relacionadas na Figura 11, utilizadas para este estudo.

Para a produção dos corpos de prova e das amostras foram utilizados cortes de madeira provenientes de toras de *Pinus taeda*, ilustradas na Figura 12a, recém cortadas de plantações da região de São Bento do Sul, planalto norte Catarinense. As toras foram serradas em serra fita, conforme representado na Figura 12b, cedida por

serraria de pequeno porte em São Bento do Sul, para obtenção de tábuas de comprimento 2500 mm, largura 70 mm e espessura 27 mm, ilustradas na Figura 12c. Dentre as tábuas produzidas, foram selecionadas aquelas que não apresentavam defeitos visuais e, novamente, serradas em duas partes, conforme Figura 12d, com comprimento não inferior a 1200 mm e levadas para o laboratório da Universidade do Estado Santa Catarina – UDESC, campus CEPLAN, São Bento do Sul - SC, para o corte final.

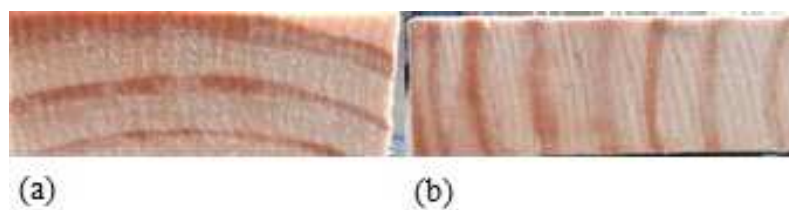
Figura 12 - Produção de tábuas para obtenção das amostras e corpos de prova: (a) Toras recebidas na serraria; (b) Obtenção de tábuas 2500x70x27 mm em serra fita; (c) Estoque de tábuas serradas para seleção; (d) Novo corte das tábuas selecionadas para envio à UDESC visando a confecção das amostras e corpos de prova



Fonte: Primária, 2017.

No laboratório da UDESC/CEPLAN, as tábuas de 1200 mm foram separadas por corte tangencial (Tang) e corte radial (Rad), como ilustram as Figuras 13a e 13b e, então, confeccionados os específicos corpos de prova.

Figura 13 - Planos de corte das tábuas: (a) Corte tangencial; (b) Corte radial.



Fonte: Primária, 2017.

Os cortes dessas tábuas foram realizados em serra de bancada, ilustrada na Figura 14a, de modo a obter, além dos corpos de prova para os ensaios de secagem, amostras menores, com 50 mm de comprimento, 70 mm de largura e 27 mm de espessura, para determinação do teor de umidade inicial da madeira, conforme mostra a Figura 14b.

Figura 14 - (a) Serra de bancada utilizada para o corte final dos corpos de prova (peças de maior comprimento) e (b) amostras para determinação do teor de umidade inicial (peças de menor comprimento), ambas devidamente identificadas

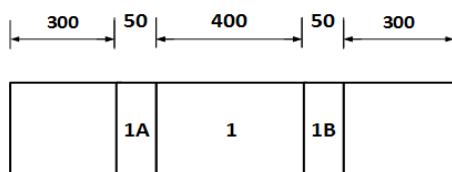


Fonte: Primária, 2017.

Para a confecção desses corpos de prova de dimensões iguais a 400 mm (comprimento), 70 mm (largura) e 27 mm (espessura), com suas respectivas amostras, seguiu-se a seguinte metodologia descrita por Galvão e Jankowski (1985), conforme mostra a Figura 15: descarte de 300 mm de cada extremidade das tábuas de 1200 mm para assegurar homogeneidade no teor de umidade dos corpos de prova; retirada das amostras pequenas de 50 mm de comprimento, uma do lado direito e outra do lado esquerdo da tábua remanescente, para determinação do teor de umidade da madeira; retirada do corpo de prova de 400 mm a ser utilizado no ensaio de secagem.



Figura 15 - Esquema de corte da madeira para obtenção dos corpos de prova para secagem (1), amostras para determinação do teor de umidade inicial da madeira (1a e 1b) e descartes (extremidades de comprimento 300 mm).



Fonte: Primária, 2016.

### 3.2. Ensaaios de secagem

Como secador, foi utilizado uma estufa de secagem de laboratório, que está representada na Figura 16, fabricada pela SOLAB, modelo SL101, com controle de temperatura. Como o equipamento não dispunha de circulação forçada de ar, foi realizada a instalação de seis ventiladores próximos às resistências de aquecimento e um variador de potência junto ao painel elétrico de controle, com o objetivo de controlar a velocidade forçada de ar no interior da câmara de secagem.

Figura 16 - Secador laboratorial utilizado nos experimentos de secagem da madeira *Pinus taeda*: (a) parte interna da estufa com resistência elétrica original (câmara de secagem); (b) ventiladores instalados sobre a resistência elétrica para obtenção da circulação forçada de ar; (c) chave liga/desliga dos ventiladores e variador de potência e respectiva caixa de comando (d), ambos instalados para o controle da velocidade de circulação do ar na câmara de secagem.



Fonte: Primária, 2017.

Foram realizados 18 ensaios de secagem em escala laboratorial, nove para cada um dos sentidos de corte selecionados. Em cada experimento foram utilizados nove

corpos de prova. A umidade relativa do ar (UR%) no interior da estufa não foi controlada, mas acompanhada com auxílio de um termo higrômetro digital modelo HTH240 da marca Hikari.

As variáveis operacionais avaliadas, mantidas constantes durante todo o experimento, foram: temperatura ( $T = 40, 60$  e  $80$  °C) e velocidade do ar dentro da câmara de secagem ( $u_{\infty} = 0, 0,6$  e  $1,2$  m/s). A identificação desses ensaios, com o respectivo tipo de corte da madeira, pode ser observada na Tabela 1.

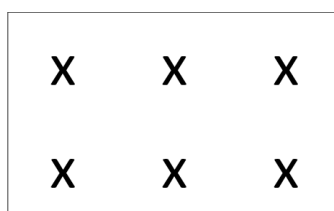
Tabela 1- Identificação dos ensaios de secagem de *Pinus taeda* com corte tangencial (Tang) e radial (Rad) para realização dos experimentos de secagem com diferentes temperaturas e velocidade do ar na câmara de secagem.

Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Sentido de corte	Identificação do Ensaio
40	0	Tang	T40-0
		Rad	R40-0
	0,6	Tang	T40-0,6
		Rad	R40-0,6
	1,2	Tang	T40-1,2
		Rad	R40-1,2
60	0	Tang	T60-0-0
		Rad	R60-0
	0,6	Tang	T60-0,6
		Rad	R60-0,6
	1,2	Tang	T60-1,2
		Rad	R60-1,2
80	0	Tang	T80-0
		Rad	R80-0
	0,6	Tang	T80-0,6
		Rad	R80-0,6
	1,2	Tang	T80-1,2
		Rad	R80-1,2
<b>Total de ensaios</b>			<b>18</b>

Fonte: Primária, 2017.

O ajuste da velocidade do ar na câmara de secagem com os corpos de prova foi realizado no início de cada experimento com auxílio de um anemômetro digital colocado em seis diferentes pontos da estufa, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Pontos no interior da estufa em que a velocidade de circulação do ar foi medida.



Fonte: Primária, 2017.

Os corpos de prova no interior da estufa foram dispostos de forma alternada nas bandejas, ou seja, um corpo de prova tangencial e outro radial, perfazendo o total de 18 corpos de prova por experimento. A Figura 18 ilustra a disposição dos corpos de prova dentro da estufa. Foi mantido o espaçamento mínimo de 23 mm entre as peças, conforme recomendado por Galvão e Jankowsky (1985). Essas disposições foram mantidas durante todo o processo de secagem.

Figura 18 - Interior da estufa mostrando o anemômetro digital empregado no ajuste da velocidade do ar de secagem e a disposição dos dezoito corpos de prova intercalados por um corte tangencial e outro radial.



Fonte: Primária, 2017.

### 3.3. Análise do teor de umidade e cálculo dos parâmetros cinéticos de secagem

#### 3.3.1. Determinação do teor de umidade inicial

Antes do início dos ensaios de secagem, determinou-se o teor de umidade em base seca ( $U\%$ ) por gravimetria para cada tipo de corte de madeira utilizada. Para determinação do teor de umidade inicial, foram utilizadas duas amostras de 50 mm de comprimento de cada corpo de prova, conforme mostrado na Figura 15. As amostras foram inicialmente pesadas em balança digital para determinação dos respectivos valores de massa úmida ou massa verde inicial ( $MV_0$ ). Em seguida, as amostras úmidas foram submetidas à secagem em estufa a  $103 \pm 2$  °C sendo periodicamente pesadas até atingir massa constante ou massa seca ( $MS$ ), conforme proposto por Galvão e Jankowsky (1985) e empregado por Denig et al. (2000).

O cálculo de  $U\%$  relativo ao tempo zero de secagem ( $U_0\%$ ) foi realizado conforme Equação 1.

$$U\% = \frac{MV - MS}{MS} 100 \quad (1)$$

Onde,

$U\%$  - teor de umidade da amostra (%)

$MV$  - massa da amostra úmida ou massa verde (g)

$MS$  - massa seca da amostra (g)

#### 3.3.2. Determinação das velocidades de secagem

As velocidades instantâneas de secagem ( $v$ ), expressas em massa de água evaporada por unidade de tempo e por unidade de área superficial da corpo de prova ( $\text{g/h.cm}^2$ ) foram estimadas a partir da variação de  $U\%$  ( $\Delta U\%$ ) para cada período de tempo de secagem estabelecido ( $\Delta t$ ), conforme Equação 2.

$$v = \frac{\Delta U\%}{\Delta t \cdot A} = \frac{U\%_{i-1} - U\%_i}{(t_j - t_{j-1})A} = \frac{PV_{i-1} - PV_i}{(t_j - t_{j-1})A} \quad (2)$$

Os valores das áreas superficiais de secagem para cada ensaio foram calculados em função das dimensões específicas a cada um dos corpos de prova avaliado.

Os valores de  $\Delta U\%$  e  $\Delta t$  foram obtidos a partir de valores de  $U\%$  e  $t$  lidos diretamente das curvas cinéticas ajustadas para cada caso. Os valores de  $\Delta t$  foram de 0,5 h no período inicial do processo (até aproximadamente 10 h) onde, normalmente, para materiais de elevado teor de umidade e com características de substâncias amorfas como a madeira, ocorrem as maiores taxas de secagem e de 1 h após este período, até final do processo com  $U\% \leq 10\%$ .

A fim de avaliar o comportamento da secagem em faixas de teores de umidade considerados como críticos para o surgimento de defeitos na madeira (ANDRADE 2000; SANTOS, 2002), determinou-se as velocidades de secagem relativas aos períodos de secagem de  $U_0\%$  (madeira verde) até  $U\% = 30\%$ , de  $U_0\%$  até  $U\% = 10\%$  e entre  $U\%$  de 30% a 10%.

O valor médio da velocidade máxima de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ) para cada um dos conjuntos de corpos de prova em cada um dos nove ensaios realizados foi estimada a partir do valor da tangente à curva ajustada da variação de  $U\%$  em função do tempo de processo e foi expressa nas unidades de taxa de secagem ( $U\%/h$ ).

Os valores de  $v_{m\acute{a}x}$  foram utilizados nos cálculos para estimar os efeitos das variáveis  $T$ ,  $u_\infty$  e tipo de corte da madeira sobre esta velocidade e sobre os defeitos gerados na madeira após a secagem.

A partir dos valores médios conhecidos de  $v_{m\acute{a}x}$  específicos a cada ensaio de secagem, estimou-se os correspondentes valores médios das velocidades máximas de secagem ( $V_{m\acute{a}x}$ ), ou fluxos de massas, expressos nas unidades  $g/cm^2.h$  de acordo com a Equação 3.

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{MV - MS}{A t} = \frac{\left[ \left( \frac{U\%}{100} MS \right) + MS \right] - MS}{A t} = \frac{\left( \frac{v_{m\acute{a}x}}{100} MS \right)}{A} \quad (3)$$

### 3.3.3. Estimativa dos efeitos das variáveis de processos sobre o comportamento da cinética de secagem

Para quantificar o efeito e avaliar a influência da temperatura de secagem ( $T$ ), da velocidade do ar ( $u_{\infty}$ ) e do tipo de corte (tangencial e radial) sobre a velocidade máxima de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ), um planejamento fatorial completo  $2^3$ , ou seja, três fatores (variáveis) em dois níveis, totalizando 8 experimentos foi realizado, conforme a Tabela 2. Na sequência, realizou-se outro planejamento fatorial completo  $2^3$ , partindo-se dos melhores resultados obtidos no planejamento anteriormente citado. O segundo planejamento fatorial é descrito na Tabela 3.

Tabela 2 - Planejamento fatorial dos experimentos para a secagem de *Pinus taeda*. Os índices (-) e (+) indicam o nível de cada variável como inferior e superior, respectivamente.

Variável experimental	Níveis		
	-	+	
Temperatura de secagem: T	40	60	
Velocidade do ar: $u_{\infty}$ (m/s)	0,0	0,6	
Tipo de corte	Tangencial (Tang)	Radial (Rad)	
Experimentos	T (°C)	$u_{\infty}$ (m/s)	Tipo de corte
1	40	0,0	Tang
2	40	0,0	Rad
3	40	0,6	Tang
4	40	0,6	Rad
5	60	0,0	Tang
6	60	0,0	Rad
7	60	0,6	Tang
8	60	0,6	Rad

Fonte: Primária, 2018.

Tabela 3 - Planejamento fatorial dos experimentos para a secagem de *Pinus taeda*. Os índices (-) e (+) indicam o nível de cada variável como inferior e superior, respectivamente.

Variável experimental	Níveis		
	-	+	
Temperatura de secagem: T	60	80	
Velocidade do ar: $u^\infty$ (m/s)	0,6	1,2	
Tipo de corte	Tangencial (Tang)	Radial (Rad)	
Experimentos	T (°C)	$u^\infty$ (m/s)	Tipo de corte
1	60	0,6	Tang
2	60	0,6	Rad
3	60	1,2	Tang
4	60	1,2	Rad
5	80	0,6	Tang
6	80	0,6	Rad
7	80	1,2	Tang
8	80	1,2	Rad

Fonte: Primária, 2018.

Cabe ressaltar, que os experimentos  $T = 40$  °C com  $u^\infty = 1,2$  m/s e  $T = 80$  °C com  $u^\infty = 0,0$  m/s, tanto para corte tangencial quanto para corte radial, não cabiam nos planejamentos fatoriais completos  $2^3$ , mas foram utilizados na validação dos modelos matemáticos obtidos a partir da análise da superfície de resposta de cada um dos conjuntos de ensaios.

### 3.4 Avaliação da qualidade da secagem

A qualidade da secagem foi avaliada através da ocorrência de defeitos e da presença de tensões residuais nos corpos de prova secos. Os defeitos avaliados foram empenamentos, rachaduras e tensões residuais.

A frequência de cada defeito foi estabelecida em relação ao número total de corpos de prova que apresentaram defeitos, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Frequência dos defeitos de secagem em função do número de corpos de prova secos que apresentaram defeitos.

Amostras que apresentaram defeitos (%)	Frequência
0 A 10	Ausente
11 a 30	Pequena
31 a 50	Moderada
51 a 100	Grande

Fonte: adaptado de Brasil (1988) apud Andrade (2000) e Santos (2002).

### 3.4.1. Empenamento

Os corpos de prova secos foram classificadas no início e no final da secagem, utilizando-se os valores do Quadro 2.

Quadro 2 - Tipo de empenamento e identificação da sua magnitude em função no número de corpos de prova que apresentaram o defeito

Empenamentos	Magnitude		
	Leve	Médio	Forte
Arqueamento (a)	$a \leq 2,5$	$2,5 < a \leq 5$	$a > 5$
Encanoamento (c)	$c \leq 4$	$4 < c \leq 6$	$6a > 6$
Encurvamento (e)	$e \leq 2,5$	$2,5 < e \leq 5$	$e > 5$
Torcimento (w)	$w \leq 2,5$	$2,5 < w \leq 5$	$w > 5$

Fonte: adaptado de Martins (1986) apud Santos (2002).

### 3.4.2. Rachaduras

Rachaduras foram quantificadas a cada pesagem, sendo monitoradas as rachaduras de face e canto.

As rachaduras de face e de canto foram quantificadas e classificadas em função do comprimento da rachadura (R), conforme apresentado no Quadro 3, sendo considerada a soma das maiores rachaduras e o comprimento total das rachaduras de superfície nos extremos (rachaduras de topo).

Quadro 3 - Comprimento das rachaduras de face (R) em relação ao comprimento do corpo de prova e classificação do defeito.

Magnitude	Classificação
$R \leq 2,5\%$	Normal
$2,5\% < R \leq 5\%$	Médio
$R > 5\%$	Forte

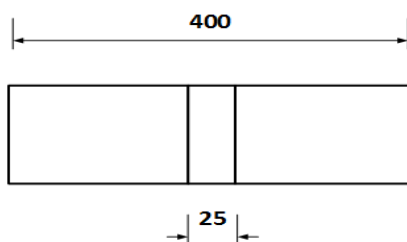
Fonte: adaptado de Martins (1986) apud Andrade (2000).

### 3.4.3. Tensões residuais

Foram determinadas conforme proposto por Rasmussen (1961). A posição na peça de madeira seca de onde foi cortada a amostra para classificação da tensão residual pode ser vista na Figura 19.



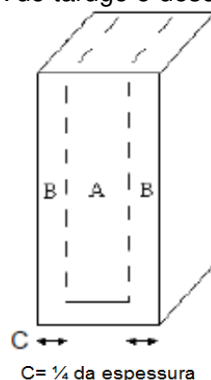
Figura 19 - Identificação do local e do comprimento da amostra do corpo de prova para confecção da peça a ser utilizada na classificação da tensão interna.



Fonte: Primária, 2018.

Após remoção, a amostragem de 2,5 cm de espessura foi cortada no formato em U, conforme é mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Tipo de corte realizado no tarugo de madeira para confecção da peça (B) a ser utilizada na classificação da tensão interna. A seção A do tarugo é descartada.

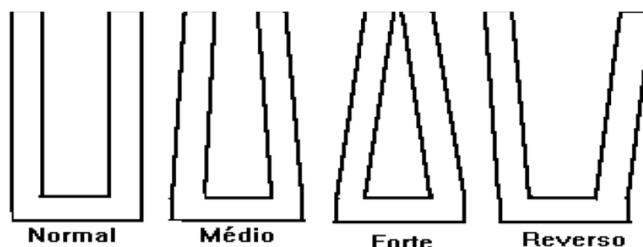


$C = \frac{1}{4}$  da espessura

Fonte: adaptado de Rasmussen (1961) e Ciniglio (1998) apud Andrade (2000).

Após corte, foi observado o posicionamento das duas abas do U e realizado a classificação das tensões de secagem de acordo com a Figura 21.

Figura 21 - Classificação das tensões de secagem em função da inclinação das laterais da amostra em forma de U.



Fonte: Adaptado de Pratt (1974) apud Ciniglio (1998), Andrade (2000) e Santos (2002).

### 3.5 Análise estatística

Os valores obtidos das velocidades máximas de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ) foram avaliados pelos planejamentos fatoriais completos permitindo a identificação e

quantificação do efeito de cada um dos fatores e de suas interações nos experimentos realizados. Para tanto, o software Statistica ® versão 12.0 (Statsoft Inc., USA) foi utilizado.

Os demais resultados foram submetidos à análise de variância dos valores médios dos corpos de prova, através do Teste Tukey com nível de significância de 5%.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Teor de umidade inicial dos corpos de prova submetidos à secagem

Os valores médios de área superficial de secagem, massa seca e de massa úmida ou massa verde de cada um dos corpos de provas no início dos ensaios de secagem ( $MV_0$ ), juntamente com os respectivos valores dos teores de umidade inicial ( $U_0\%$ ) calculados a partir da Equação 1, são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores médios de área superficial de secagem (A), massa seca (MS), massa úmida inicial (MV0) e teor de umidade inicial (U0%) dos corpos de provas de Pinus taeda com corte tangencial (T) e radial (R) submetidos aos ensaios de secagem com diferentes temperaturas (40, 60 e 80 °C) e diferentes velocidades de ar forçado (0, 0,6, 1,2 m/s).

Ensaio	A (cm <sup>2</sup> )	MS (g)	MV <sub>0</sub> (g)	U <sub>0</sub> % *
T40-0	911 ± 20	348 ± 44	945 ± 70	174 ± 31 <sup>a</sup>
R40-0	896 ± 34	296 ± 39	904 ± 44	209 ± 39 <sup>a</sup>
T40-0,6	911 ± 23	324 ± 40	961 ± 65	200 ± 33 <sup>a</sup>
R40-0,6	919 ± 45	308 ± 39	952 ± 79	211 ± 28 <sup>a</sup>
T40-1,2	902 ± 29	314 ± 36	901 ± 59	191 ± 38 <sup>a</sup>
R40-1,2	890 ± 39	295 ± 29	906 ± 77	209 ± 30 <sup>a</sup>
T60-0	901 ± 32	319 ± 42	923 ± 67	193 ± 32 <sup>a</sup>
R60-0	886 ± 37	302 ± 25	903 ± 58	200 ± 17 <sup>a</sup>
T60-0,6	914 ± 20	323 ± 44	960 ± 52	200 ± 33 <sup>a</sup>
R60-0,6	901 ± 25	309 ± 25	925 ± 42	201 ± 26 <sup>a</sup>
T60-1,2	882 ± 28	302 ± 40	881 ± 48	196 ± 42 <sup>a</sup>
R60-1,2	868 ± 24	304 ± 18	873 ± 43	187 ± 08 <sup>a</sup>
T80-0	897 ± 25	294 ± 30	923 ± 67	215 ± 15 <sup>a</sup>
R80-0	910 ± 29	312 ± 17	923 ± 59	196 ± 17 <sup>a</sup>
T80-0,6	898 ± 17	320 ± 53	924 ± 52	196 ± 47 <sup>a</sup>
R80-0,6	890 ± 35	296 ± 34	901 ± 45	207 ± 27 <sup>a</sup>
T80-1,2	895 ± 24	291 ± 47	893 ± 96	212 ± 43 <sup>a</sup>
R80-1,2	922 ± 27	315 ± 28	931 ± 40	196 ± 20 <sup>a</sup>

\* Letras iguais indicam médias sem diferenças significativas pelo teste de Tukey com 95% de confiança.

Não houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os valores médios de  $U_0\%$  dos corpos de provas utilizados nos 18 ensaios de secagem. Consequentemente,  $U_0\%$  não foi uma das variáveis de processo capaz de influenciar nos diferentes comportamentos observados durante o processo de secagem. Isto permitiu analisar as diferentes respostas de velocidades de secagem e de geração de defeitos na peça seca frente, apenas, às variáveis de processo planejadas: T,  $u_\infty$  e tipo de corte da madeira.

A média global do teor de umidade inicial considerando todos os 162 corpos de prova dos 18 ensaios de secagem, ou seja, desconsiderando as diferenças estatísticas observadas na Tabela 4, foi de  $199,7 \pm 31,0\%$ .

#### 4.2 Cinética de secagem da madeira de *Pinus taeda*

O comportamento da variação do teor de umidade em base seca ( $U\%$ ) em função do tempo de secagem ( $t$ ) de cada um dos nove corpos de provas, em cada um dos dezoito ensaios de secagem realizados, podem ser observados no Apêndice A.

Cada uma das curvas cinéticas foram construídas em função da variação do teor de umidade em função do tempo de secagem de cada um dos nove corpos de provas utilizados em cada um dos ensaios; até  $U\% \leq 10\%$ . Neste instante,  $U\%$  foi considerado como valor final ( $U_f\%$ ) e o tempo correspondente, como  $t_f$ . Os valores médios de  $t_f$  de cada um dos 18 ensaios bem como os de  $U_f\%$  são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores médios do tempo final de secagem ( $t_f$ ) e teor de umidade final  $U_f\%$  obtidos nos ensaios de secagem da madeira *Pinus taeda*.

<b>Ensaio</b>	<b><math>t_f</math> (h)</b>	<b><math>U_f\%</math> (%)</b>
T40-0	266,7±43,0	8 ± 2
R40-0	270,0±26,9	8 ± 2
T40-0,6	142,3±23,6	8 ± 2
R40-0,6	181,3±30,5	7 ± 2
T40-1,2	126,5±26,5	9 ± 2
R40-1,2	134,7±17,8	8 ± 1
T60-0	88,8±12,7	8 ± 2
R60-0	97,6±13,2	7 ± 2
T60-0,6	58,0±10,0	5 ± 3
R60-0,6	65,8±8,8	6 ± 3
T60-1,2	45,3±10,6	5 ± 3
R60-1,2	49,3±9,2	8 ± 2
T80-0	50,0±3,9	7 ± 3
R80-0	50,6±4,2	6 ± 3
T80-0,6	29,7±7,5	5 ± 3
R80-0,6	33,9±8,2	6 ± 2
T80-1,2	29,9±8,5	8 ± 2
R80-1,2	30,8±8,5	7 ± 2

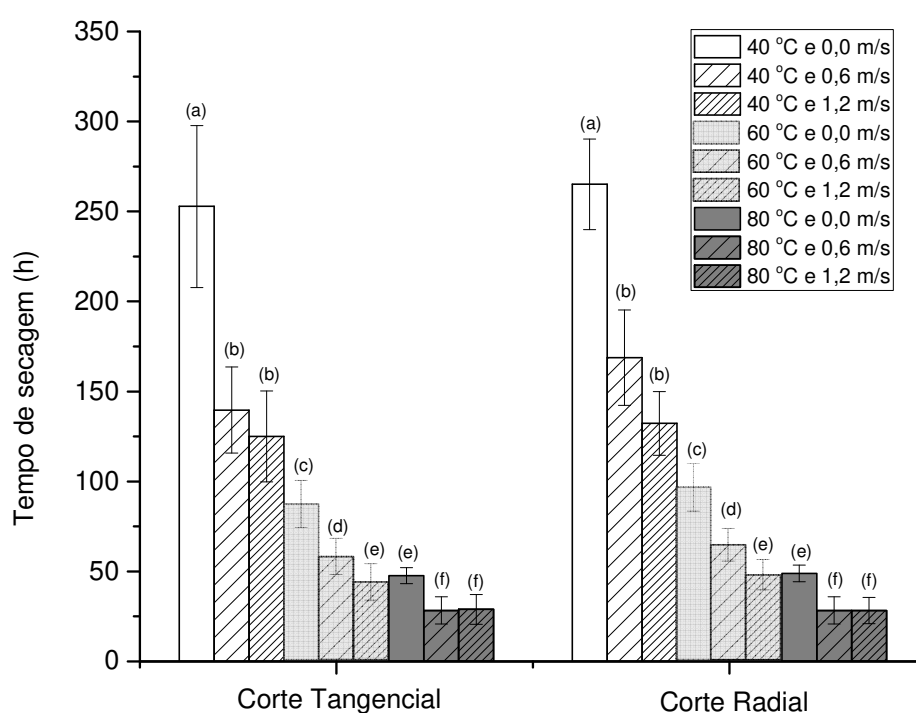
Em todos os dezoito ensaios de secagem realizados, os valores médios de  $U_f\%$  ficaram abaixo de 10%, valor máximo do teor de umidade desejado na madeira após secagem.

Em relação ao tempo final de processo, observa-se, de um modo geral, que quanto maior a temperatura de secagem, menor foi o seu valor médio para atingir  $U_f\%$ . Este comportamento na secagem de madeiras é corroborado por Klitzke (2002), o qual demonstrou que quanto mais alto essa variável operacional, menor foi o teor de umidade de equilíbrio do material.

Comportamento semelhante pode ser visto em relação à velocidade forçada de ar. Em cada conjunto de ensaios na mesma temperatura e para o mesmo tipo de corte, é possível observar que quanto maior  $u_{\infty}$ , menor foi  $t_f$  necessário para atingir  $U_f\%$ .

A análise estatística dos valores de  $t_f$  obtidos para cada um dos 9 corpos de provas utilizados em cada um dos ensaios de secagem, pode ser vista na Figura 30.

Figura 22 - Valores médios dos tempos final de secagem de *Pinus taeda* para o corte da madeira tangencial e radial, a 40, 60 e 80 °C com 0,0, 0,6 e 1,2 m/s de circulação de ar. As barras indicam a média  $\pm$  desvio padrão. Letras iguais significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com 95% de confiança

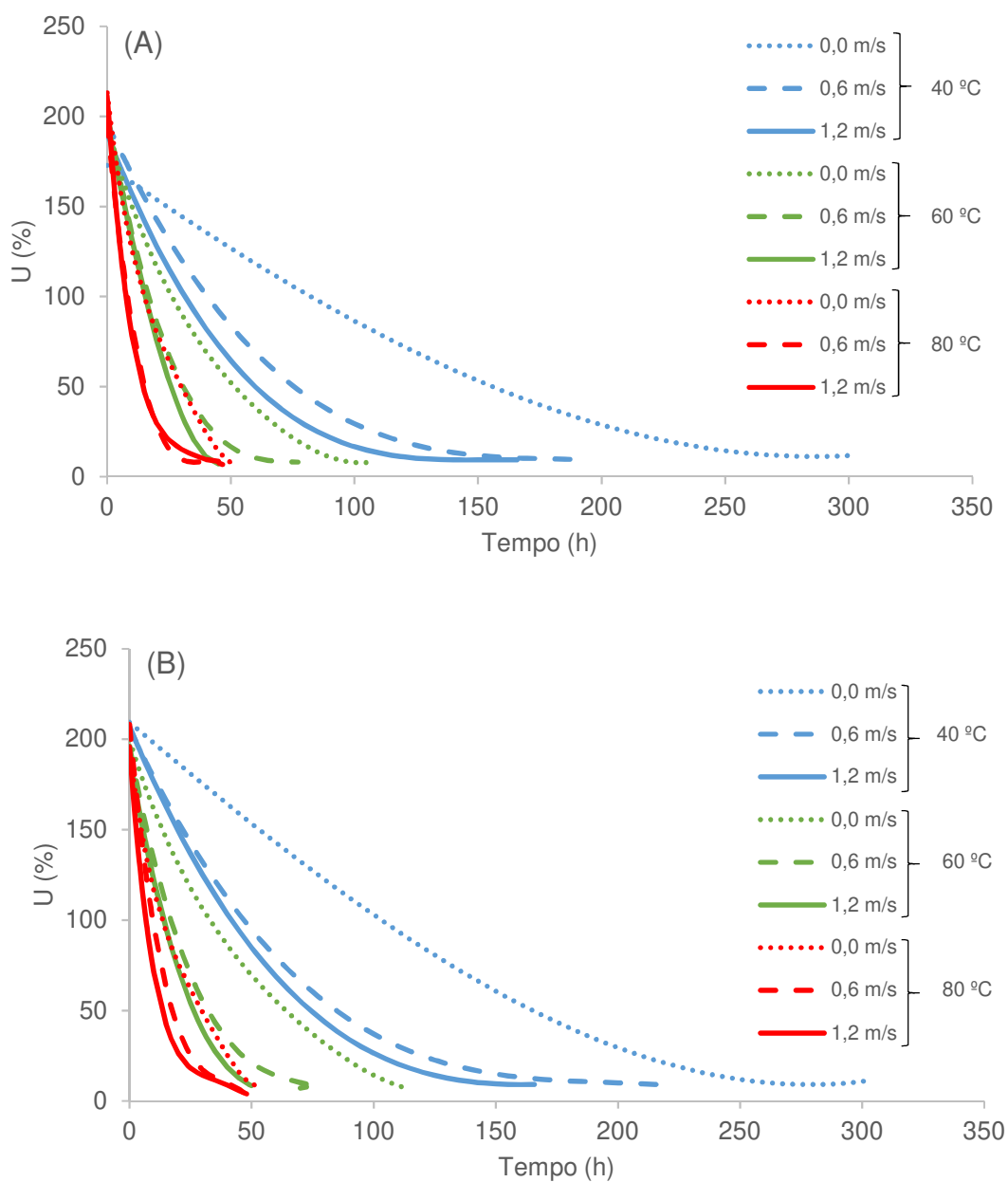


Na Figura 22 é possível observar que não houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os ensaios conduzidos na mesma temperatura e mesma velocidade do ar para os dois tipos de corte de madeira. O mesmo ocorreu para as condições de 60 °C e 1,2 m/s em comparação às condições de 80 °C sem de circulação de ar e entre as condições mais drásticas de secagem em uma mesma temperatura (60 °C com 0,6 e 1,2 m/s; 80 °C com 0,6 e 1,2 m/s).

Para simplificar a análise de todos esses resultados frente aos diferentes comportamentos cinéticos mostrados nas curvas cinéticas do Apêndice A, fez-se um ajuste polinomial de terceira ou quarta ordem para cada conjunto de pontos experimentais e traçou-se uma curva média da variação de  $U\%$  em função de  $t$  para

cada um dos 18 ensaios conforme pode ser visto no Apêndice B. Na Figura 23 estão apresentadas essas curvas médias ajustadas relativas aos cortes da madeira no sentido tangencial (Figura 23A) e radial (Figura 23B).

Figura 23 - Curvas médias da cinética de secagem da madeira *Pinus taeda* ( $U\% \times h$ ) empregando o corte da madeira (A) tangencial e (B) radial nas temperaturas ( $T$ ) de 40, 60 e 80 °C com velocidade de circulação de ar ( $u_\infty$ ) de 0,0 (sem ventilação), 0,6 e 1,2 m/s.



Observa-se na Figura 23 uma similaridade de comportamento entre as curvas de secagem para as madeiras cortadas no sentido tangencial (Figura 23A) com

aquelas cortadas no sentido radial (Figura 23B) ao serem secas em uma mesma temperatura e com mesma velocidade de circulação do ar.

Considerando as propriedades físicas de teor de umidade inicial, porosidade, espessura e área superficial de secagem semelhantes entre todos os 162 corpos de prova submetidos à secagem, pode-se afirmar que quanto menor o tempo de secagem, maiores foram a taxa e o fluxo de secagem, denominadas neste trabalho como velocidades de secagem.

Como em todos os dezoito experimentos realizados, os valores médios de  $U_f\%$  ficaram abaixo de 10% foi possível avaliar as velocidades de secagem entre todas as faixas de umidades pretendidas (de  $U_0\%$  até  $U\% = 30\%$ ,  $U_0\%$  até  $U\% = 10\%$  e entre  $U\%$  de 30% a 10%), conforme descrito no item 3.3.2.

#### 4.2.1. Velocidades de secagem

Os diferentes valores das velocidades instantâneas de secagem ( $v$ ) ou fluxos instantâneos de secagem, calculados a partir da variação de umidade por unidade de tempo de cada um dos nove corpos de prova, secos nas diferentes condições operacionais do processo, podem ser vistos no Apêndice C.

Foi possível observar, a partir da análise visual da variação de  $v$  ao longo do tempo de secagem, que apenas nos casos em que a secagem foi realizada nas condições mais moderadas (40 °C e sem circulação forçada de ar, Ensaios T40-0 e R40-0), a evaporação da água ocorreu quase que de maneira constante durante todo o processo de secagem.

Nas demais condições operacionais (40 °C com  $u_\infty$  de 0,6 e 1,2 m/s; 60 e 80 °C, independentemente da variável  $u_\infty$ ) (Apêndice C), os perfis de  $v$  foram análogos aquele evidenciado por Jankowski, Santos e Andrade (2003), onde o fluxo de secagem decresceu com a redução do teor de umidade contido no material processado. Para os autores, quanto maiores as variáveis  $T$  e  $u_\infty$ , mais rápido é o decaimento em  $v$  em relação a  $U\%$ .

Os maiores valores de  $v$  foram encontrados no início da secagem, onde normalmente ocorre uma rápida evaporação da água livre próxima à superfície do material. Na condição  $T = 40$  °C e  $u_\infty = 0$ , o máximo valor de  $v$  (valor médio entre os nove corpos de provas) para ambos os tipos de corte de madeira foi de 0,004 g/cm<sup>2</sup>.h;

enquanto que nas condições mais drásticas ( $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $u_{\infty} = 1,2\text{ m/s}$ ) este valor foi 12,5 vezes maior.

Nas Figuras 24, 25 e 26 mostradas a seguir são apresentados os maiores valores médios de  $v$  obtidos nos diferentes ensaios, considerando os intervalos nos teores de umidade de  $U_0\%$  (madeira verde) até  $U\% = 30\%$ ,  $U_0\%$  até  $U\% = 10\%$  e  $U\%$  de 30% a 10%.

Figura 24 - Valores médios da velocidade instantânea de secagem da madeira *Pinus taeda* empregando o corte da madeira tangencial e radial, durante o período de secagem com variação do teor de umidade de  $U_0\%$  (madeira verde) até  $U\% = 30\%$ .

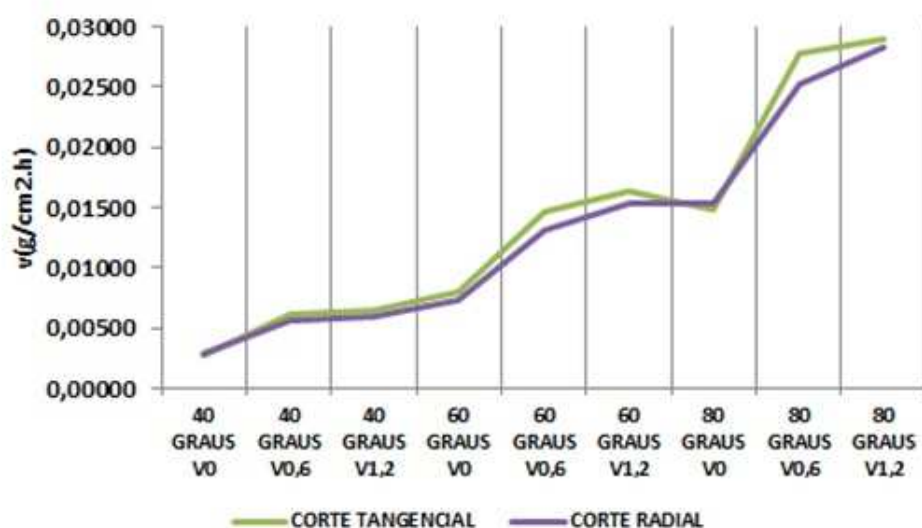


Figura 25 - Valores médios da velocidade instantânea de secagem da madeira *Pinus taeda* empregando o corte da madeira tangencial e radial, durante o período de secagem com variação do teor de umidade de  $U_0\%$  (madeira verde) até  $U\% = 10\%$ .

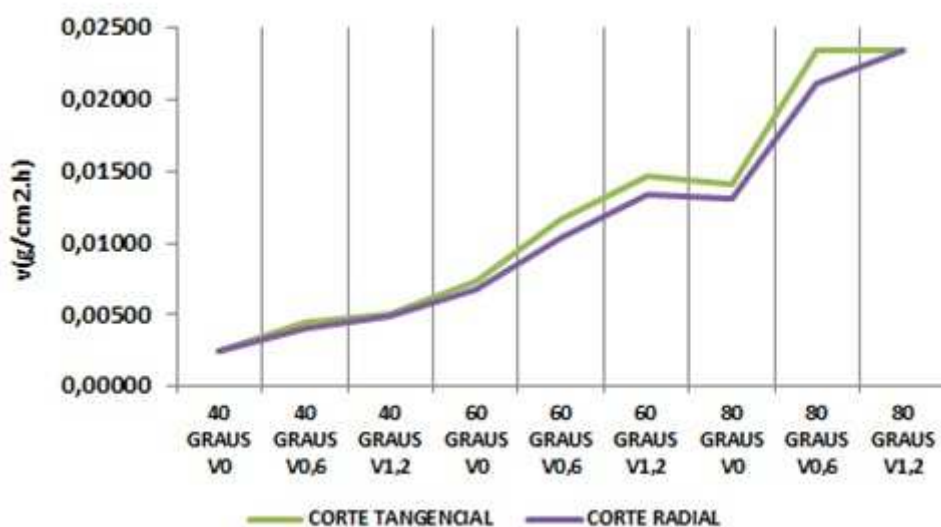
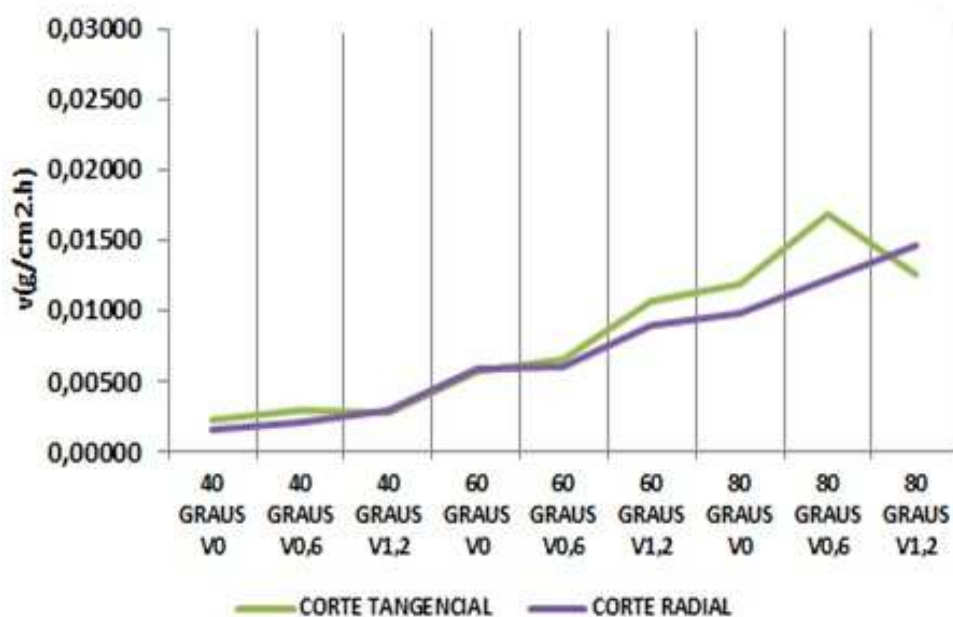




Figura 26 - Valores médios da velocidade instantânea de secagem ( $v$ ) da madeira *Pinus taeda* empregando o corte da madeira tangencial e radial, durante o período de secagem com variação do teor de umidade de U% 30 a 10%.



Verifica-se que em todos os períodos de variação de U% considerados nas Figuras 24, 25 e 26, os perfis de  $v$  dos corpos de provas cortados de forma tangencial e radial foram semelhantes nas condições de secagem mais brandas (40 °C com e sem circulação forçada de ar e 60 °C sem circulação forçada de ar). Nas condições mais drásticas (60 °C com circulação forçada de ar e 80 °C com e sem circulação forçada de ar) os valores de  $v$  médio para o corte tangencial são notadamente superiores aos do corte radial, principalmente na temperatura de 80 °C.

A maior velocidade de secagem em madeiras com corte tangencial em comparação ao corte radial foi evidenciada por Denig, Wengert e Simpson (2000). Segundo os autores, isto acontece porque grande parte do movimento natural de umidade na madeira plantada ocorre do núcleo da planta para a sua superfície na direção tangencial e não na radial.

No entanto, atenção especial deve ser dada ao fato de que as maiores diferenças nos perfis de  $v$  dos dois tipos de corte ocorreram durante o período de variação de U% a 10% (Figura 33). Para Keine (1997), é abaixo de 30% de umidade que encontra-se o ponto de saturação das fibras; e a partir do qual iniciam-se os fenômenos como retração e inchamento da madeira.

De acordo com Melo (2005), quando a umidade da madeira se encontra abaixo do ponto de saturação das fibras ocorre a variação dimensional, expansão ou contração do material. Dependendo da intensidade da movimentação da peça, que também varia com o diferencial de secagem ou umedecimento e com a espécie em questão, o produto produzido com esta madeira poderá apresentar defeitos extremamente graves, como empenamentos, rachaduras, além dos já mencionados retrações e dilatações.

A partir dos resultados expostos e discutidos até o momento, parece ser possível afirmar que o corte tangencial proporcionou maior velocidade de secagem da madeira *Pinus taeda* do que o corte radial. Porém, não é possível, ainda, garantir essa maior contribuição do corte tangencial sobre a velocidade de secagem. Além disto, é preciso, também, estabelecer quais as condições operacionais de secagem e o tipo de corte da madeira mais apropriados para obter-se o menor número de defeitos gerados na madeira seca, objetivo principal deste trabalho.

Para tanto, fez-se necessário a quantificação do efeito das variáveis  $T$ ,  $u_{\infty}$  e tipo de corte da madeira sobre as velocidades de secagem e sobre os principais tipos de defeitos gerados durante e após a secagem.

A fim de padronizar-se a etapa de análise do efeito dessas variáveis sobre a velocidade de secagem determinou-se, para cada um dos ensaios com os seus nove corpos de prova, a média da velocidade máxima de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ).

Conforme descrito no item 3.3.2,  $v_{m\acute{a}x}$  foi estimado a partir da cinética da variação de  $U\%$  em função de  $t$  e expresso na unidade  $U\%/h$  conforme exemplificado no Apêndice C para o caso do Ensaio T40-0. Neste caso, o valor de  $v_{m\acute{a}x}$  para cada um dos conjuntos de corpos de prova, mostrados na Tabela 6, não representou a média entre os maiores valores de velocidade instantânea e discutidos anteriormente, mas sim uma velocidade máxima e constante que retratou a maior parte do processo.

Tabela 6 - Valores médios de velocidades máximas de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$  e  $V_{m\acute{a}x}$ ) dos corpos de provas de *Pinus taeda* com corte tangencial (Tang) e radial (Rad) secados em diferentes temperaturas ( $T$ ) e velocidades de ar forçado ( $u_{\infty}$ ).

Identificação do ensaio	Tipo de corte	$T$ (°C)	$u_{\infty}$ (m/s)	$v_{m\acute{a}x}$ (U%/h)	$V_{m\acute{a}x}$ (g/cm <sup>2</sup> .h)
T40-0	Tang	40	0	0,90 ± 0,31	0,00344
R40-0	Rad	40	0	1,11 ± 0,33	0,00367
T40-0,6	Tang	40	0,6	2,79 ± 0,73	0,00992
R40-0,6	Rad	40	0,6	2,57 ± 1,00	0,00861
T40-1,2	Tang	40	1,2	2,95 ± 0,53	0,01027
R40-1,2	Rad	40	1,2	2,72 ± 0,77	0,00902
T60-0	Tang	60	0	3,68 ± 0,97	0,01303
R60-0	Rad	60	0	3,24 ± 1,11	0,01104
T60-0,6	Tang	60	0,6	6,16 ± 1,36	0,02177
R60-0,6	Rad	60	0,6	6,10 ± 1,38	0,02092
T60-1,2	Tang	60	1,2	6,31 ± 1,00	0,02161
R60-1,2	Rad	60	1,2	6,26 ± 1,00	0,02192
T80-0	Tang	60	0	8,69 ± 2,04	0,02848
R80-0	Rad	60	0	8,15 ± 2,60	0,02794
T80-0,6	Tang	60	0,6	12,04 ± 4,25	0,04290
R80-0,6	Rad	60	0,6	11,67 ± 2,62	0,03881
T80-1,2	Tang	60	1,2	15,82 ± 2,77	0,05144
R80-1,2	Rad	60	1,2	15,09 ± 4,89	0,05155

Na Tabela 6 são mostrados, também, os valores médios de  $V_{m\acute{a}x}$  que exprimem a variação de massa de água evaporada por unidade de área da superfície do corpo de prova em contato com o ar de secagem e por unidade de tempo, ou seja, os fluxos de secagem expressos na unidade g/cm<sup>2</sup>.h.

Conforme já observado anteriormente em relação ao menor tempo de secagem, ficou evidenciado na Tabela 6 que, de modo geral, quanto mais drásticas as condições operacionais de secagem ( $T$  e  $u_{\infty}$ ) maiores as velocidades de secagem, tanto em termos de taxa quanto de fluxo. O efeito dessas duas variáveis, bem como do tipo de corte da madeira, sobre a taxa de secagem  $v_{m\acute{a}x}$  foram quantificadas e apresentadas a seguir.

#### 4.3 Influência da temperatura de secagem, velocidade forçada de ar e do tipo de corte da madeira sobre a taxa máxima de secagem

Na Tabela 7, estão apresentados, para o primeiro conjunto de ensaios de secagem analisados, os efeitos das variáveis temperatura de secagem (40 e 60 °C), velocidade do ar (0,0 e 0,6 m/s) e tipo de corte (tangencial e radial) sobre a velocidade máxima de secagem (U%/h).

Tabela 7 - Efeitos principais e suas interações sobre a velocidade máxima de secagem obtidos no planejamento fatorial  $2^3$  variando-se a temperatura de secagem (40 e 60 °C), velocidade forçada de ar (0,0 e 0,6 m/s) e tipo de corte da madeira (tangencial e radial) *Pinus taeda*.

Variáveis	Níveis	
	-	+
Temperatura (°C)	40	60
Velocidade do ar (m/s)	0,0	0,6
Tipo de corte	T	R

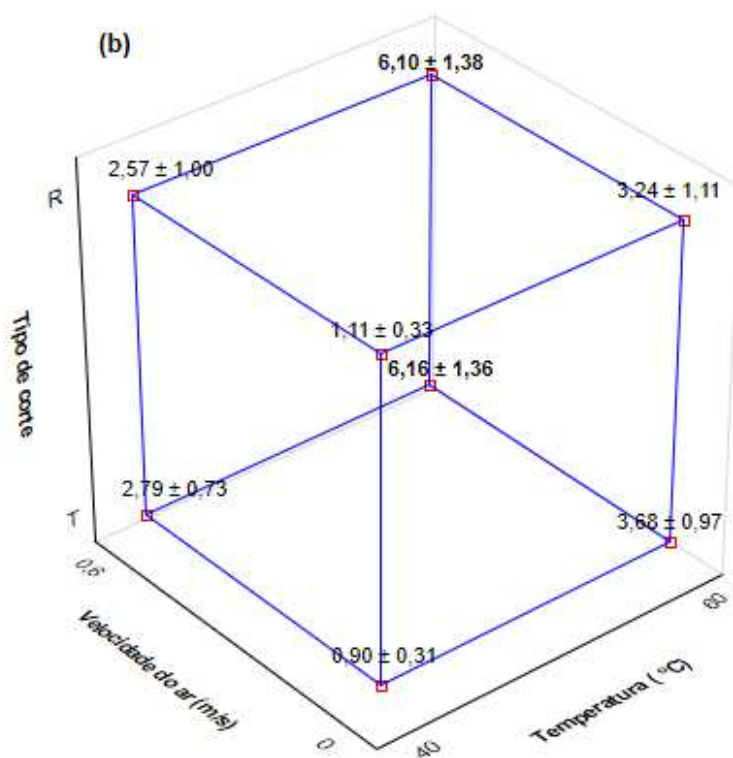
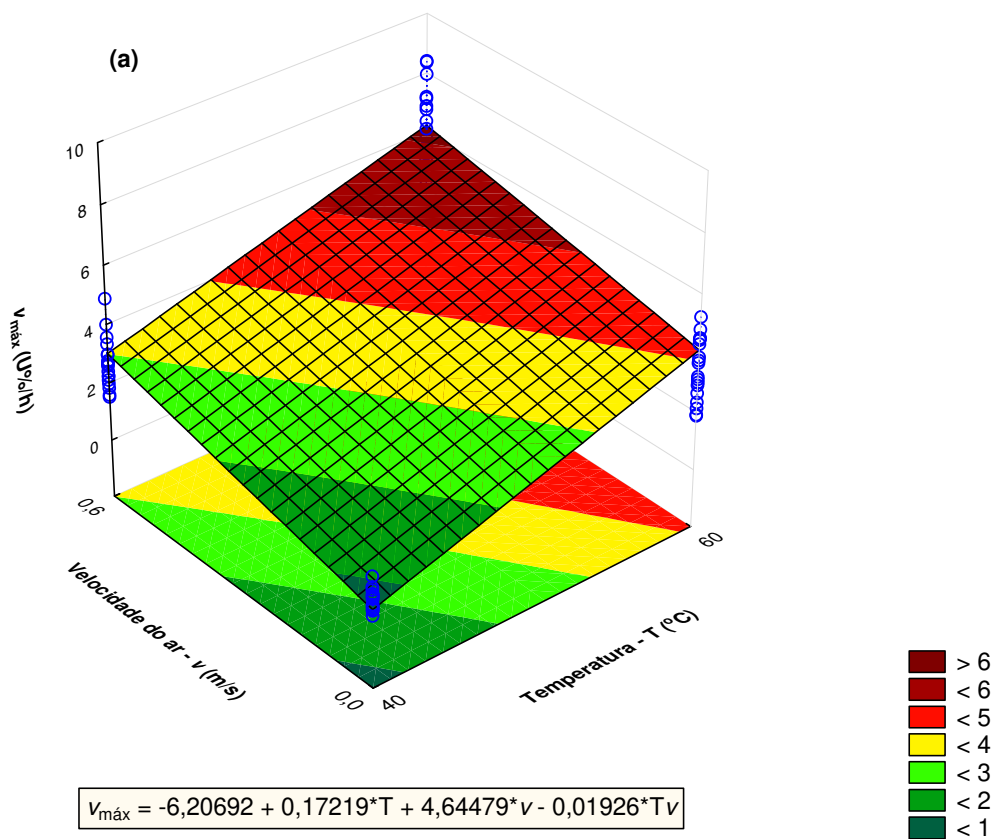
Variáveis	Efeitos sobre $v_{m\acute{a}x}$ (U%/h) $\pm$ erro padr\~ao	p
Temperatura (1)	<b>2,95 <math>\pm</math> 0,23*</b>	<b>0,000</b>
Velocidade do ar (2)	<b>2,17 <math>\pm</math> 0,23*</b>	<b>0,000</b>
Tipo de corte (3)	-0,13 $\pm$ 0,23	0,588
Intera\~ao (1) e (2)	<b>0,50 <math>\pm</math> 0,23*</b>	<b>0,035</b>
Intera\~ao (1) e (3)	-0,12 $\pm$ 0,23	0,592
Intera\~ao (2) e (3)	-0,01 $\pm$ 0,23	0,956
Intera\~ao (1), (2) e (3)	0,20 $\pm$ 0,23	0,379
R <sup>2</sup>	0,8006	

\* Efeitos estatisticamente significativos com 95% de n\~ivel de confian\~ca ( $p < 0,05$ ).

Observa-se ainda, na Tabela 7, que tanto a temperatura quanto a velocidade do ar no n\~ivel superior influenciaram significativamente a  $v_{m\acute{a}x}$ , aumentando-a em at\~e 2,95 U%/h quando a temperatura de 60 °C foi utilizada na secagem e em 2,17 U%/h quando a velocidade do ar foi de 0,6 m/s.

O tipo de corte n\~ao influenciou a velocidade m\~axima de secagem nem isoladamente e nem nas intera\~oes com as demais vari\~aveis, ou seja, o mesmo comportamento acontece para a madeira cortada tangencial ou radialmente. Ainda, verifica-se que dentre as intera\~oes das vari\~aveis, a \~unica com efeito significativo foi a intera\~ao entre temperatura (T) e velocidade do ar ( $v$ ). Esta intera\~ao \~e facilmente observada na Figura 27.

Figura 27 - (a) Efeito da temperatura ( $T$ : 40 e 60 °C) e da velocidade do ar ( $u_{\infty}$ : 0,0 e 0,6 m/s) sobre a taxa ou velocidade máxima de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ) de *Pinus taeda* e (b) efeito das três variáveis conjuntamente. Na equação apresentada, a variável  $v$  representa a velocidade do ar  $u_{\infty}$ .



Observa-se na Figura 27a que valores mais elevados de  $v_{\text{máx}}$  são alcançados com temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,6 m/s e na Figura 27b que os valores mais elevados de  $v_{\text{máx}}$ , destacados em negrito, não diferem estatisticamente quanto ao tipo de corte, pois 6,10 é estatisticamente igual a 6,16 m/s.

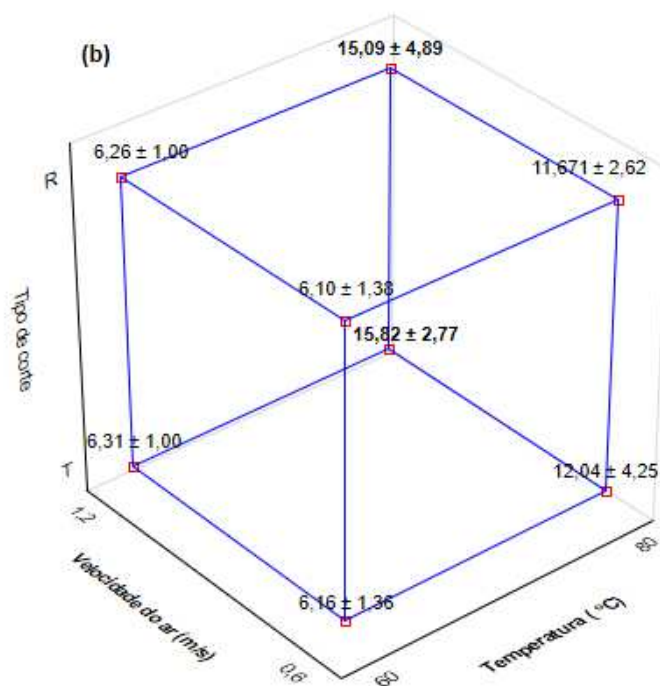
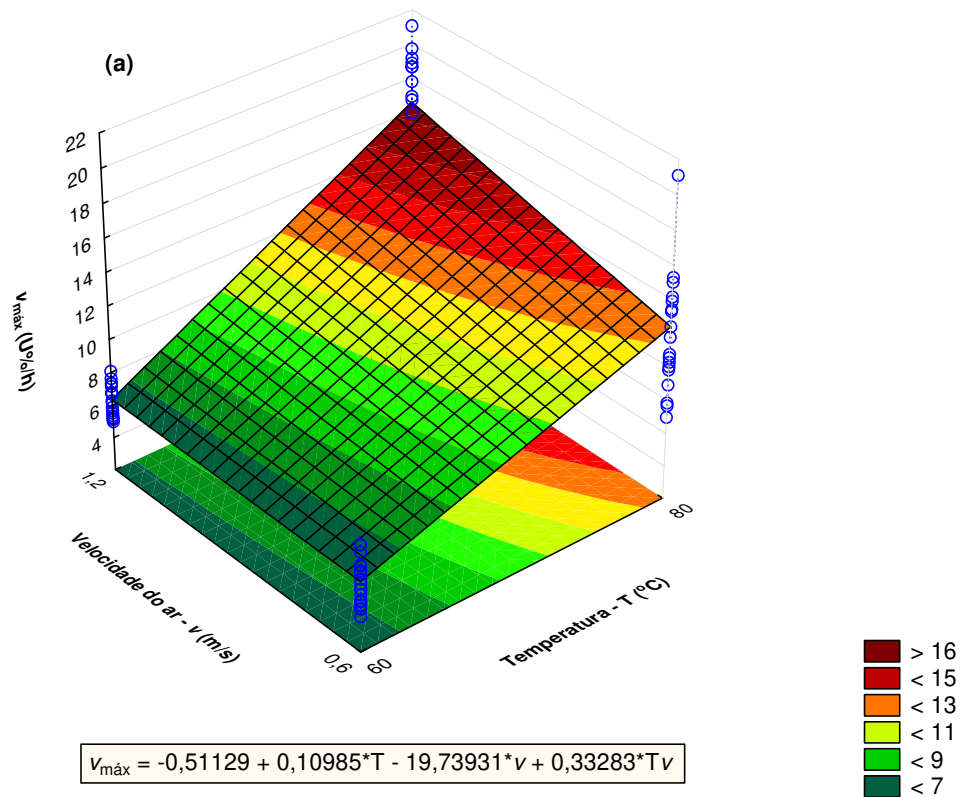
Com base nos resultados deste planejamento, onde as variáveis no nível superior, temperatura de 60 °C e velocidade do ar de 0,6 m/s levam a maiores valores de  $v_{\text{máx}}$ , foi realizado um outro planejamento  $2^3$  variando-se a temperatura de secagem em 60 e 80 °C, velocidade do ar em 0,6 e 1,2 m/s e tipo de corte (tangencial e radial) sobre a velocidade máxima de secagem (%U/h), cujos resultados estão apresentados na Tabela 8 e na Figura 28.

Tabela 8 - Planejamento fatorial  $2^3$  variando-se a temperatura de secagem (60 e 80 °C), a velocidade do ar (0,6 e 1,2 m/s) e o tipo de corte da madeira (tangencial - T e radial - R) e os efeitos principais e suas interações sobre a velocidade máxima de secagem.

Variáveis	Níveis	
	-	+
Temperatura (°C)	60	80
Velocidade do ar (m/s)	0,6	1,2
Tipo de corte	T	R
Variáveis	Efeitos sobre $v_{\text{máx}}$ (U%/h) $\pm$ erro padrão	p
Temperatura (1)	<b>7,45 <math>\pm</math> 0,66*</b>	<b>0,000</b>
Velocidade do ar (2)	<b>1,88 <math>\pm</math> 0,66*</b>	<b>0,000</b>
Tipo de corte (3)	-0,30 $\pm$ 0,66	0,650
Interação (1) e (2)	<b>1,72 <math>\pm</math> 0,66*</b>	<b>0,011</b>
Interação (1) e (3)	-0,25 $\pm$ 0,66	0,709
Interação (2) e (3)	-0,08 $\pm$ 0,66	0,896
Interação (1), (2) e (3)	-0,09 $\pm$ 0,66	0,890
R <sup>2</sup>	0,6918	

\* Efeitos estatisticamente significativos com 95% de nível de confiança ( $p < 0,05$ ).

Figura 28 - (a) Efeito da temperatura ( $T$ : 60 e 80 °C) e da velocidade do ar ( $u_{\infty}$ : 0,6 e 1,2 m/s) sobre a taxa ou velocidade máxima de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ) de *Pinus taeda* e (b) efeito das três variáveis conjuntamente. Na equação apresentada, a variável  $v$  representa a velocidade do ar  $u_{\infty}$ .



Observando-se os resultados na Tabela 8, da mesma forma que no planejamento anterior, verifica-se que tanto a temperatura quanto a velocidade do ar no nível superior influenciaram significativamente  $v_{m\acute{a}x}$ . Neste caso a temperatura de secagem foi mais significativa que a velocidade do ar, aumentando  $v_{m\acute{a}x}$  em até 7,45 U%/h quando a temperatura de 80 °C é utilizada na secagem. O tipo de corte não influenciou a velocidade máxima de secagem, ou seja, o mesmo comportamento do planejamento anterior. E novamente a única interação com efeito significativo foi a interação entre temperatura ( $T$ ) e velocidade do ar ( $u_{\infty}$ ) mostrada na Figura 28.

Observa-se na Figura 28a que valores mais elevados de  $v_{m\acute{a}x}$  são alcançados com temperatura de 80 °C e velocidade do ar de 1,2 m/s e na Figura 28b que os valores mais elevados de  $v_{m\acute{a}x}$ , destacados em negrito, não diferem estatisticamente quanto ao tipo de corte.

Nas Figuras 27a e 28a estão apresentados os modelos matemáticos para cada planejamento, onde somente  $T$  e  $u_{\infty}$ , isoladamente, e a interação  $Tu_{\infty}$ , foram significativos e aparecem nos modelos.

Com relação a Umidade Relativa (UR%), em todos os ensaios realizados os valores foram semelhantes, sendo que o maior valor de UR% e mais frequente (10 dos 18 ensaios) foi de 90% no início do processo. O menor valor de UR% foi de 13%, que ocorreu no final da secagem de apenas um dos ensaios; e o mais frequente foi de 18% (4 dos 18 ensaios). Os valores médios de UR%, considerando todos os ensaios foram de  $86,6 \pm 7,0\%$  no início da secagem e de  $20,8 \pm 6,1\%$ .

Na Tabela 9, os valores calculados pelos modelos são comparados com os valores médios experimentais com objetivo de validar os referidos modelos.



Tabela 9 – Valores de  $v_{\text{máx}}$  obtidos experimentalmente e valores de  $v_{\text{máx}}$  obtidos pelo modelo do planejamento experimental (1) com temperatura de secagem de 40 e 60 °C, velocidade do ar de 0,0 e 0,6 m/s e do planejamento experimental (2) com temperatura de secagem de 60 e 80 °C, a velocidade do ar de 0,6 e 1,2 m/s

T (°C)	$u_{\infty}$ (m/s)	Tipo de corte (Tangencial ou Radial)	$v_{\text{máx}}$ (U%/h) experimental	$v_{\text{máx}}$ (%U/h) modelo (1)*	dv (%)	$v_{\text{máx}}$ (U%/h) modelo (2)**	dv (%)
40	0,0	Tang	0,90 ± 0,31	0,68	-24,4	3,88	333
40	0,0	Rad	1,11 ± 0,33	0,68	-38,7	3,88	249
40	0,6	Tang	2,79 ± 0,73	3,00	7,5	0,03	-103
40	0,6	Rad	2,57 ± 1,00	3,00	16,7	0,03	-98,8
40	1,2	Tang	2,95 ± 0,53	5,33	80,7	-3,82	-229
40	1,2	Rad	2,72 ± 0,77	5,33	95,9	-3,82	-240
60	0,0	Tang	3,68 ± 0,97	4,12	11,9	8,08	119
60	0,0	Rad	3,24 ± 1,11	4,12	27,2	6,08	87,6
60	0,6	Tang	<b>6,16 ± 1,36</b>	<b>6,22</b>	<b>0,97</b>	<b>6,22</b>	<b>0,97</b>
60	0,6	Rad	<b>6,10 ± 1,38</b>	<b>6,22</b>	<b>1,97</b>	<b>6,22</b>	<b>1,97</b>
60	1,2	Tang	<b>6,31 ± 1,00</b>	8,31	31,7	<b>6,36</b>	<b>0,79</b>
60	1,2	Rad	<b>6,26 ± 1,00</b>	8,31	21,2	<b>6,36</b>	<b>1,59</b>
80	0,0	Tang	<b>8,69 ± 2,04</b>	7,57	-12,9	<b>8,28</b>	<b>-4,7</b>
80	0,0	Rad	<b>8,15 ± 2,60</b>	7,57	-7,1	<b>8,28</b>	<b>1,59</b>
80	0,6	Tang	12,04 ± 4,25	9,43	-21,7	12,41	3,1
80	0,6	Rad	11,67 ± 2,62	9,43	-19,2	12,41	6,3
80	1,2	Tang	15,82 ± 2,77	11,29	-28,6	16,54	4,6
80	1,2	Rad	15,09 ± 4,89	11,29	-25,2	16,54	9,6

(1)\*  $v_{\text{máx}} = -6,20692 + 0,17219 \cdot T + 4,64479 \cdot v - 0,01926 \cdot T \cdot v$   $R^2 = 0,8006$

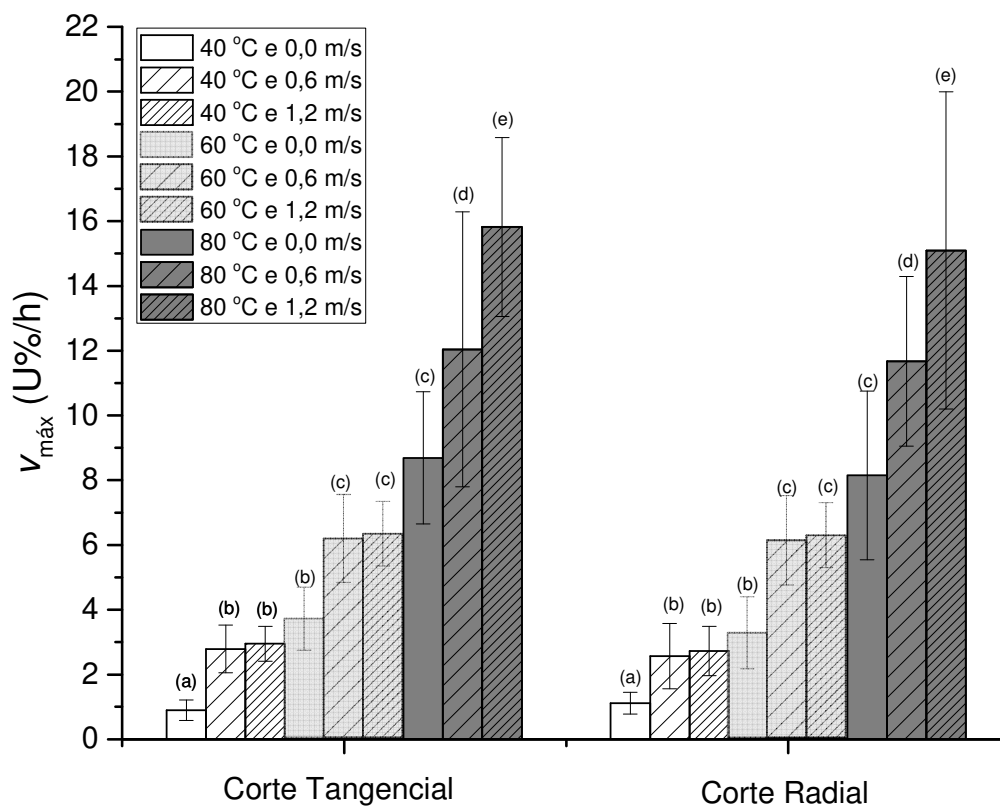
(2)\*\*  $v_{\text{máx}} = -0,51129 + 0,10985 \cdot T - 19,73931 \cdot v + 0,33283 \cdot T \cdot v$   $R^2 = 0,6918$

Pelos valores apresentados na Tabela 9, observa-se que os modelos (1) e (2) convergiram quando as variáveis foram 60 °C e 0,6 m/s (6,22 U%/h), chegando a valores muito próximos dos encontrados experimentalmente, 6,16 e 6,10 %U/h, para corte tangencial e radial, respectivamente. O modelo (2), por sua vez, aproxima-se, também, dos valores experimentais quando 60 °C e 1,2 m/s e 80 °C e 0,0 m/s são testados. Para os demais experimentos, tanto o modelo (1) quanto o modelo (2), não apresentaram boa conversão. Isto, provavelmente, se deve ao fato de eles terem obtido um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) abaixo de 0,9.

Conforme apresentado anteriormente, o perfil de secagem com 80 °C e velocidade do ar de 0,0 m/s é muito similar aos perfis de secagem com 60 °C e 0,6 ou 60 °C e 1,2 m/s, ou seja, corroboram com os resultados obtidos na comparação dos modelos (Tabela 9).

Quando se comparam os valores médios das velocidades máximas de secagem ( $v_{\text{máx}}$ ) de cada condição testada (Figura 29), observa-se que, também, não há diferença estatisticamente significativa entre as condições de 80 °C e 0,0 m/s, 60 °C e 0,6 e 60 °C e 1,2 m/s.

Figura 29 - Valores médios das velocidades máximas de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ : U%/h) de *Pinus taeda* para o corte da madeira tangencial e radial, a 40, 60 e 80 °C com 0,0, 0,6 e 1,2 m/s de circulação de ar. As barras indicam a média  $\pm$  desvio padrão. Letras iguais significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com 95% de confiança.



No entanto, pela análise dos planejamentos experimentais, as velocidades máximas de secagem ( $v_{m\acute{a}x}$ ) foram obtidas quando 80 °C e velocidade do ar de 1,2 m/s foram utilizadas. Esta condição leva aos menores tempos de secagem ( $t_f \approx 28$  h) como já mostrados na Tabela 5, sem diferença significativa para a condição de 80 °C e 0,6 m/s de circulação de ar.

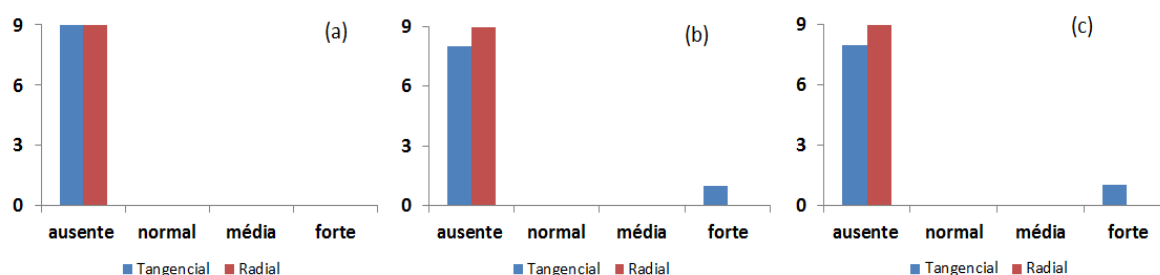
Para se definir então, qual a melhor condição de secagem a ser utilizada para *Pinus taeda*, além dos valores de taxas e fluxo de secagem, fez-se necessário observar, também, em cada caso, os principais defeitos gerados na madeira pelo processo de secagem.

#### 4.4 Defeitos de secagem

Os defeitos de secagem observados nos corpos de provas submetidos à secagem foram os de rachaduras de face, empenamentos (arqueamento, encurvamento, encanoamento e torcimento) e tensão interna.

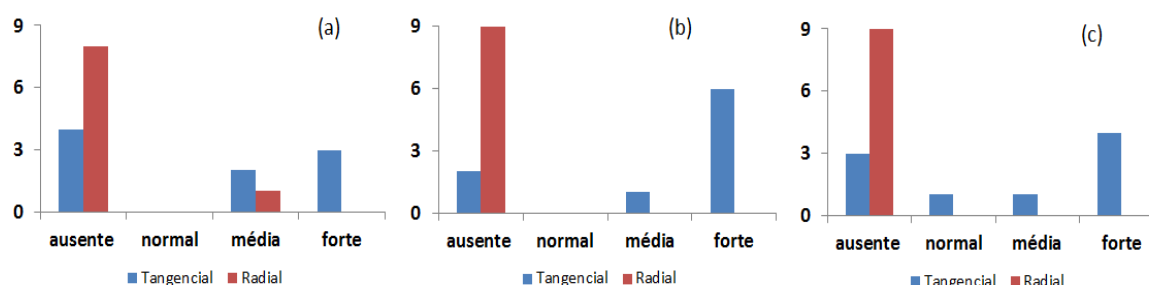
As quantidades de defeitos de rachaduras de face gerados na madeira com corte tangencial e radial em cada uma das temperaturas avaliadas (40, 60 e 80 °C), com diferentes velocidades de ar forçado, são mostradas nas Figuras 30, 31 e 32, respectivamente.

Figura 30 - Incidência de rachaduras de face na secagem de madeira de Pinus taeda a 40°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de: (a) 0 (sem circulação forçada de ar), (b) 0,6 m/s e (c) 1,2 m/s. O número 9 representa o número de corpos de prova utilizado em cada ensaio



No ensaio a 40 °C sem velocidade de circulação do ar durante a secagem, não foi observado trincas superficiais em nenhum corpo de prova (Figuras 30a). Nos ensaios com velocidade de circulação do ar de 0,6 e 1,2 m/s, foi constatado um corpo de prova de corte tangencial com rachaduras superficiais classificadas como de incidência forte (Figuras 30b e c). Nenhum corpo de prova de corte radial apresentou rachaduras superficiais.

Figura 31 - Incidência de rachaduras de face na secagem de madeira de Pinus taeda a 60°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de: (a)  $u^\infty = 0$  (sem circulação forçada de ar), (b)  $u^\infty = 0,6$  m/s e (c)  $u^\infty = 1,2$  m/s. O número 9 representa o número de corpos de prova utilizado em cada ensaio.

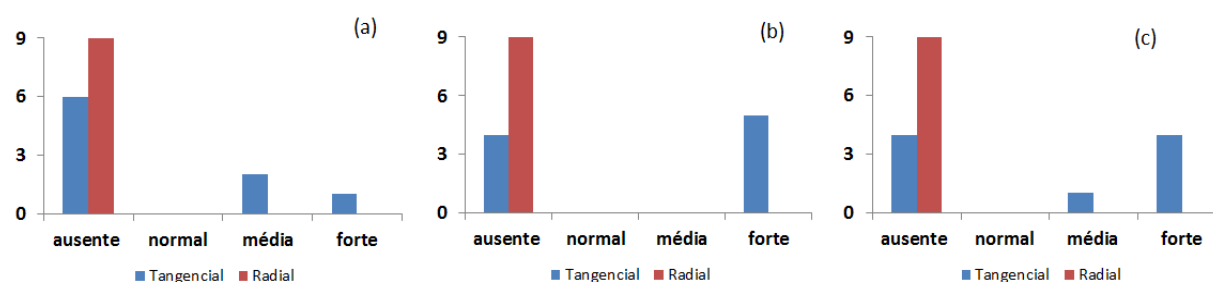


No ensaio a 60 °C sem velocidade de circulação do ar durante a secagem (Figura 31a) foram observados dois corpos de prova de corte tangencial com trincas superficiais de classe média e três corpos de prova com trincas superficiais

classificadas como forte. Foi observado o surgimento de trincas superficiais de classe média em apenas um corpo de prova com corte radial. No ensaio com velocidade de circulação do ar de 0,6 m/s (Figura 31b), foi constatada um corpo de prova de corte tangencial com trinca de classe média e seis corpos de prova classificados como forte.

No ensaio com velocidade de circulação do ar de 1,2 m/s (Figura 31c), foi constatada um corpo de prova de corte tangencial com trinca de classe normal, um corpo de prova com trinca de classificação média e quatro corpos de prova apresentaram trincas de classificação forte. Não foram encontrados corpos de prova de corte radial apresentando trincas superficiais nos ensaios a 60 °C com velocidade de circulação do ar de 0,6 e 1,2 m/s.

Figura 32 - Incidência de rachaduras de face na secagem de madeira de *Pinus taeda* a 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de: (a)  $u_{\infty} = 0$  (sem circulação forçada de ar), (b)  $u_{\infty} = 0,6$  m/s e (c)  $u_{\infty} = 1,2$  m/s. O número 9 representa o número de corpos de prova utilizado em cada ensaio.

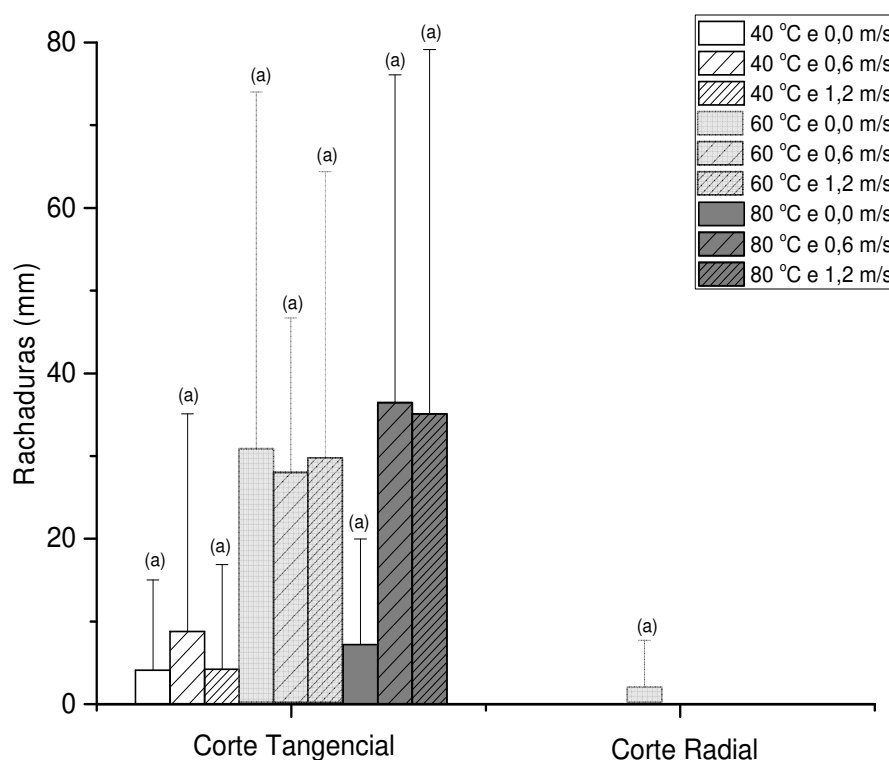


Com relação à secagem a 80 °C sem velocidade de circulação do ar durante a secagem (Figura 32a) foram observados dois corpos de prova de corte tangencial com trincas superficiais de classe média e um corpo de prova com trinca superficial classificada como forte. No ensaio com velocidade de circulação do ar de 0,6 m/s (Figura 32b) foram constatados cinco corpos de prova de corte tangencial com trincas classificadas como forte. No ensaio com velocidade de circulação do ar de 1,2 m/s (Figura 32c) foi constatada um corpo de prova de corte tangencial com trinca de classe média e quatro corpos de prova apresentaram trincas de classificação forte. Não houve constatação de corpos de prova de corte radial apresentando trincas superficiais em nenhum ensaio a 80°C.

A análise dos dados das Figuras 30 a 32 parece demonstrar que maiores quantidades de rachaduras superficiais têm início a partir dos 60 °C, para madeiras

com corte tangencial, sem relação direta com a velocidade de circulação do ar no interior da câmara de secagem. No entanto, observando-se a Figura 33, que apresenta as rachaduras (mm) em cada temperatura e velocidade do ar testadas, verifica-se que não há diferença estatisticamente significativa entre as condições avaliadas.

Figura 33 - Rachaduras de face (mm) na secagem de madeira *Pinus taeda* a 40, 60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s. As barras indicam a média  $\pm$  desvio padrão. Letras iguais, entre cada tipo de corte, significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com 95% de confiança.



Fica evidente na Figura 33 que no corte radial o defeito de rachadura é praticamente inexistente. Isto pode ser confirmado pela na Tabela 10 que apresenta o percentual de corpos de prova com o defeito de rachaduras superficiais.

Tabela 10 - Percentual de corpos de prova com rachaduras superficiais pela secagem de madeira *Pinus taeda* a 40,60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial (Tang) e radial (Rad) com velocidade do ar ( $v$ ) de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s.

Temperatura (°C)	40						60						80					
	0		0,6		1,2		0		0,6		1,2		0		0,6		1,2	
Velocidade circulação do ar (m/s)	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.
Rachaduras superficiais	0	0	11	0	11	0	55	11	77	0	67	0	33	0	55	0	55	0

Para Oltean et al. (2007), a formação de rachaduras na madeira durante a secagem difere de grau e número em função, principalmente, das variáveis temperatura e teor de umidade dentro do secador associada à velocidade forçada de ar, teor de umidade da madeira, microestrutura de diferentes espécies de madeira e dimensão das amostras testadas. Segundo os autores, é de conhecimento que os problemas de rachaduras aumentam com o aumento da temperatura, mas a maioria dos estudos que examinaram esse problema utilizaram altas temperatura de secagem ou mesmo tratamento térmico. Na região de temperaturas baixas ( $T < 60$  °C), estes efeitos não foram analisados de forma muito detalhada até então.

Yang e Normand (2012) relatam que algumas trincas superficiais geralmente se estendem além do que pode ser visto a olho nu. No entanto, se a madeira está trincada, as micro-trincas podem abrir e aparecer no futuro. Em geral, a rápida secagem de madeira com alta temperatura promove a trinca; portanto, a secagem da madeira exige um processo suave com temperatura mais baixa e, se possível maior umidade relativa dentro da câmara de secagem para redução da velocidade inicial de evaporação da água.

Yang e Normand (2012) sugerem ainda que para secagem de madeiras em estufa, especificamente as do tipo duras (que não engloba a espécie *Pinus*), é uma prática comum usar baixas temperaturas, especialmente no período inicial do processo de secagem. Também é comum retardar a taxa de secagem e monitorar as diferenças de teor de umidade entre a superfície e o interior da peça de madeira, controlando as condições de umidade relativa do ambiente. Para evitar trincas nessas madeiras, o tempo de secagem em processos com  $T$  e  $u_{\infty}$  constantes deve ser maior do que o considerado em programas de secagem convencionais.

Wengert (2006) também destaca que a madeira serrada com corte tangencial seca mais rapidamente do que a madeira de corte radial e por esta razão é mais suscetível a desenvolver trincas de superfície do que a madeira com corte radial.

Rocha e Tomaselli (2002) realizaram estudo com objetivo de avaliar os efeitos provocados pelas tensões de crescimento utilizando dois modelos de desdobro (corte) para outra espécie de madeira (*Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*). As toras foram desdobradas utilizando dois modelos de cortes, sendo um visando obter tábuas preferencialmente tangenciais e outro, tábuas preferencialmente radiais. Os autores

concluíram que o desdobro tangencial foi o que apresentou maiores índices de rachadura.

Comparando-se os resultados da pesquisa obtidos neste trabalho, é possível identificar, claramente, que o corte tangencial foi mais suscetível ao aparecimento de trincas superficiais do que a madeira que possui corte radial, o que é corroborado por Denig, Wengert e Simpson (2000) ao afirmarem que a madeira serrada no sentido tangencial tem um risco muito maior de desenvolver trincas de superfície do que a radial.

Estima-se que as perdas causadas pelas trincas de superfície representem cerca de 5% do valor da madeira depois da secagem em estufa. (Yang e Normand, 2012).

Pesquisas comparando o efeito do corte tangencial e radial da madeira e a incidência de trincas superficiais na madeira de *Pinus* não foram encontradas na literatura disponível. Existe vasta literatura correlacionando os efeitos da temperatura sobre a velocidade de secagem e qualidade da madeira secada, mas, especificamente em relação ao *Pinus taeda*, a influência do sentido de corte da madeira sobre a incidência de trincas superficiais era inexistente, até o momento.

Em relação aos defeitos de secagem em termos de empenamentos (arqueamento, encurvamento, encanoamento e torcimento), pode-se observar na Tabela 11 os percentuais de corpos de provas que os apresentaram.

Tabela 11 - Percentual de corpos de prova com empenamentos do tipo arqueamento, encurvamento, encanoamento e torcimento pela secagem de madeira *Pinus taeda* a 40,60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial (Tang.) e radial (Rad.) com velocidade do ar (v) de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s.

Temperatura (°C)	40						60						80					
	0		0,6		1,2		0		0,6		1,2		0		0,6		1,2	
	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.
<b>Arqueamento</b>	44	44	44	33	55	11	55	22	11	22	33	33	11	33	55	44	44	55
<b>Encurvamento</b>	55	22	55	55	77	33	44	11	44	55	77	22	33	33	44	33	77	44
<b>Encanoamento</b>	0	0	22	0	22	0	33	11	33	0	11	0	55	0	22	0	88	11
<b>Torcimento</b>	11	44	33	77	22	67	77	89	44	89	22	67	100	89	44	67	88	100

Avaliando-se a Tabela 11 é possível observar que, de modo geral, de um total de 162 corpos de provas submetidos à secagem, os defeitos de empenamentos (arqueamento, encurvamento, encanoamento e torcimento) tiveram maior incidência percentual nos corpos de prova com corte do tipo tangencial, exceto para o defeito de torcimento.

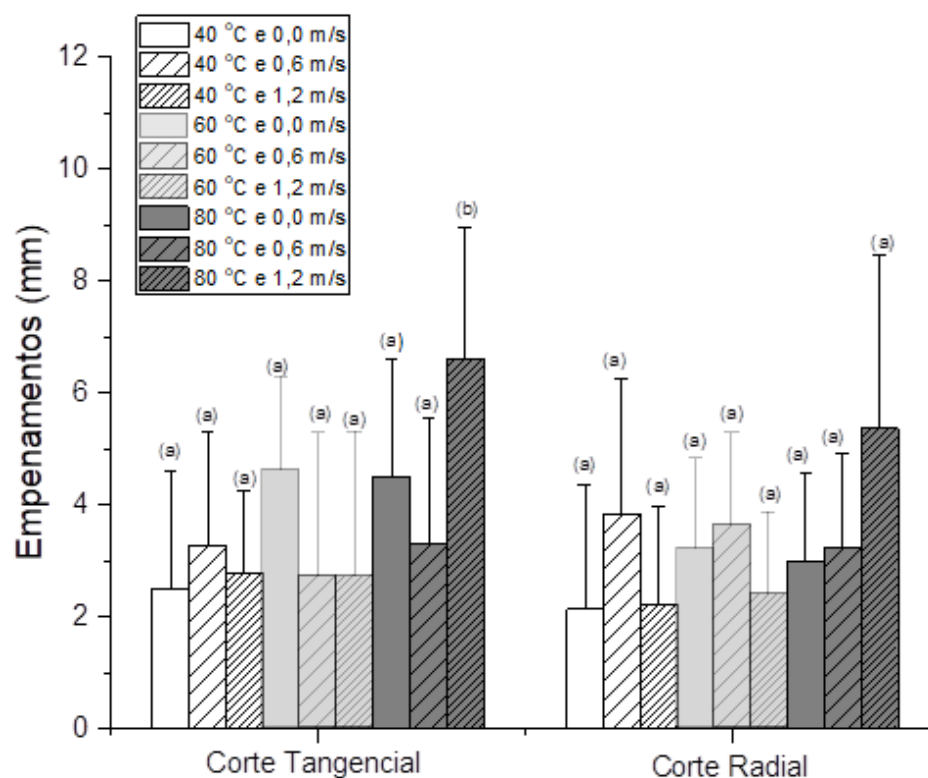
A única condição de secagem em que os corpos de prova com corte tangencial não apresentaram defeito de encanoamento foi a de 40 °C com  $u_{\infty} = 0,0$  m/s. Por outro lado, praticamente todos os corpos de prova com corte radial, não apresentaram este tipo de defeito, salvo nas condições mais altas de  $T$  (80 °C) e  $u_{\infty}$  (1,2 m/s). Assim, é possível afirmar que a madeira de *Pinus taeda* cortada no sentido de corte radial é mais estável, tornando-se menos suscetível ao desenvolvimento de empenamentos durante o processo de secagem.

Contudo, o defeito de torcimento teve maior incidência justamente nos corpos de prova com corte radial onde 100% das peças apresentaram este defeito quando 80 °C e 1,2 m/s foram utilizados.

Analisando-se os defeitos de empenamento conjuntamente, ou seja, somando-se os milímetros dos defeitos de arqueamento, encurvamento, encanoamento e torcimento observados nos corpos de prova testados em cada temperatura e velocidade de circulação do ar, observa-se, a partir da Figura 34 mostrada a seguir, que a condição de secagem de 80 °C e 1,2 m/s levou ao maior valor de empenamento para o corte tangencial. Cabe lembrar que esta condição foi a que apresentou a maior velocidade máxima de secagem conforme pode ser visto na Tabela 6 e na Figura 28.



Figura 34 - Empenamentos (mm) na secagem de madeira *Pinus taeda* secados a 40, 60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade forçada do ar de 0 (sem circulação de ar), 0,6 e 1,2 m/s. As barras indicam a média  $\pm$  desvio padrão. Letras iguais, entre cada tipo de corte, significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com 95% de confiança



Em relação à tensão interna, na Tabela 12, apresenta-se a classificação deste defeito, conforme critério definido por Pratt (1974), quando os corpos de prova foram secos a 40, 60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s. Observa-se que no corte tangencial, esta tensão é considerada normal quando as condições de 40 °C com 0,0 e 1,2 m/s e 60° com 0,6 e 1,2 m/s são utilizadas. Já, para o corte radial, a tensão interna é normal somente quando não se utiliza a circulação de ar para qualquer temperatura testada.

Tabela 12 - Classificação dos corpos de prova em termos da tensão interna quando secos a 40,60 e 80°C, empregando o corte da madeira tangencial e radial com velocidade do ar de 0 (sem circulação forçada de ar), 0,6 e 1,2 m/s

Temperatura	Velocidade de circulação do ar	Plano de corte da madeira	
		Tangencial	Radial
40	0	NORMAL	NORMAL
	0,6	MÉDIO	MÉDIO
	1,2	NORMAL	MÉDIO
60	0	MÉDIO	NORMAL
	0,6	NORMAL	MÉDIO
	1,2	NORMAL	MÉDIO
80	0	MÉDIO	NORMAL
	0,6	MÉDIO	MÉDIO
	1,2	MÉDIO	MÉDIO

De uma maneira geral, os defeitos de tensão interna aconteceram em todas as condições de secagem testadas tanto para o corte tangencial como para o corte radial, sendo mais evidentes nas condições mais drásticas do processo.

De forma resumida, todos os defeitos encontrados na secagem de madeira *Pinus taeda* com as suas respectivas classificações dos graus de incidência podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 - Classificação da incidência de defeitos

Temperatura (°C)	40						60						80					
	0		0,6		1,2		0		0,6		1,2		0		0,6		1,2	
Velocidade circulação do ar (m/s)	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.	Tang.	Rad.
<b>Arqueamento</b>	moderada	moderada	moderada	moderada	grande	pequena	grande	pequena	pequena	pequena	moderada	moderada	pequena	moderada	grande	moderada	moderada	grande
<b>Encurvamento</b>	grande	pequena	grande	grande	grande	moderada	moderada	pequena	moderada	grande	grande	pequena	moderada	moderada	moderada	moderada	grande	moderada
<b>Encanoamento</b>	ausente	ausente	pequena	ausente	pequena	ausente	moderada	pequena	moderada	ausente	pequena	ausente	grande	ausente	pequena	ausente	grande	pequena
<b>Torcimento</b>	pequena	moderada	moderada	grande	pequena	grande	grande	grande	moderada	grande	pequena	grande	grande	grande	noderada	grande	grande	grande
<b>Rachaduras superficiais</b>	ausente	ausente	pequena	ausente	pequena	ausente	grande	pequena	grande	ausente	grande	ausente	moderada	ausente	grande	ausente	grande	ausente

## CONCLUSÃO

Dentro das condições experimentais avaliadas ( $T = 40, 60$  e  $80$  °C,  $u_{\infty} = 0, 0,6$  e  $1,2$  m/s), quanto maior  $T$  e  $u_{\infty}$ , maiores foram as médias das velocidades máximas de secagem, tanto em termos de taxa ( $v_{m\acute{a}x}$ ) quanto de fluxo ( $V_{m\acute{a}x}$ ), para ambos os tipos de corte da madeira (tangencial e radial). Os maiores valores de velocidades foram da ordem de  $15$  U%/h e de  $0,051$  g/(cm<sup>2</sup>.h), obtidas a  $80$  °C e  $1,2$  m/s, independentemente do tipo de corte. Para  $T$  e  $u_{\infty}$  menores ( $40$  °C e  $0$  m/s) esses valores foram de, aproximadamente,  $15$  vezes menores.

Apenas as variáveis operacionais  $T$  e  $u_{\infty}$  e sua interação ( $Tu_{\infty}$ ) apresentaram efeitos significativos ( $p < 0,05$ ) sobre a velocidade de secagem expressa na unidade U%/h. Não foi possível determinar uma equação que representasse de maneira satisfatória ( $R^2 > 0,5$ ) o efeito aditivo dessas variáveis sobre  $v_{m\acute{a}x}$  para todos os ensaios realizados. Apenas para os pares de ensaios de  $40$  °C e  $60$  °C ( $v_{m\acute{a}x} = -6,20692 + 0,17219T + 4,64479u_{\infty} - 0,01926Tu_{\infty}$ ,  $R^2 = 0,8006$ ) e de  $60$  °C e  $80$  °C ( $v_{m\acute{a}x} = -0,51129 + 0,10985T - 19,73931u_{\infty} + 0,33283Tu_{\infty}$ ,  $R^2 = 0,6918$ ) isto foi possível.

Quanto maior a velocidade de secagem, maior foi a ocorrência de defeitos na madeira seca, sendo que o corte tangencial apresentou maior número de defeitos em comparação ao corte radial. Excetuando-se a secagem realizada na menor temperatura ( $40$  °C), a ocorrência de rachaduras superficiais na madeira cortada no sentido tangencial foi encontrada em todos os corpos de prova após secagem, sendo que o seu número e intensidade (fraca, média, forte) foram maiores a  $60$  °C. No corte radial, dentre os  $81$  corpos de provas secos, a rachadura da madeira foi encontrada em apenas um dos nove corpos de prova quando secos a  $60$  °C com  $u_{\infty}$  de  $1,2$  m/s.

Em relação aos defeitos de empenamentos (arqueamento, encurvamento, encanoamento e torcimento), verificou-se que o arqueamento foi maior no corte tangencial quando seco em menores temperaturas ( $40$  °C e  $60$  °C); enquanto que para o corte radial isto ocorreu em temperatura mais alta ( $80$  °C). O encurvamento e encanoamento, ocorreram com mais frequência no corte tangencial nas três temperaturas testadas. Apenas no empenamento do tipo torcimento, os corpos de prova de corte radial apresentaram maior incidência do que o corte tangencial.

Maior incidência de tensões médias foram encontradas nas madeiras com corte tangencial secas a 80 °C. A maioria dessas tensões foram classificadas como de média intensidade, conforme critério de classificação definido por Pratt, 1974.

De uma maneira geral, ficou evidente que a madeira de *Pinus taeda* de corte radial é menos suscetível a defeitos provocados pela secagem do que o mesmo tipo de madeira cortado tangencialmente.

Diante do estudo realizado neste trabalho e considerando apenas as condições operacionais aqui avaliadas, se propõe a condução da secagem da madeira *Pinus taeda*, caso se faça a opção pelo processo convencional sem o uso do sistema de programação de secagem, em temperatura de 60 °C com 0,6 ou 1,2 m/s de circulação de ar, independentemente do tipo de corte da madeira.

O ideal seria a separação prévia das tábuas de *Pinus* nos seus dois principais tipos de cortes com a secagem das madeiras de corte tangencial a 60 °C com  $u_{\infty}$  de 0,6 ou 1,2 m/s e as de corte radial podendo ser conduzidas em maior temperatura (80 °C) com  $u_{\infty}$  de 0,6 m/s, onde as velocidades de secagem foram significativamente maiores do que a de 60 °C, chegando ao dobro da taxa e fluxo de secagem.

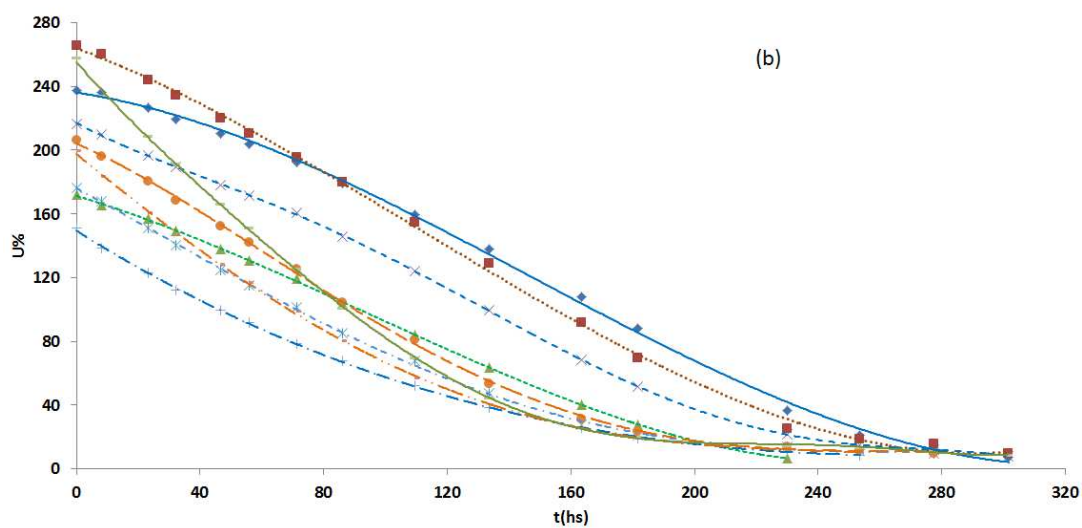
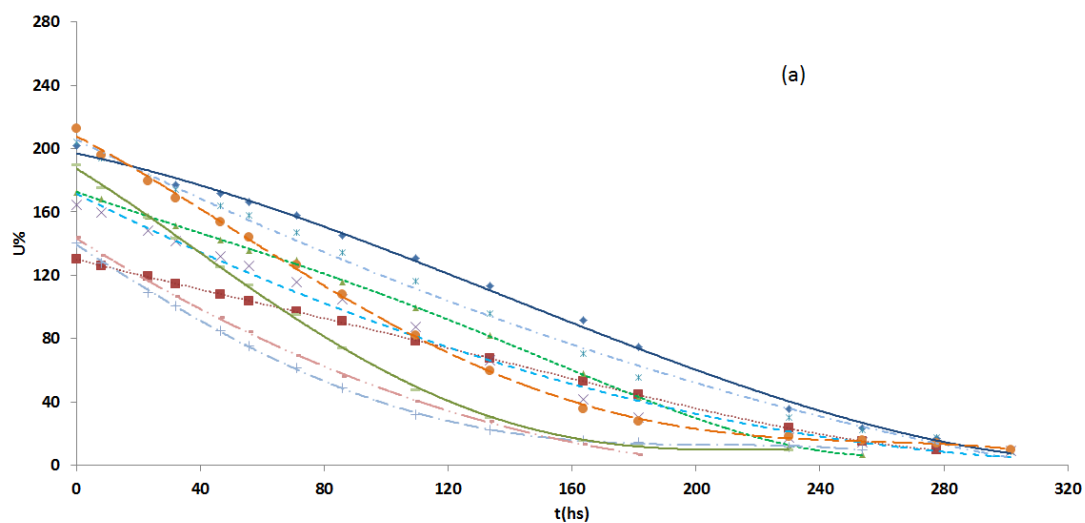
## SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DO ESTUDO

(1) Adaptar em secador de escala laboratorial sistema capaz de realizar o controle automático da umidade relativa do ar dentro da câmara de secagem e avaliar o seu efeito sobre os defeitos gerados na madeira submetida à secagem em diferentes condições operacionais de  $T$  e  $u_{\infty}$ .

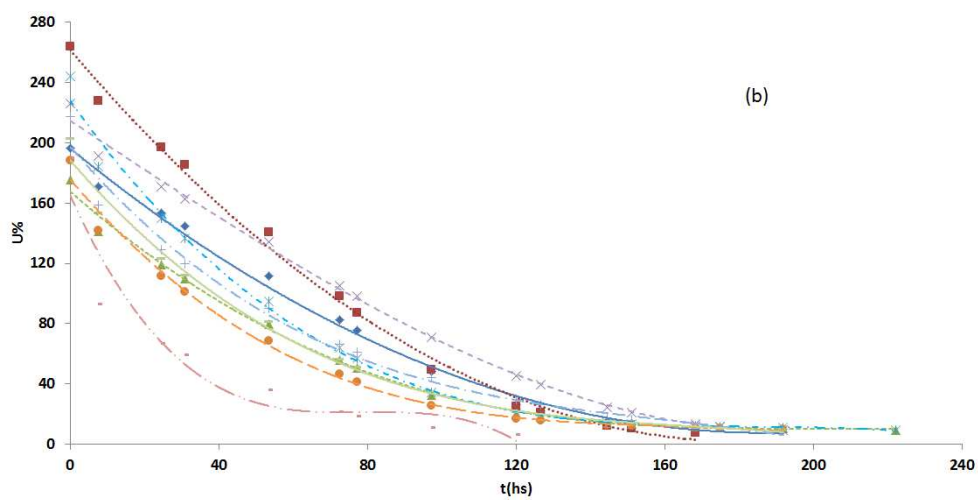
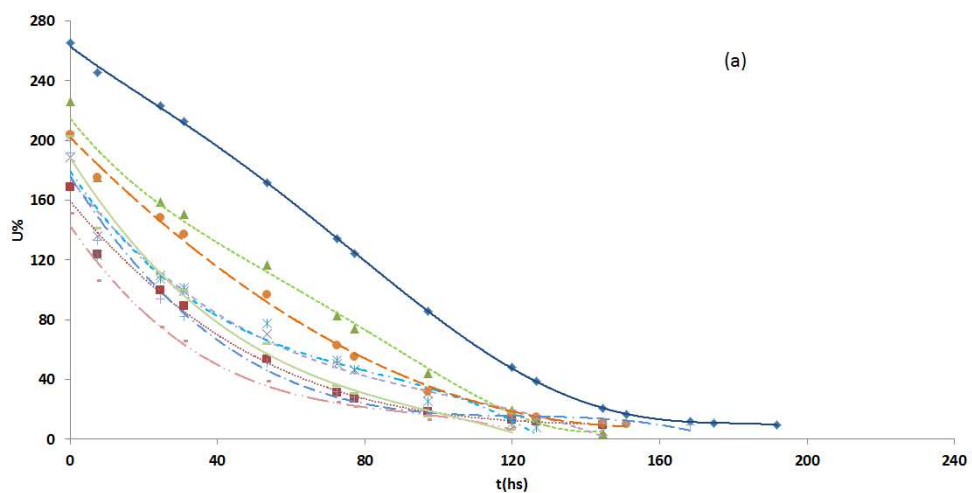
(2) Estabelecer um programa de secagem do tipo umidade-temperatura (KEINE, 1997) para tábuas da madeira *Pinus taeda* que proporcione, em comparação à secagem convencional (sem uso de programa de secagem), altos valores de velocidade máxima de secagem com um número mínimo de defeitos gerados. Um programa de secagem para madeiras moles, como é o caso do *Pinus*, geralmente difere dos programas de secagem para madeiras duras nas mudanças na temperatura de secagem e umidade relativa, que são feitas em tempos pré-determinados, em vez de níveis definidos de teor de umidade (WOOD HANDBOOK, 2010).

## APÊNDICE A

Curva de secagem da madeira *Pinus taeda* a 40 °C, sem circulação de ar ( $u_{\infty} = 0$  m/s), empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T40-0) e (b) radial (Ensaio R40-0).

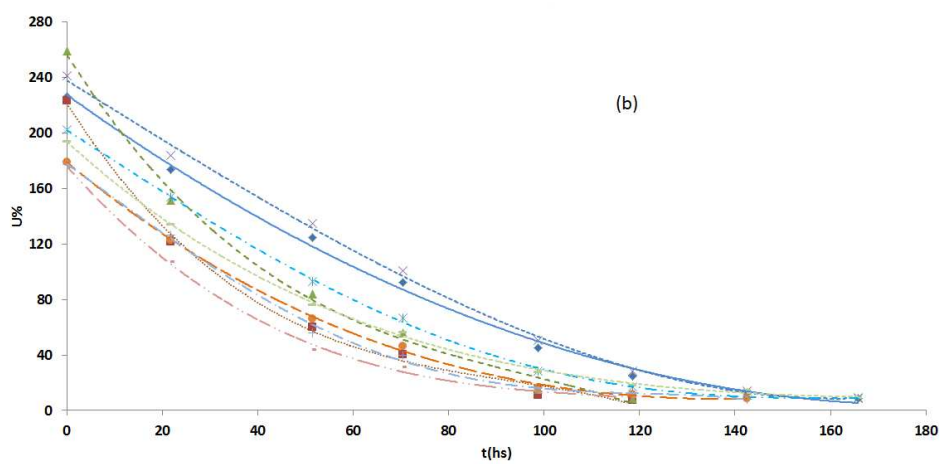
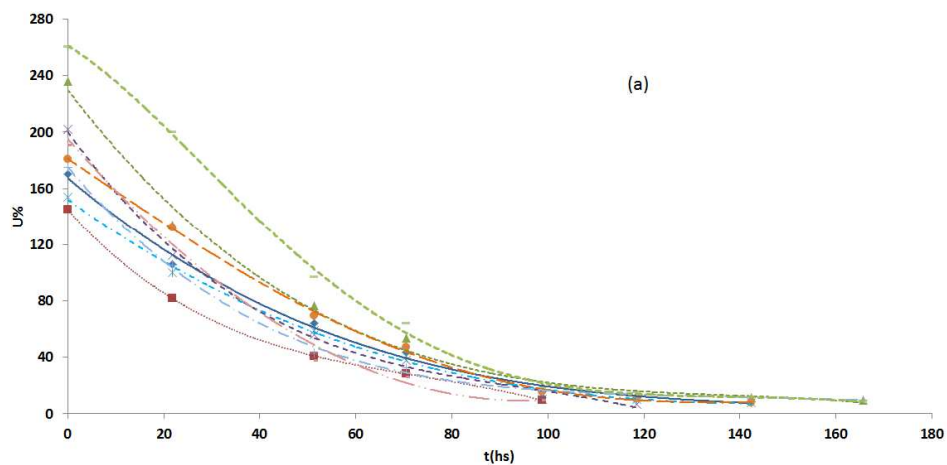


Curva de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 40 °C com velocidade de circulação de ar de 0,6 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T40-0,6) e (b) radial (Ensaio R40-0,6).

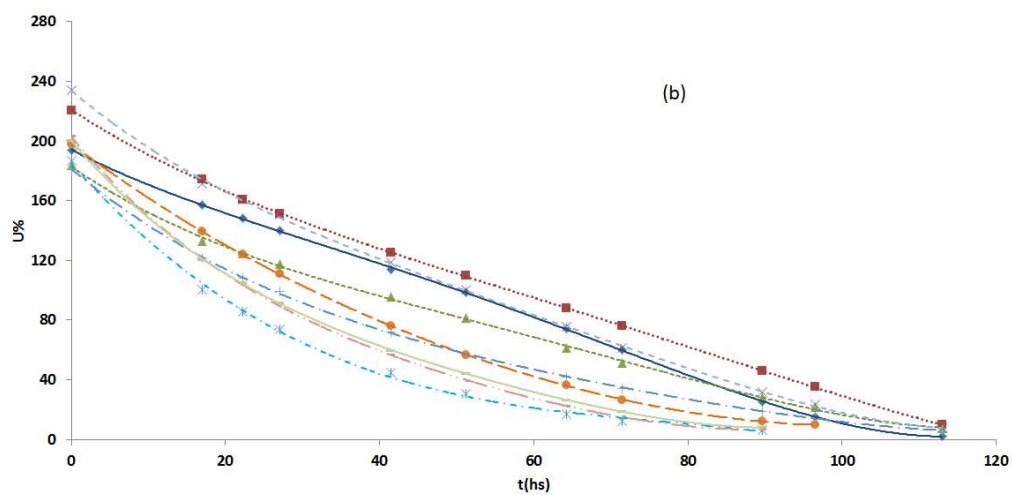
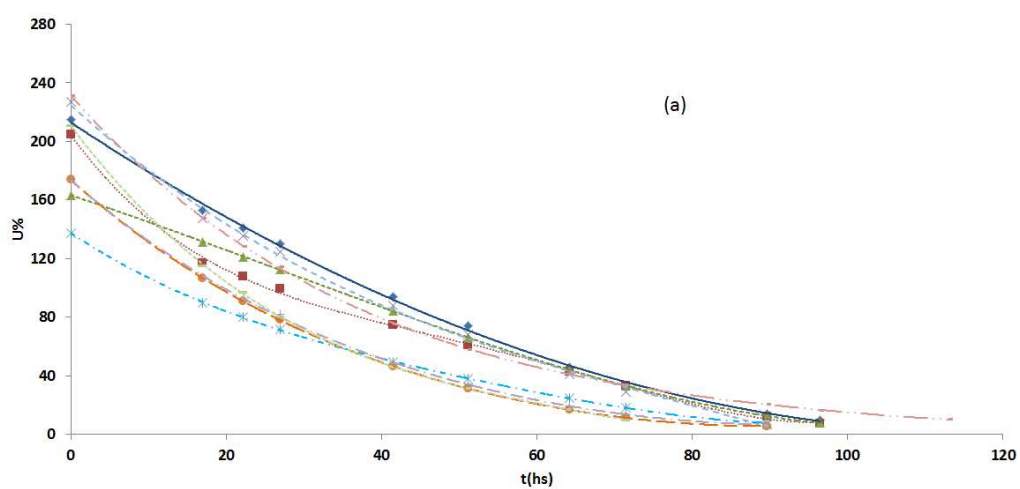




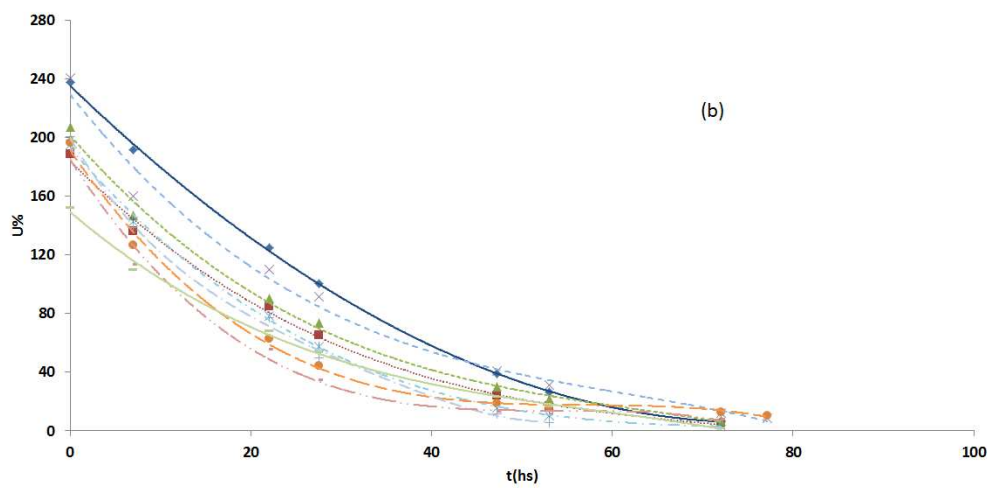
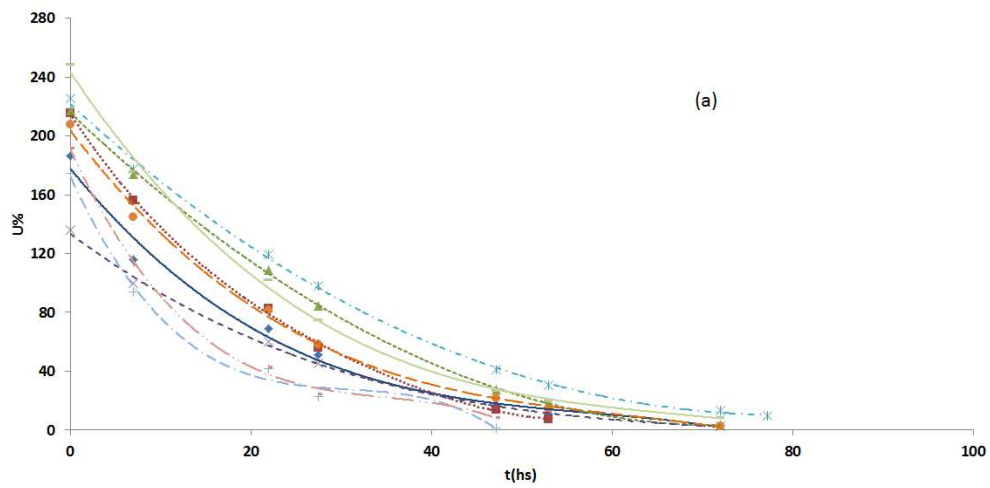
Curva de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 40 °C, com velocidade de circulação de ar de 1,2 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T40-1,2) e (b) radial (Ensaio R40-1,2).



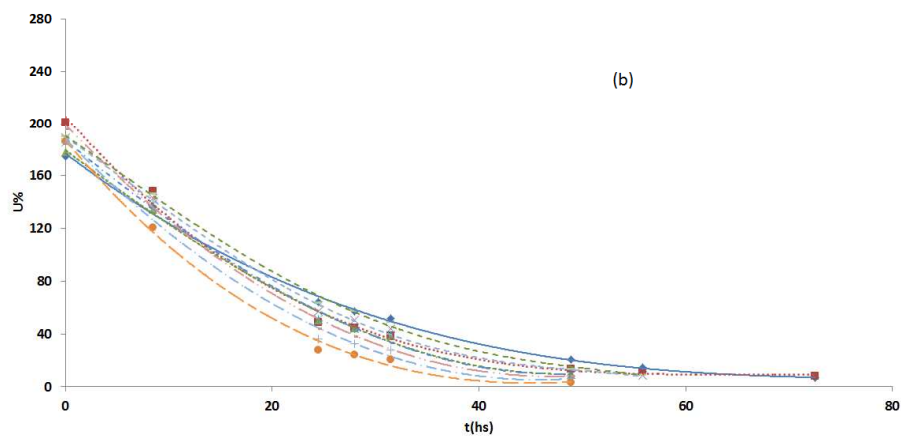
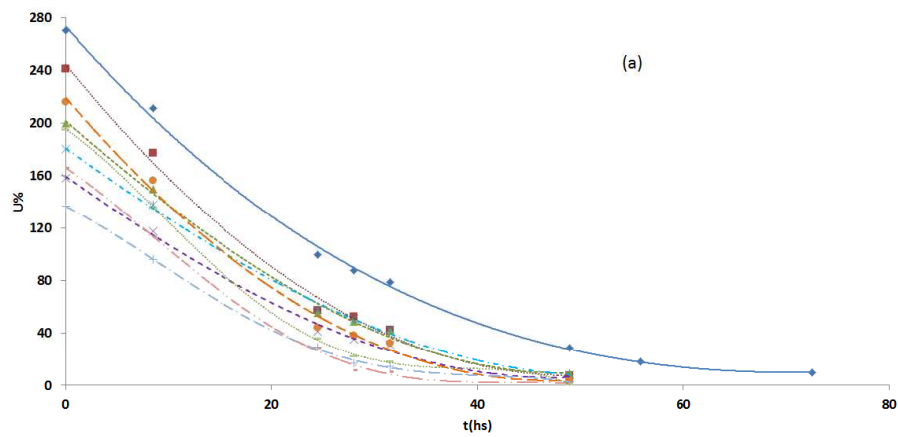
Curva de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 60 °C, sem velocidade de circulação de ar ( $u_{\infty} = 0,0$  m/s), empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T60-0) e (b) radial (Ensaio R60-0).



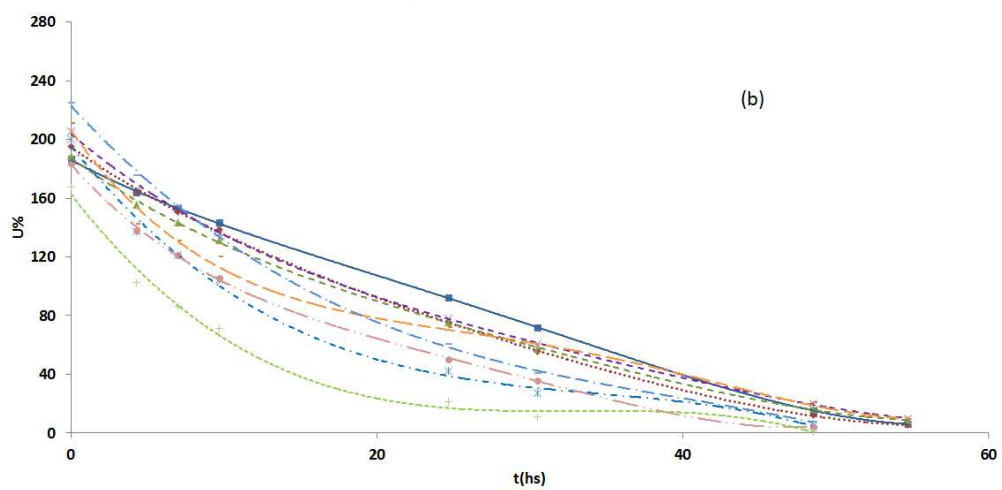
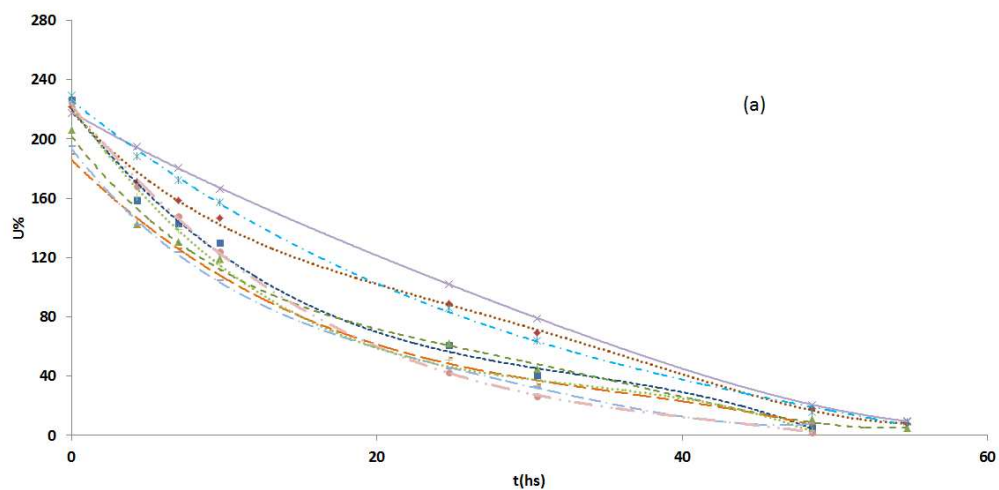
Curva de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 60 °C, com velocidade de circulação de ar de 0,6 m/s. empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T60-0,6) e (b) radial (Ensaio R-60-0,6).



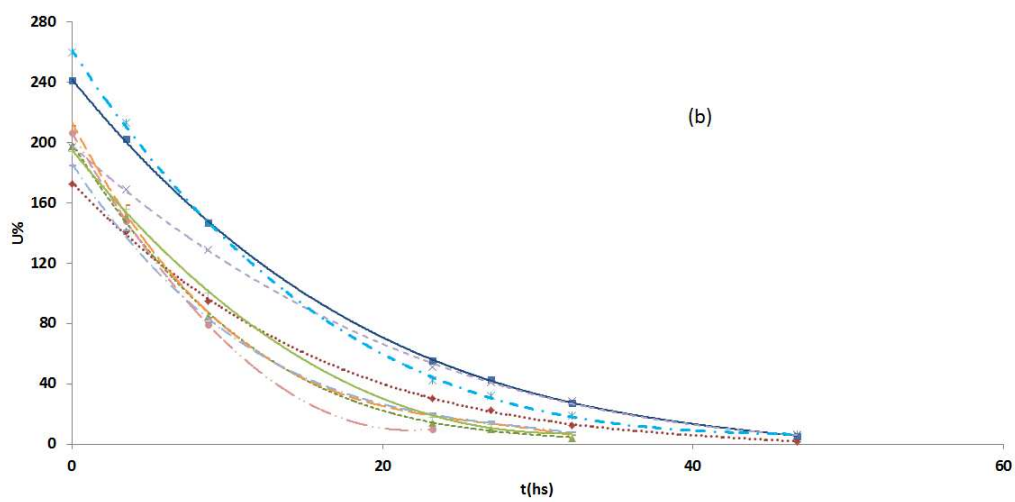
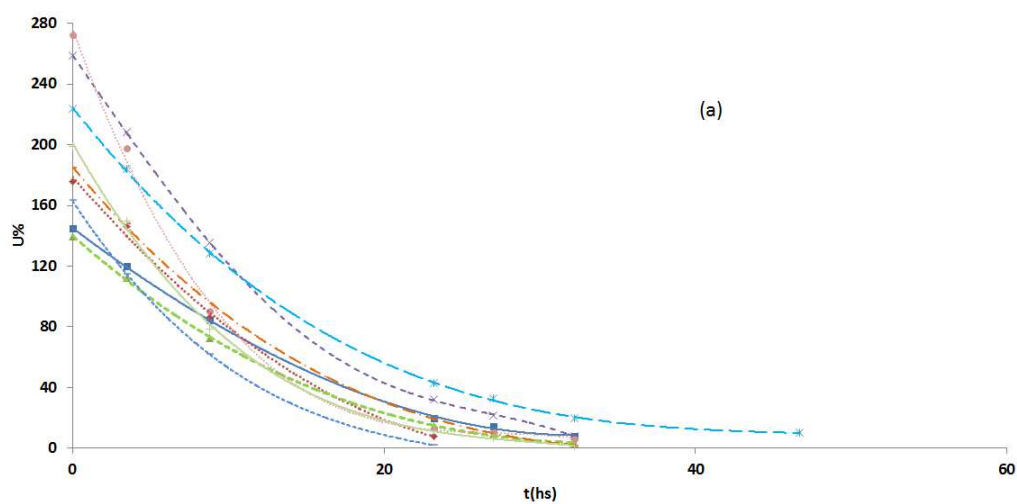
Curva de secagem da madeira *Pinus taeda* a 60 °C, com velocidade de circulação de ar de 1,2 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T60-1,2) e (b) radial (Ensaio R60-1,2).



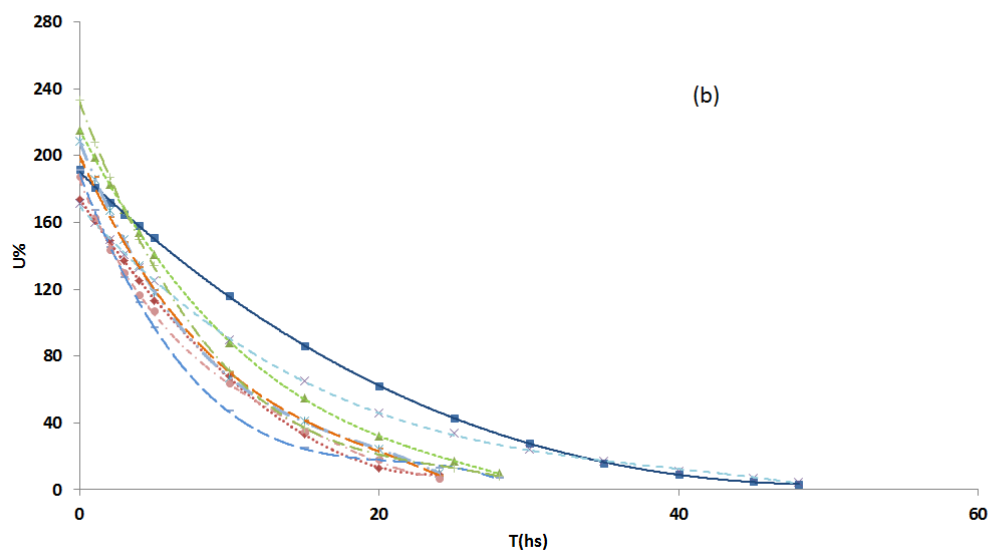
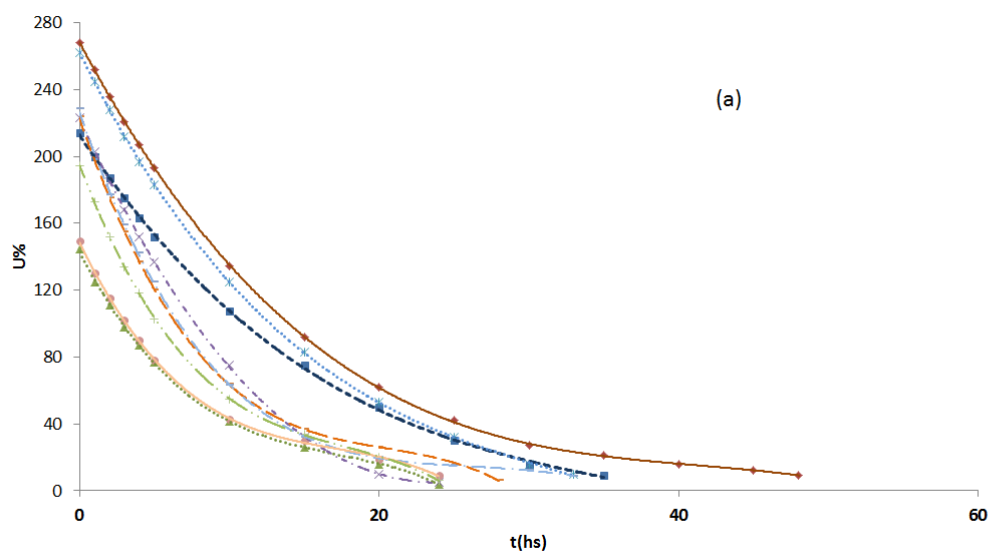
Curva de secagem da madeira *Pinus taeda* a 80 °C, sem velocidade de circulação de ar ( $u_{\infty} = 0,0$  m/s), empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T80-0) e (b) radial (Ensaio R80-0).



Curva de secagem da madeira *Pinus taeda* a 80 °C, com velocidade de circulação de ar de 0,6 m/s. empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T80-0,6) e (b) radial (Ensaio R80-0,6).



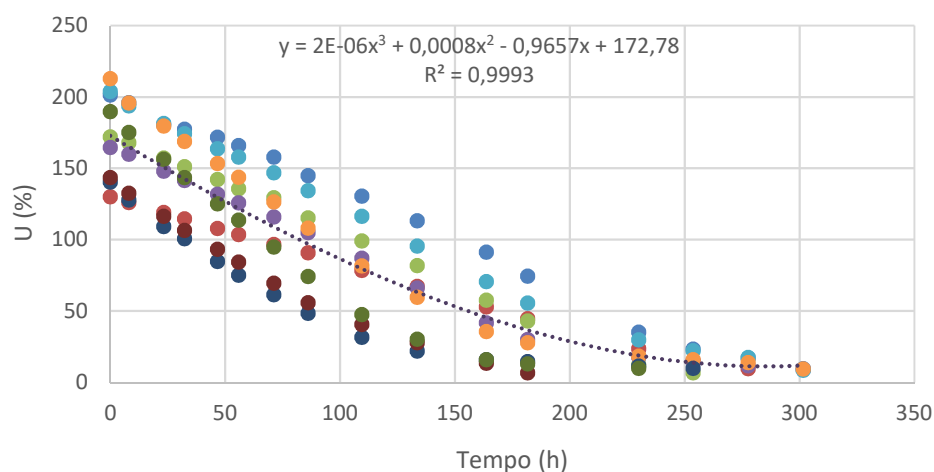
Curva de secagem da madeira *Pinus taeda* a 80 °C, com velocidade de circulação de ar de 1,2 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T80-1,2) e (b) radial (Ensaio R80-1,2).



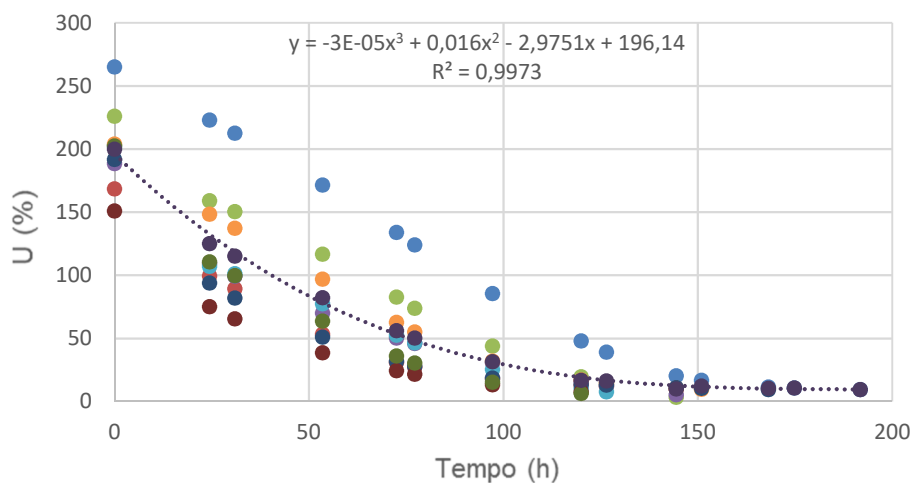
## APÊNDICE B

Curvas médias da variação do teor de umidade (U%) dos 9 nove corpos de provas de corte tangencial e radial em função do tempo de processo ao serem submetidos à secagem conduzidas em diferentes temperaturas (40, 60 e 80 °C) e velocidade do ar de secagem (0, 0,6 e 1,2 m/s).

Corte Tangencial - 40°C - 0,0 m/s

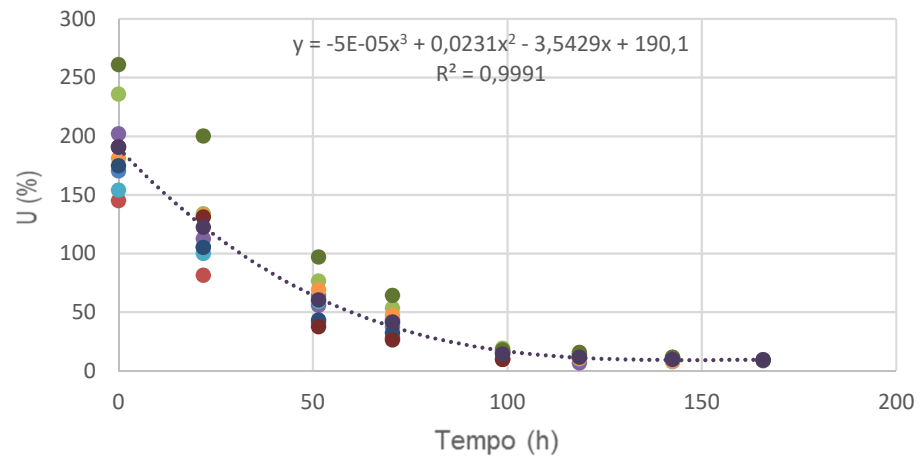


Corte Tangencial - 40°C - 0,6 m/s

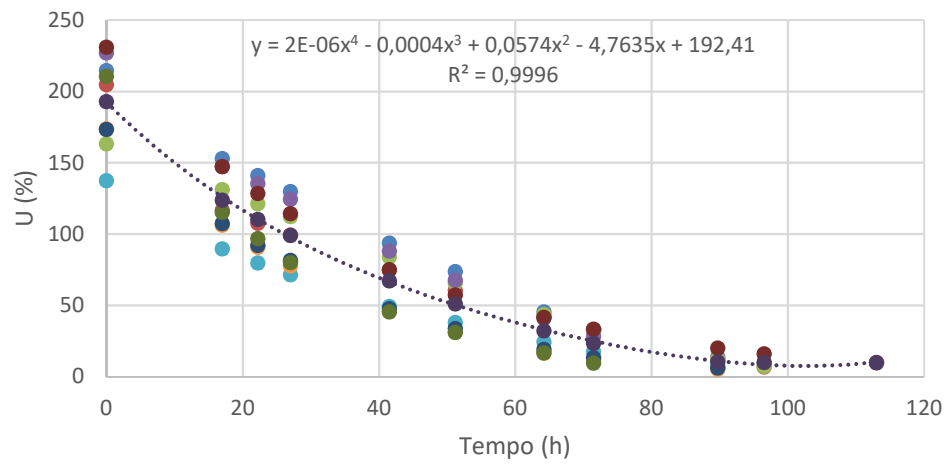




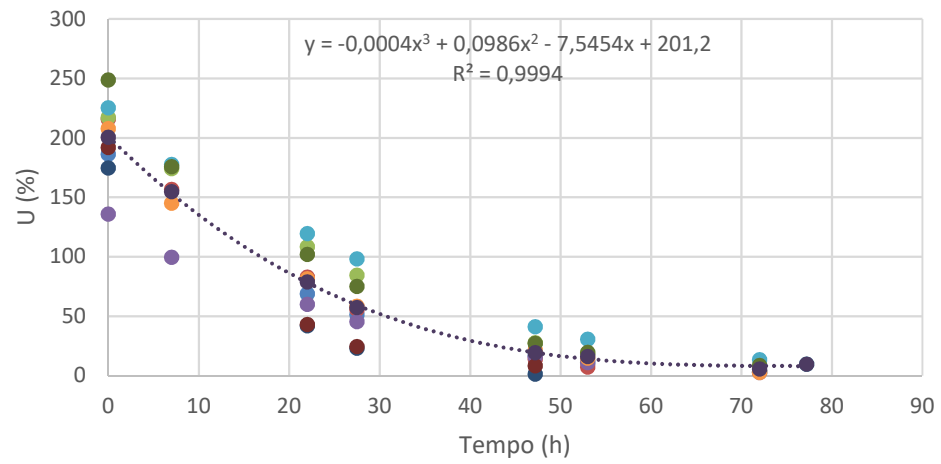
Corte Tangencial - 40°C - 1,2 m/s



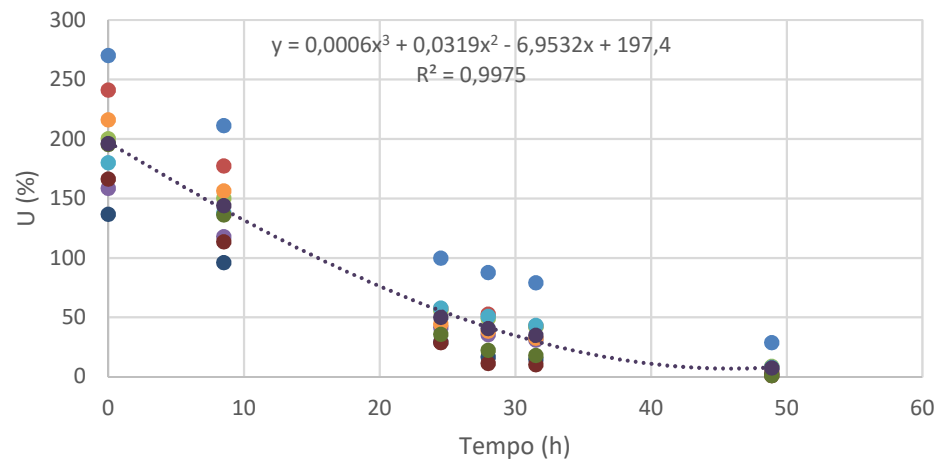
Corte Tangencial - 60°C - 0,0 m/s



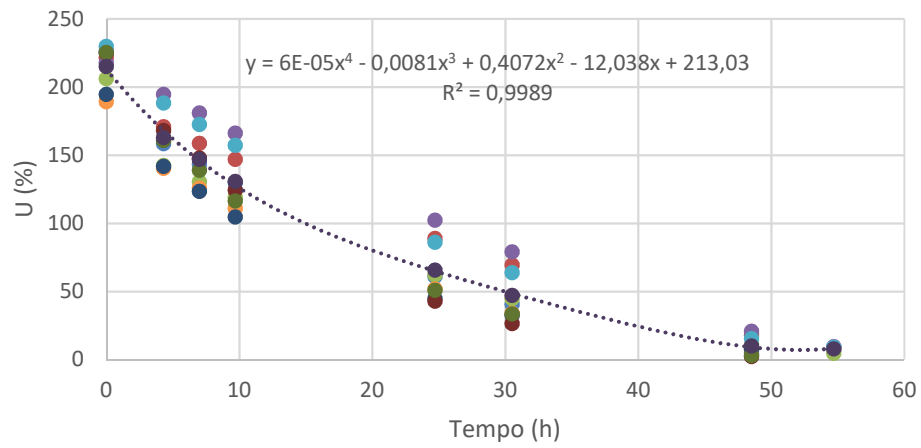
Corte Tangencial - 60°C - 0,6 m/s



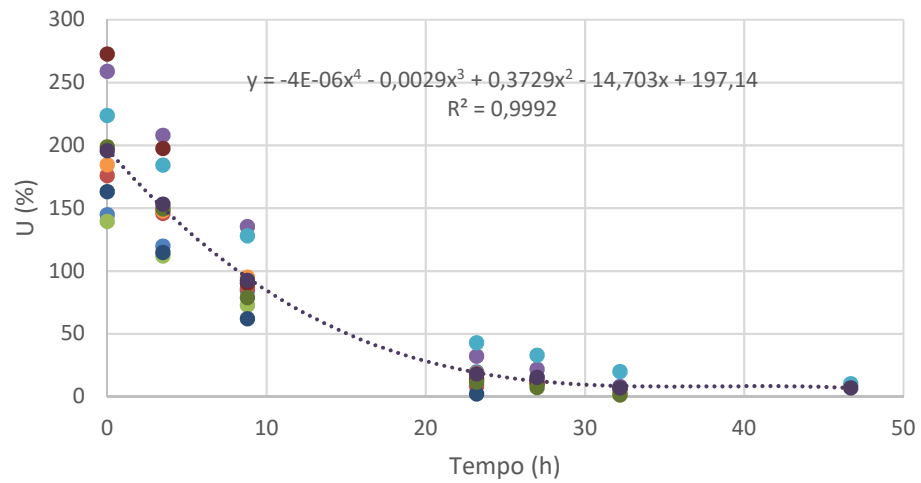
Corte Tangencial - 60°C - 1,2 m/s



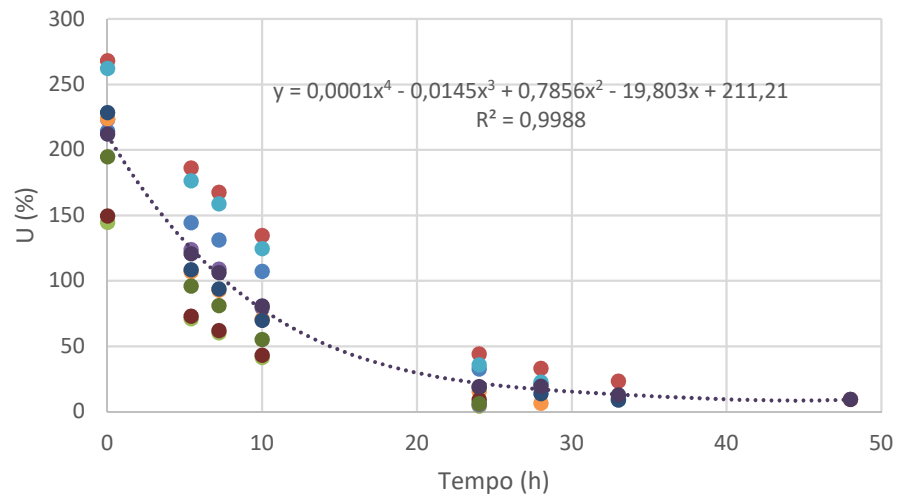
Corte Tangencial - 80°C - 0,0 m/s



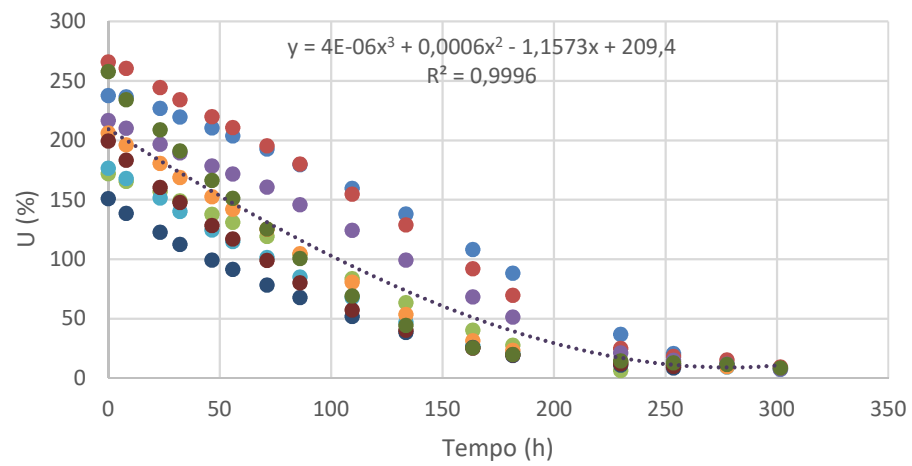
Corte Tangencial - 80°C - 0,6 m/s



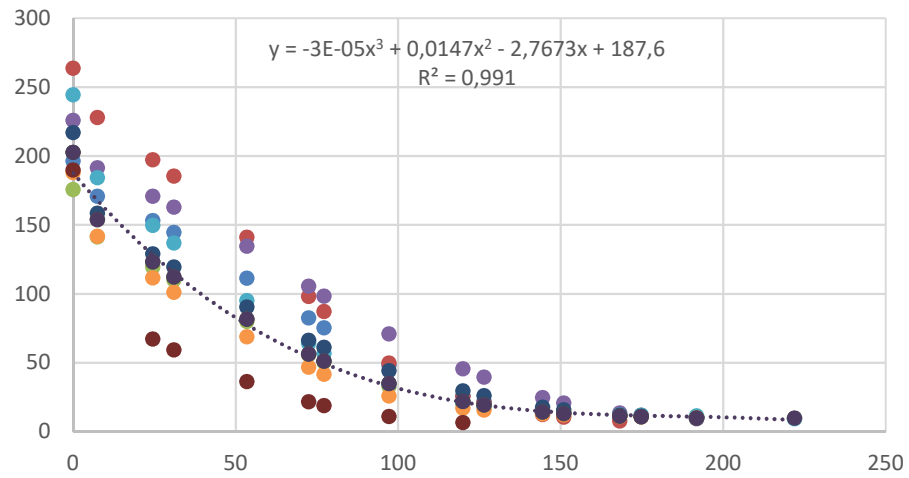
Corte Tangencial - 80°C - 1,2 m/s



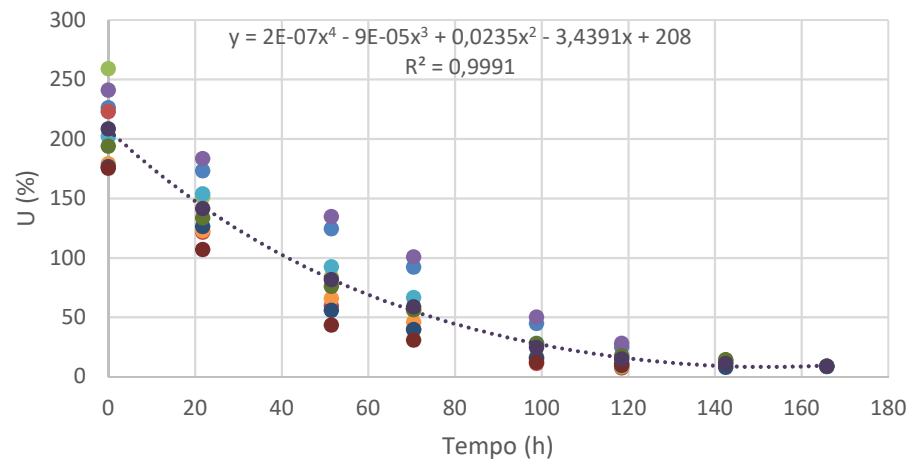
Corte Radial - 40°C - 0,0 m/s



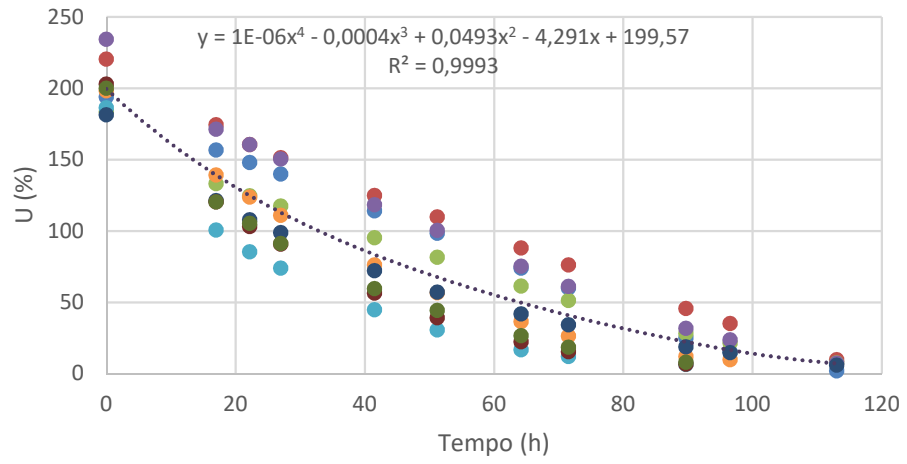
Corte Radial - 40°C - 0,6 m/s



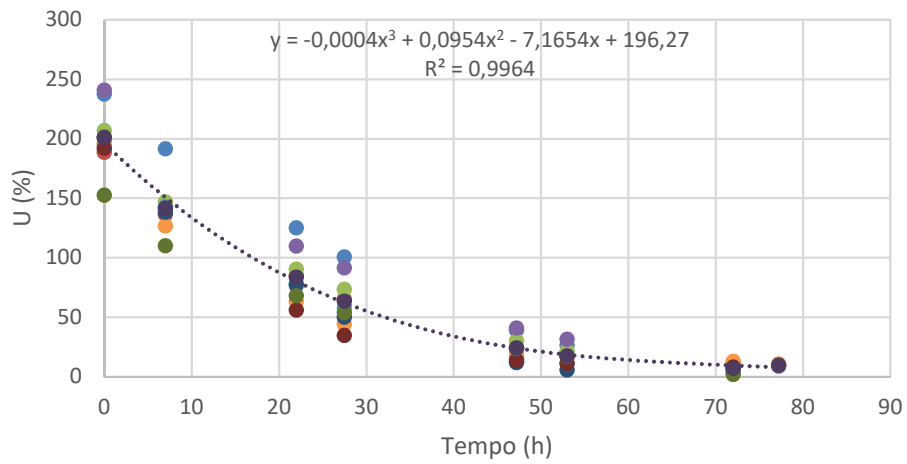
Corte Radial - 40°C - 1,2 m/s



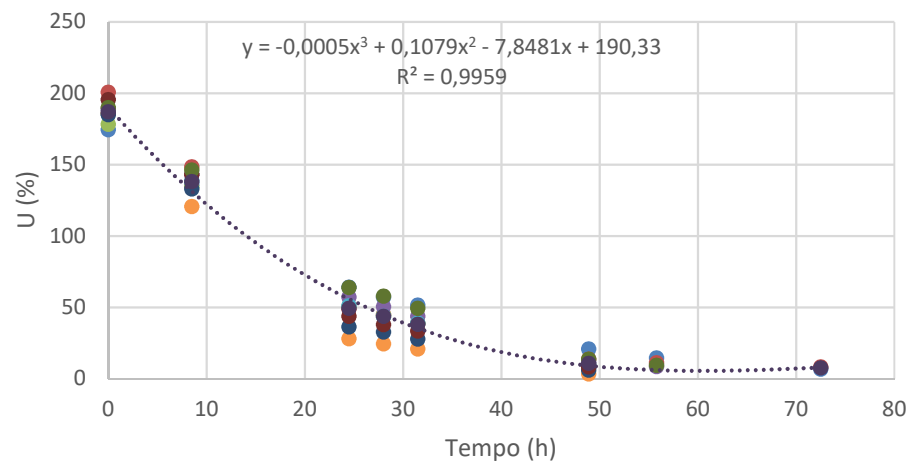
Corte Radial - 60°C - 0,0 m/s



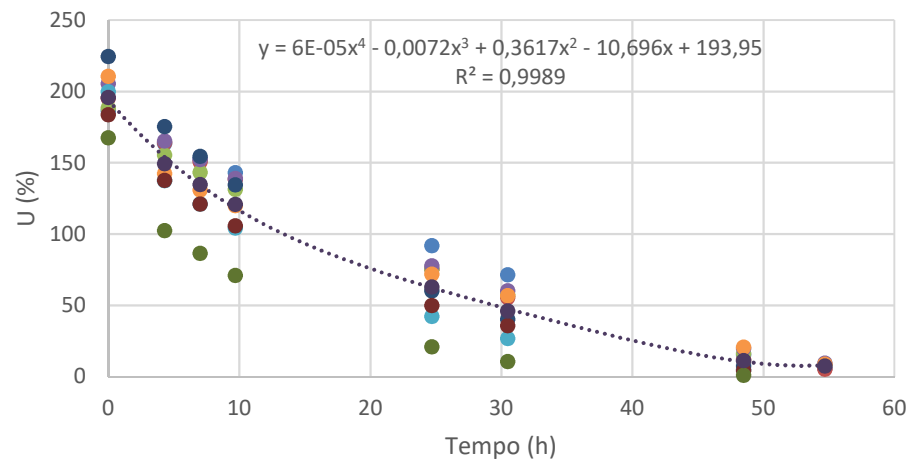
Corte Radial - 60°C - 0,6 m/s



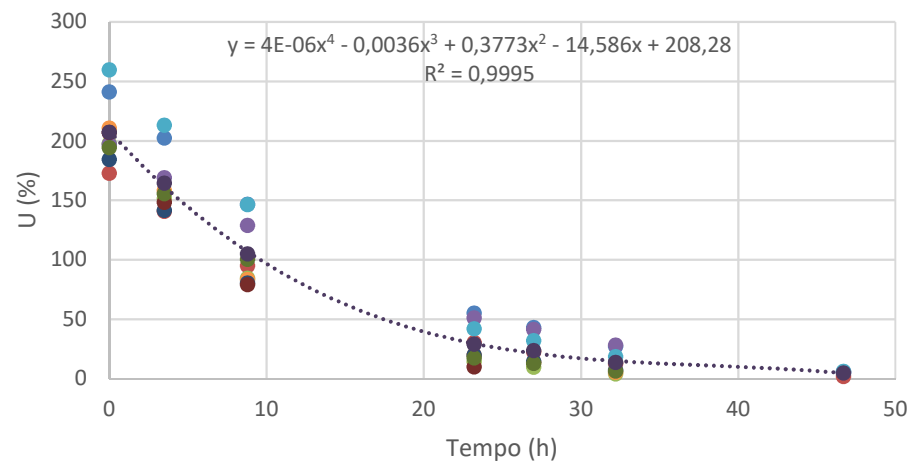
Corte Radial - 60°C - 1,2 m/s



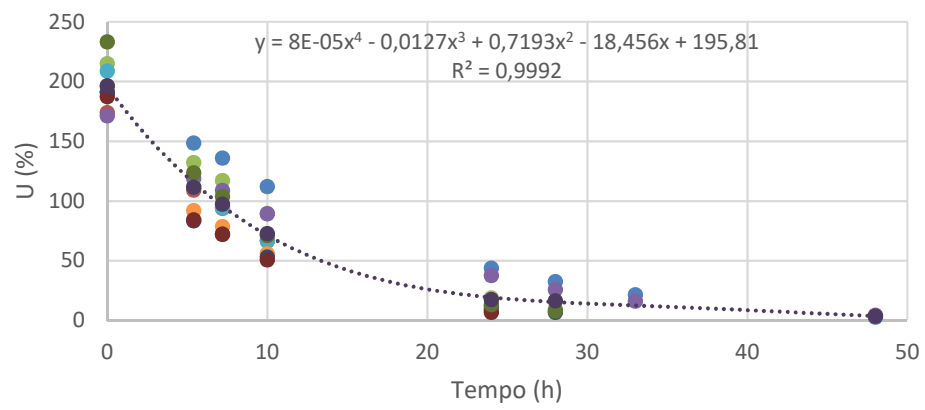
Corte Radial - 80°C - 0,0 m/s



Corte Radial - 80°C - 0,6 m/s



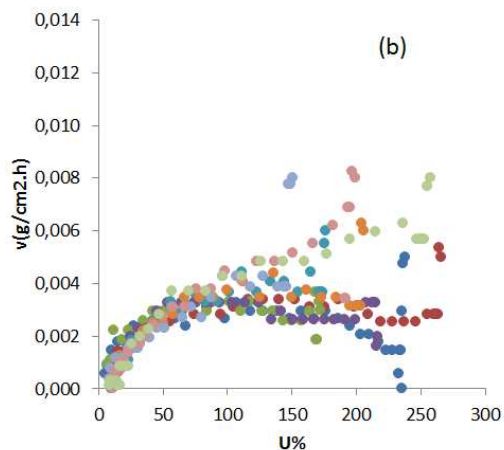
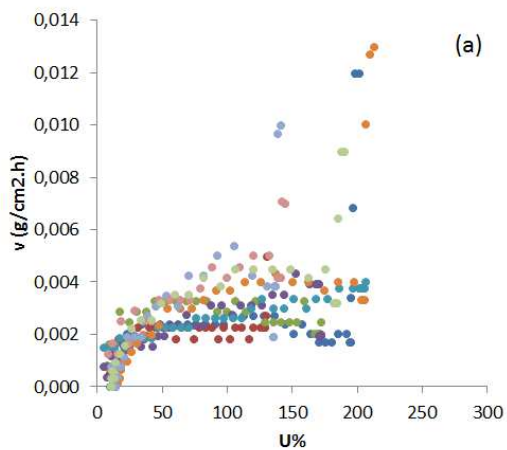
Corte Radial - 80°C - 1,2 m/s



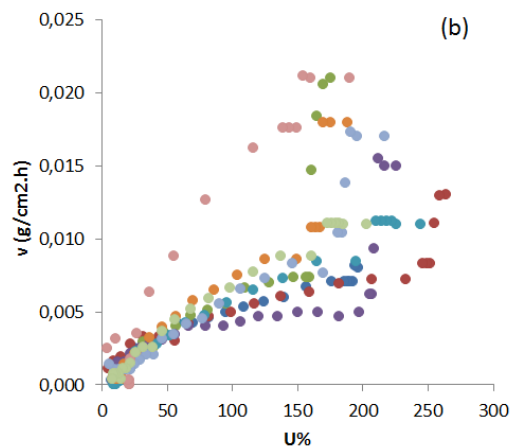
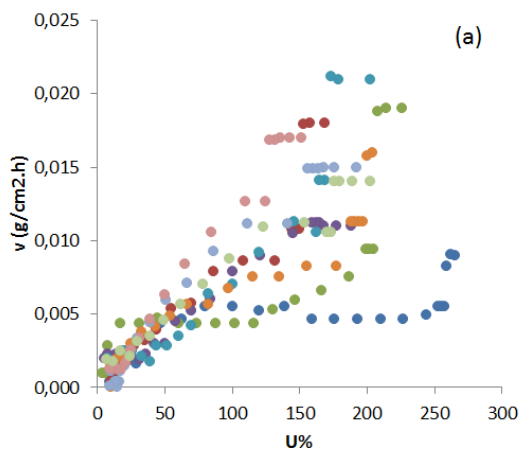


## APÊNDICE C

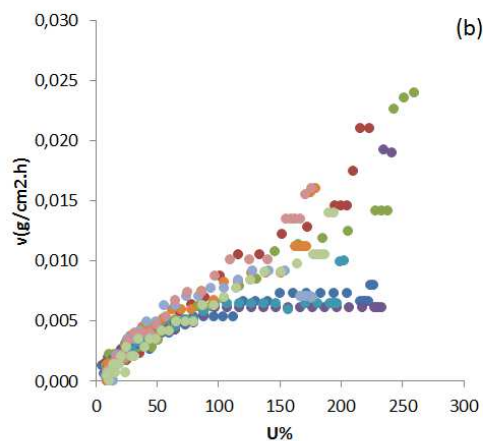
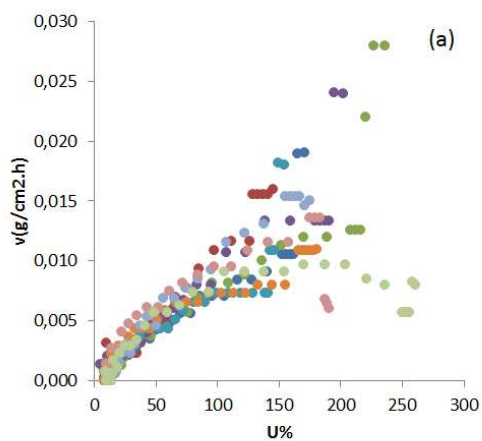
Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 40° sem ar de circulação forçada ( $u_{\infty}=0$ ), empregando o corte da madeira (a) tangencial (Ensaio T40-0) e (b) radial (Ensaio R40-0).



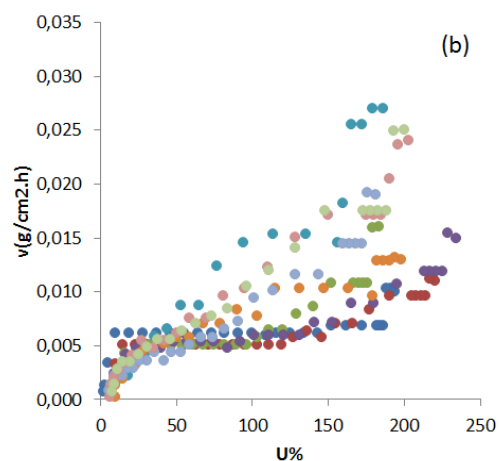
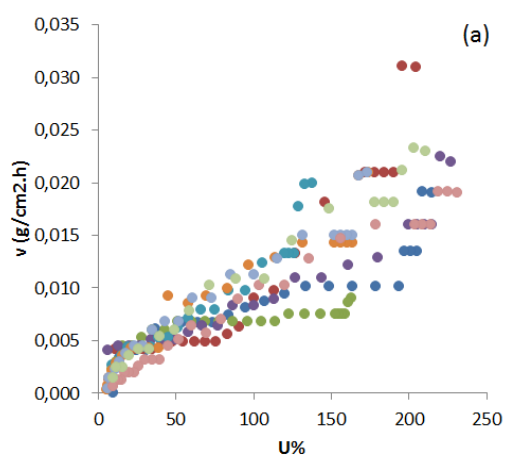
Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 40° com velocidade de circulação de ar de 0,6 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial: Ensaio T40-0,6 e (b) radial: Ensaio R40-0,6.



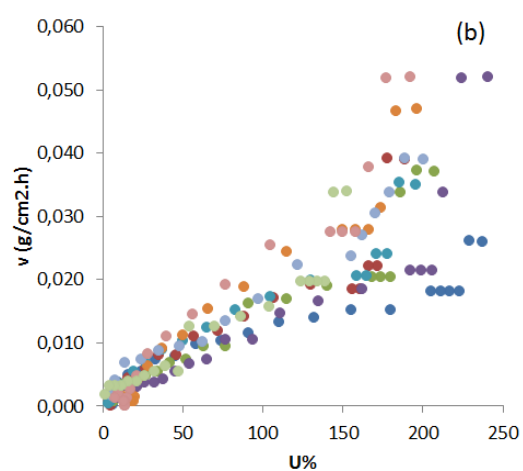
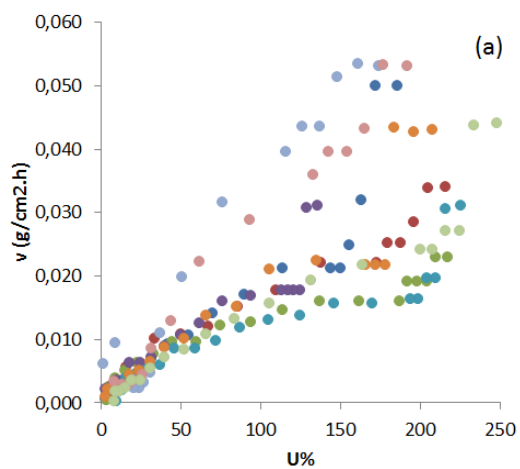
Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 40° com velocidade de circulação de ar de 1,2 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial: Ensaio T40-1,2 e (b) radial: Ensaio R40-1,2.



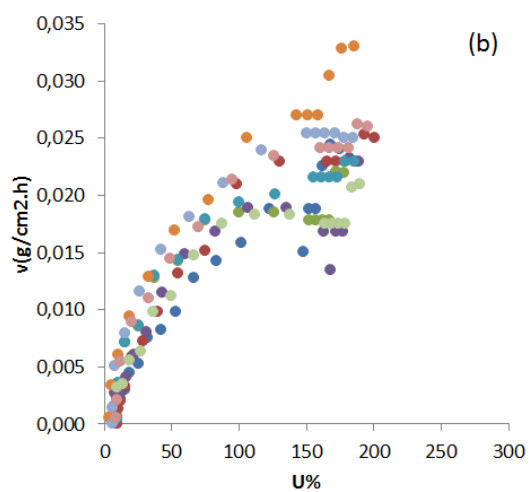
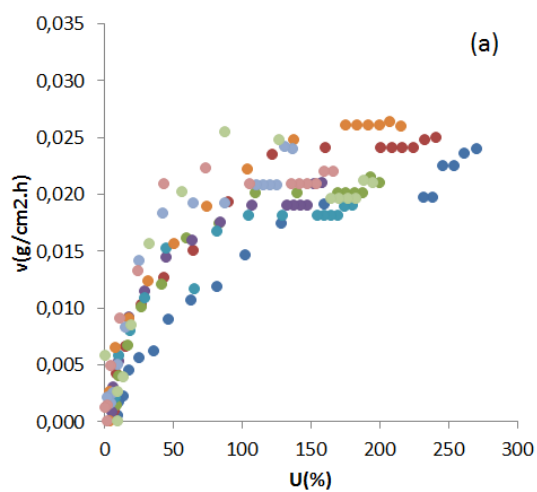
Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 60° sem ar de circulação forçada ( $u_{\infty}=0$ ), empregando o corte da madeira (a) tangencial: Ensaio T60-0 e (b) radial: Ensaio R60-0.



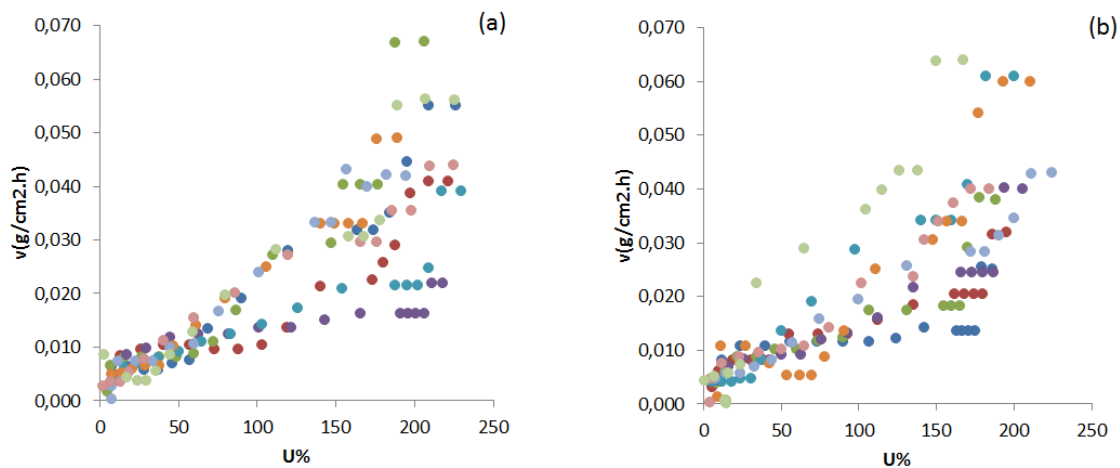
Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 60° com velocidade de circulação de ar de 0,6 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial: Ensaio T60-0,6 e (b) radial: Ensaio R60-0,6.



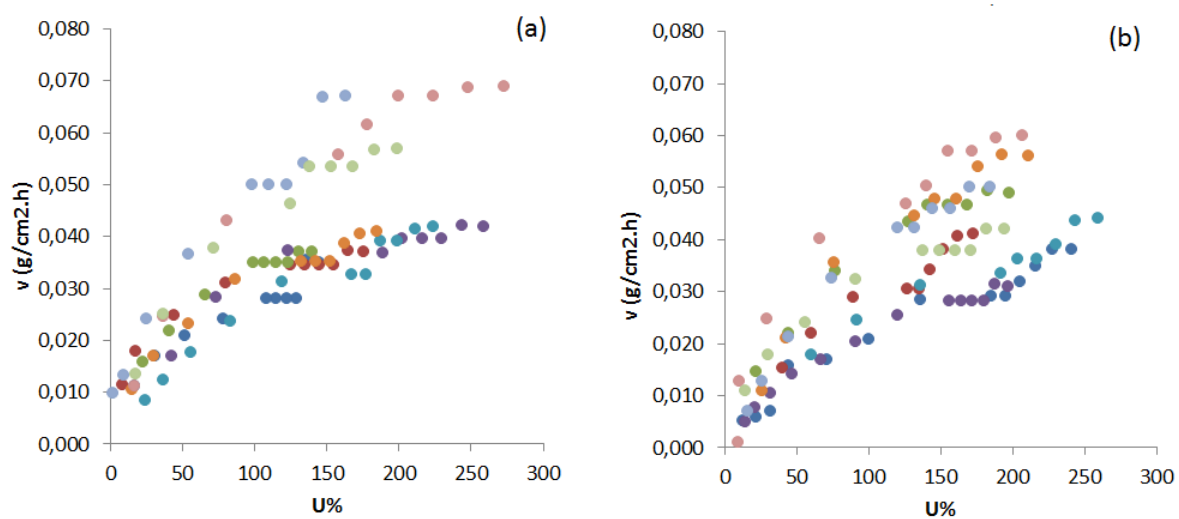
Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 60° com velocidade de circulação de ar de 1,2 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial: Ensaio T60-1,2 e (b) radial: Ensaio R60-1,2.



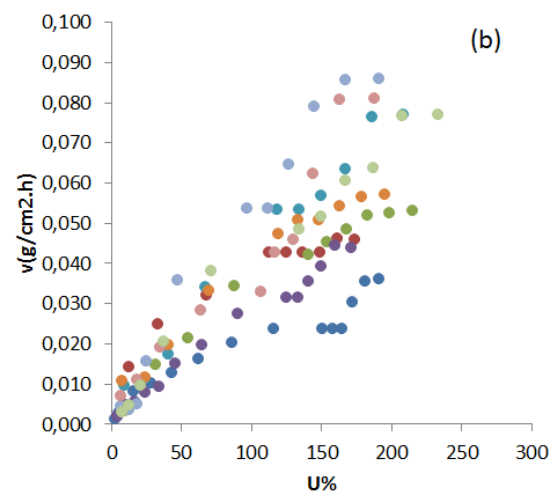
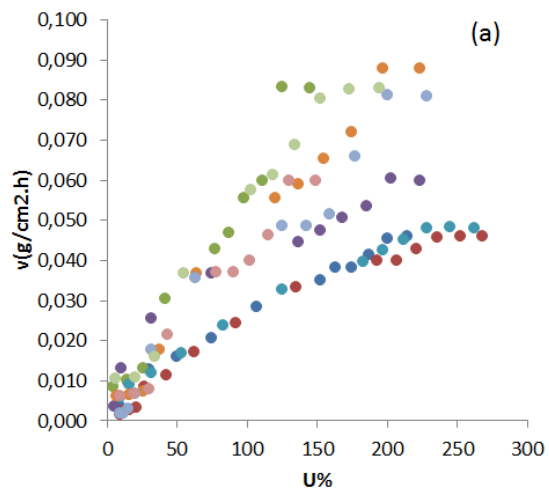
Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 80° sem ar de circulação forçada ( $u_{\infty}=0$ ), empregando o corte da madeira (a) tangencial: Ensaio T80-0 e (b) radial: Ensaio R80-0; sem velocidade de circulação de ar ( $u_{\infty}=0$ ).



Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 80° com velocidade de circulação de ar de 0,6 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial: Ensaio T80-0,6 e (b) radial: Ensaio R80-0,6.



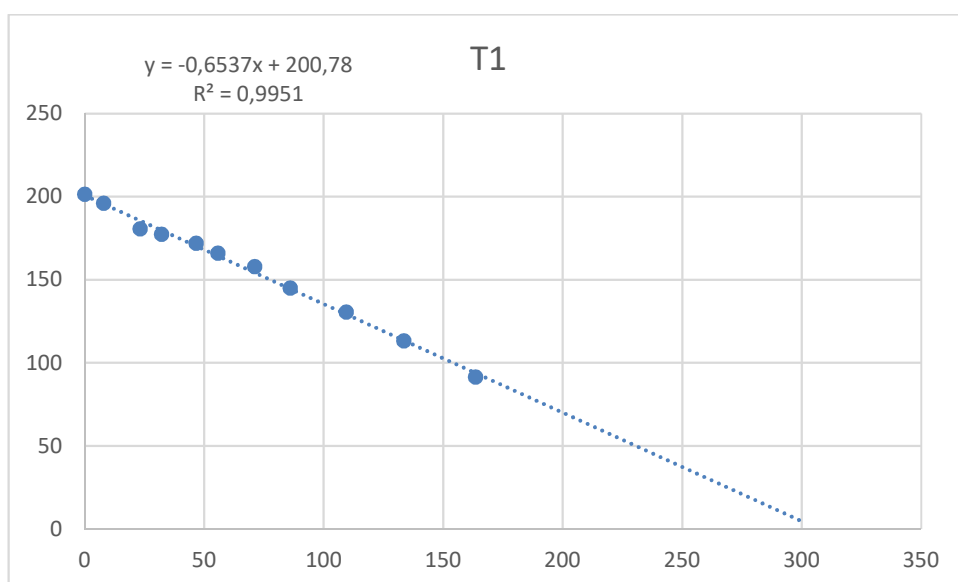
Velocidade de secagem da madeira de *Pinus taeda* a 80° com velocidade de circulação de ar de 1,2 m/s, empregando o corte da madeira (a) tangencial: Ensaio T80-1,2 e (b) radial: Ensaio R80-1,2.



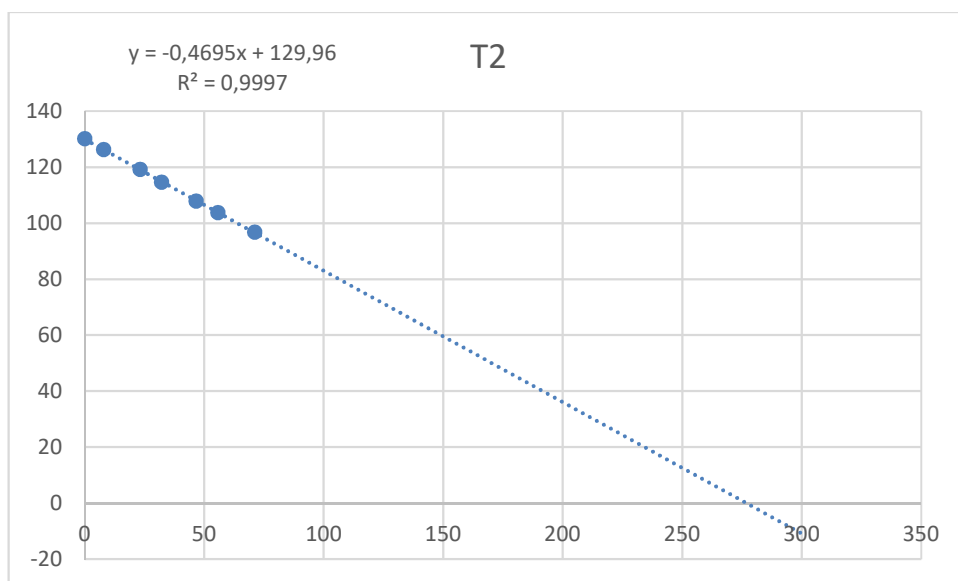
## APÊNDICE D

Exemplo da obtenção do valor médio de  $v_{m\acute{a}x}$  (U%/h) na secagem dos nove corpos de prova com corte tangencial (T1 a T9) conduzidos a 40°C e sem circulação forçada de ar ( $u_{\infty} = 0$ ): Ensaio T40-0. A linha pontilhada indica a tangente traçada ao conjunto de pontos experimentais utilizados para a estimativa de  $v_{m\acute{a}x}$  para cada um dos corpos de prova.

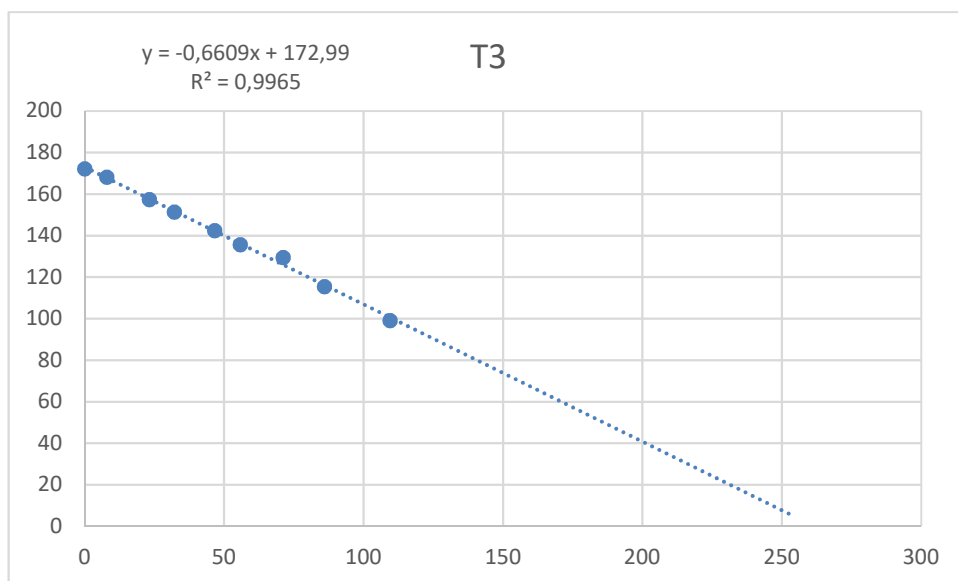
Variação do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 1 (T1) do Ensaio T40-0.



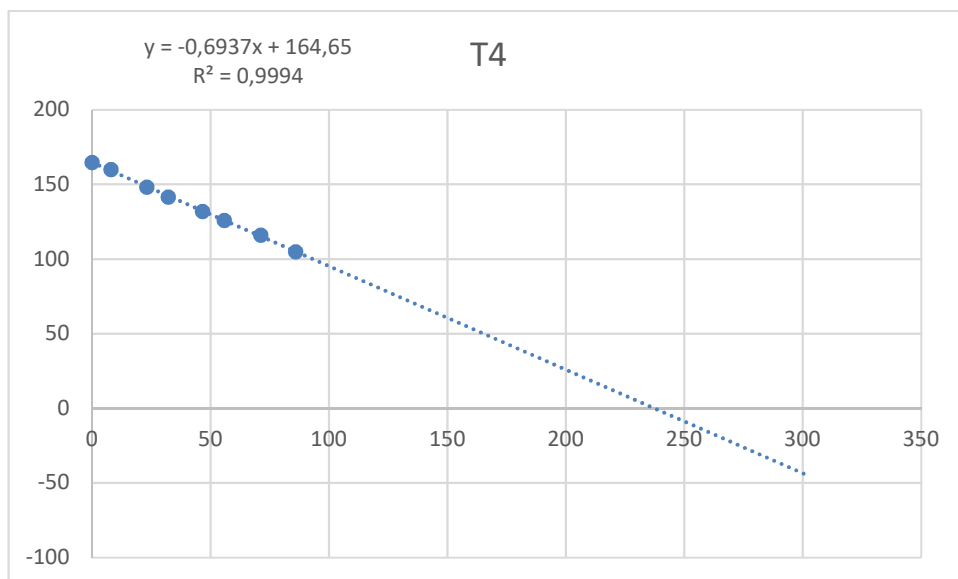
Variação do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 2 (T2) do Ensaio T40-0.



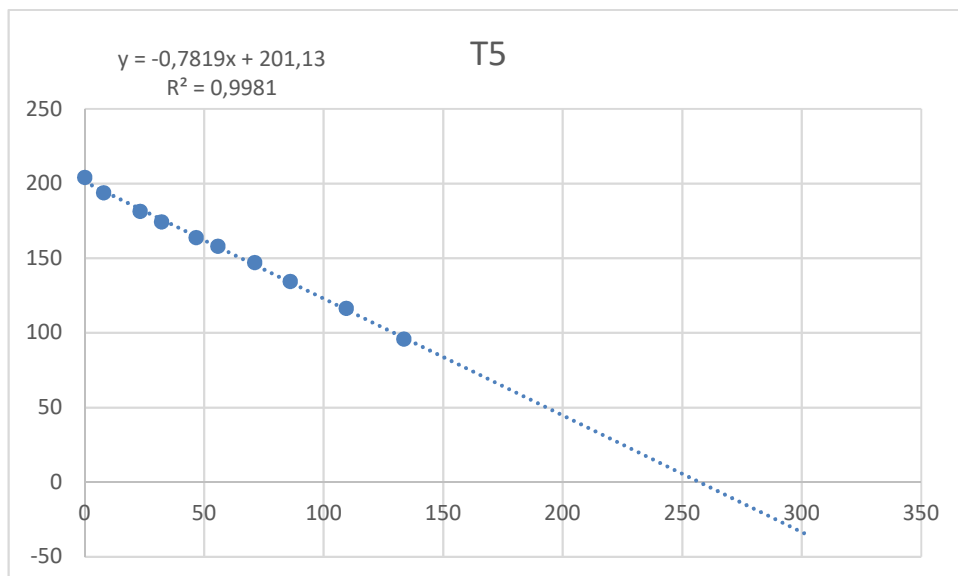
Variação do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 3 (T3) do ensaio T40-0.



Variação do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 4 (T4) do ensaio T40-0.

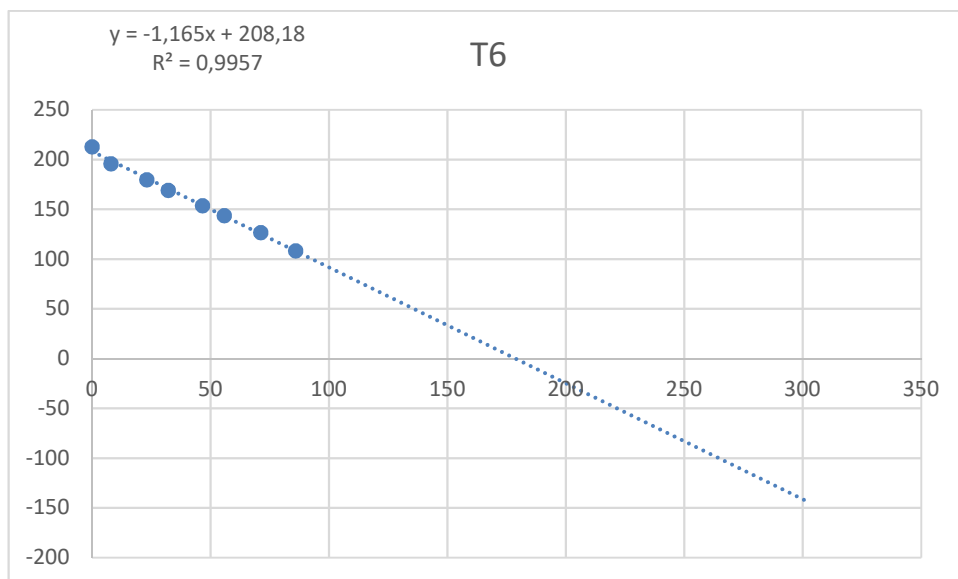


Variação do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 5 (T5) do ensaio T40-0.

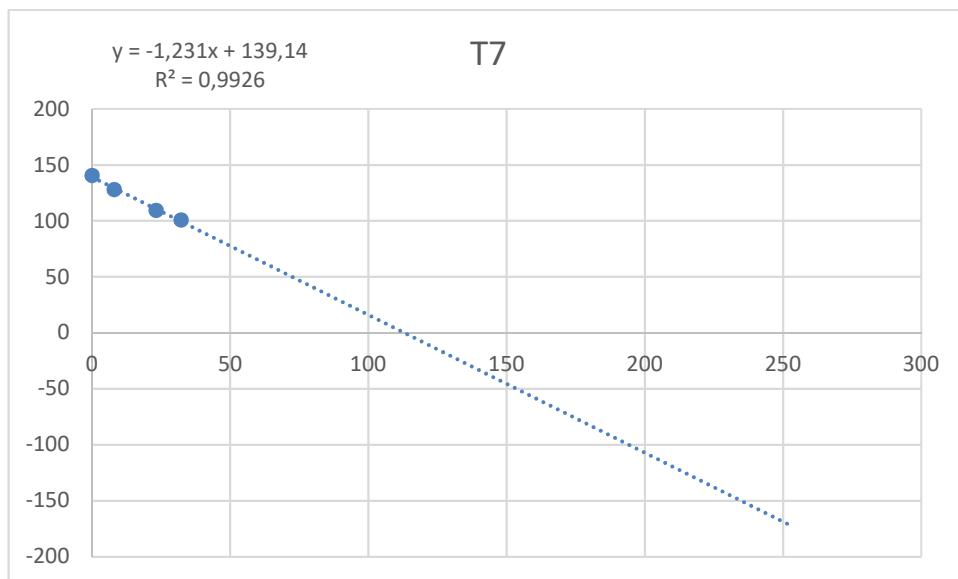




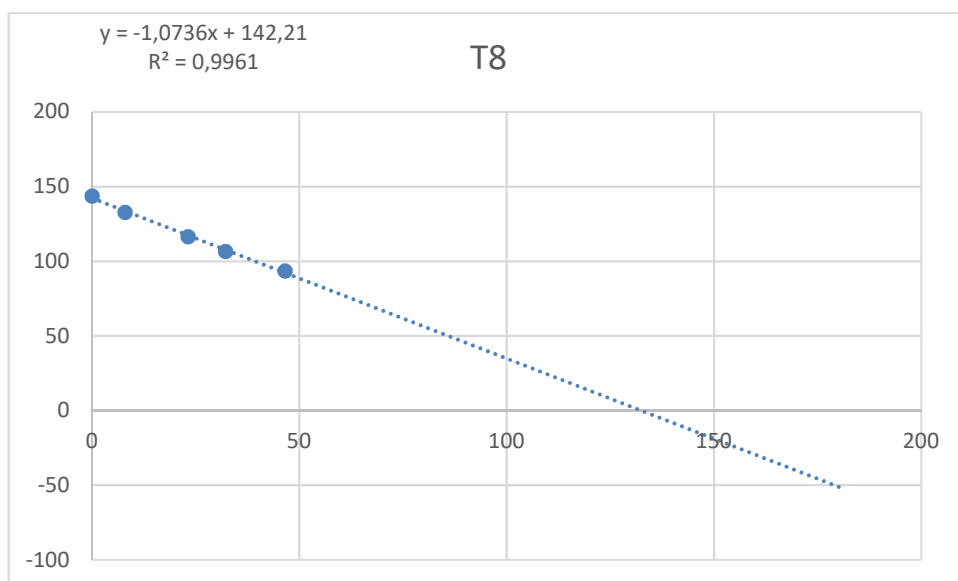
Varição do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 6 (T6) do ensaio T40-0.



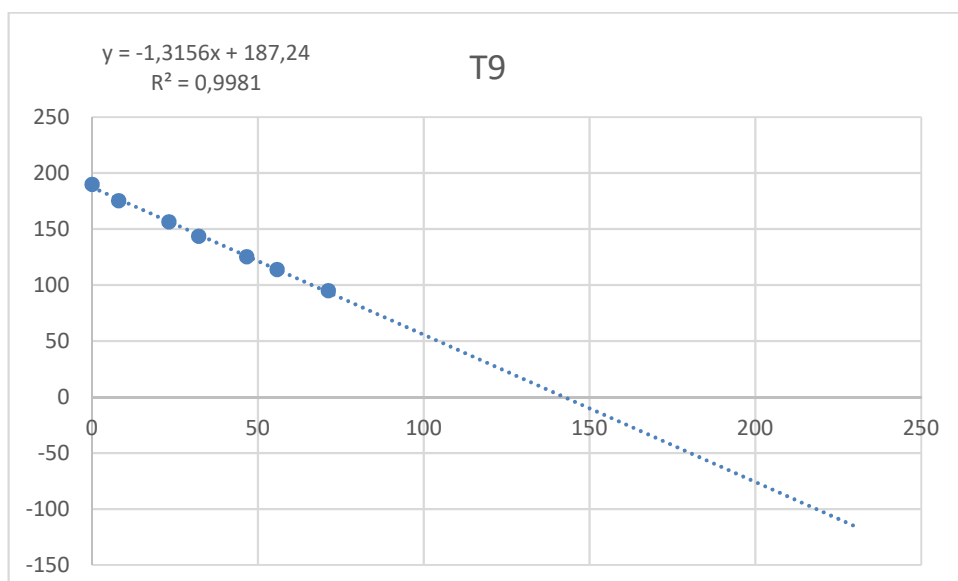
Varição do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 7 (T7) do ensaio T40-0.



Variação do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 8 (T8) do ensaio T40-0.



Variação do teor de umidade (U%) em função do tempo de secagem (t) para o corpo de prova 9 (T9) do ensaio T40-0.



**APÊNDICE E**

Cálculo do valor médio de  $v_{m\acute{a}x}$  para o ensaio T40-0.

Corpo de prova	$v_{m\acute{a}x}$ (U%/h)
T1	0,6537
T2	0,4695
T3	0,6609
T4	0,6937
T5	0,7819
T6	1,165
T7	1,231
T8	1,0736
T9	1,3156
Média	0,893877778
dp	0,304544544

## REFERÊNCIAS

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012 / ABRAF**. Brasília, 2013.

ANANÍAS, R. A.; SEPÚLVEDA, J. S.; VAZ, J. E. D. **Condicionantes de las grietas internas dentro de los anillos durante el secado de pino radiata**. Maderas. Ciencia y tecnología 9 (2):145-159, 2007.

ANDRADE, A. **Indicação de programas para secagem convencional de madeiras**. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2000.

AQUINO-GONZÁLEZ, L.V.; RODRIGUEZ-RAMÍREZ, J.; MÉNDES-LAGUNAS, L.L.; SANDOVAL-TORRES. **Evaluación de programas de secado para madera de calamite (*Pinus pseudostrobus*)**. Madera y Bosques 16 (2): 35-46, 2010.

CINIGLIO, G. **Avaliação da secagem de madeira serrada de *E. grandis* e *E. urophylla***. 69 f. Dissertação (Mestrado em ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1998.

**Comércio de madeira. Caminhos para uso responsável**. SINDIMA – Sindicato do comércio atacadista de madeiras do estado de São Paulo. Julho, 2013.

CURDY, M.C. **Efficient Kiln Drying of Quality Softwood Timber**. (Tese de Doutorado em Química e Engenharia de Processos) - University of Canterbury. Nova Zelândia. 2005.

DENIG, J.; WENGERT, E.M.; SIMPSON, W.T. **Drying Hardwood Lumber**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 138 f. Setembro, 2000.

DEPEC – Departamento de pesquisas e estudos econômicos do Banco Bradesco. **Indústria de Móveis**. Janeiro, 2017.

ELEOTÉRIO, J. R. **Modelagem e simulação do processo de secagem de madeiras serradas de espécies tropicais brasileiras**. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis S.C. 2009.

FERNANDES, L. P.; COSTA, V. J.; THOMAS, G. C. **Modelagem matemática da secagem de madeira em estufas – fase de aquecimento**. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering -- ENCIT 2006 Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering -- ABCM, Curitiba, Brasil, Dez. 5-8, 2006.

FIGUEROA, M. J. M. **Coeficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos a temperatura**. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis S.C. 2012.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 111 f., 1985.

GONZAGA, A.L., Madeira: Uso e Conservação. IPHAN/Monumenta, 2006.

IPT – Instituto de pesquisas tecnológicas. Informações sobre madeiras. Disponível em: <[http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=7](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7)>. Acesso em 19 abr. 2017.

JANKOWSKI, I.P. **Fundamentos de secagem de madeiras**. Documentos Florestais. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, junho 1990.

JANKOWSKI, I.P. **Melhorando a eficiência dos secadores para madeira serrada**. Circular Técnica – IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Número 191 – janeiro 2000.

JANKOWSKI, I.P.; GALINA, I. C. M. **Secagem de Madeiras**. Pimads, 2013.

JANKOWSKI, I. P.; SANTOS, G. R. V.; ANDRADE, A. **Secagem da madeira serrada de eucalipto**. Circular Técnica – IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Número 199 – dezembro 2003.

KEINE, S. **Avaliação do processo de secagem de madeira em estufa com banho de vapor**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis S.C. 1997.

KLITZKE, R. J. **Uso do inversor de frequência na secagem da madeira**. (Tese de Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, UFPR. Curitiba P.R. 2002.

MARTINS, V.A. **Secagem de madeira serrada**. Brasília: IBDF/DPq-LPF, 1988. 56p.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de pinus spp.** (Tese de Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba P.R. 2007.

MELO, C. R. C. **Controle e Instrumentação de sistemas de secagem de madeira na indústria moveleira**. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica). - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis S.C. 2005.

REMADE – Revista da Madeira. **Espécies de pinus spp mais plantadas no Brasil**. Edição n. 135, mai. 2013.

RÉMOND, R.; PASSARD, J.; PERRÉ, P. **The effect of temperature and moisture content on the mechanical behavior of wood: a comprehensive model applied to drying and bending**. European Journal of Mechanics A/Solis, v. 26, p. 558-572, 2007.

SANTINI, E. J. **Alternativas para monitoramento e controle do processo de secagem de madeira serrada em estufa.** (Tese de Doutorado em Ciências Florestais) -Universidade Federal do Paraná. Curitiba P.R. 1996.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. **Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *pinus elliottii* engelm.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 99-106, 2002.

SANTOS, A. S.; SILVA, F. A. P. R. C.; SIMONETTI, R. A.; ROBERT, R. C. G.; FANTINI, A, C. **Panorama do Comércio de Madeira Serrada na Microrregião Geográfica de Florianópolis-SC.** Floresta e Ambiente, 2014.

SANTOS, G. R. V. **Otimização da secagem da madeira de *eucalyptus grandis*.** (Dissertação de Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz. Piracicaba. SP. 2002.

**Secagem de serrados e lâminas de madeira** – Artigo técnico número 27. Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. Fórum Nacional das Atividades de Base Florestal. Novembro, 2004.

SIAU, J.F. **Transport processes in wood.** Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245p.

STAMM, A.J. **Wood and Cellulose Science.** New York: Ronald, 1964. 549 p.

TIME, B. **Higroscopic moisture transport in Wood.**(Tese de Doutorado em Engenharia)– Norwegian University of Science and Technology Norway. 1998.

TOMASELLI, Ivan. **Condições da Secagem Artificial de Madeiras Serradas no Paraná e Santa Catarina.** (Dissertação de Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná – Setor de Ciências Agrárias. Curitiba. PR. 1974.

TORRES, S. S. **Modelación matemática del secado convencional de mader.** Madera y Bosques 15(1), 75-89, 2009.

**Wood handbook - Wood as an Engineering Material.** General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, april 2010. 508 p.

## AUTORIZAÇÃO

Nome do autor: *LUIS FRANCISCO DE SOUZA*

RG: *2924935*

Título da Dissertação: *SECAGEM DE TÁBUAS DE PINUS TAEDA: EFÊITO DA TEMPERATURA, VELOCIDADE DO AR E SENTIDO DE CORTE DA MADEIRA SOBRE A VELOCIDADE DE SECAGEM E DEFEITOS GERADOS NO MATERIAL SECO*

Autorizo a Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, através da Biblioteca Universitária, disponibilizar cópias da dissertação de minha autoria.

Joinville, *30* de *MAIO* de 2018.

  
Assinatura do aluno

