

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA FLORESTAL

CÂMPUS DOIS VIZINHOS

CAROLINA BONATTO ARALDI

**PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA DE *Araucaria angustifolia*
TRATADA TERMICAMENTE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DOIS VIZINHOS

2014

CAROLINA BONATTO ARALDI

**PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA DE *Araucaria angustifolia*
TRATADA TERMICAMENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Flávia Alves Pereira

DOIS VIZINHOS

2014

A659p Araldi, Carolina Bonatto.

Propriedades físicas da madeira de *Araucaria angustifolia*
tratada termicamente – Dois Vizinhos: [s.n], 2014.

35 f.;il.

Orientadora: Flavia Alves Pereira
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Engenharia Florestal.
Dois Vizinhos, 2014.
Inclui bibliografia

1.Madeira- massa 2.Madeira-densidade 3.Degradação térmica
I.Pereira, Flavia Alves,orient.II.Universidade Tecnológica Federal
do Paraná – Dois Vizinhos. III.Título.

CDD: 674.12



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Dois Vizinhos
Curso de Engenharia Florestal



TERMO DE APROVAÇÃO

PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA DE *Araucaria angustifolia* TRATADA
TERMICAMENTE

por

CAROLINA BONATTO ARALDI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 17 de março de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal. O(a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Flávia Alves Pereira
Orientador(a)

Prof. Dr. Felipe Rodrigues Alcides
Membro titular (UTFPR)

Prof. Dr. Cilene C. Borges
Membro titular (UTFPR)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

**À Deus, por tudo ter se resolvido ao Seu tempo, à minha família pelo
apoio e à minha orientadora pela paciência...**

...dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela vida, amizade e por ter me guiado nessa jornada, por ter provido o essencial em minha vida e nunca ter faltado nada. Pelos momentos de aflições e ansiedades ter me dado calma e paciência para superá-los com confiança, sabendo que sempre estive e sempre estará ao meu lado.

Agradeço com grande carinho aos meus pais Miriam Bonatto Araldi e Ivanir Araldi, à minha irmã Mariam Bonatto Araldi, ao meu cunhado Davi Cantidiano Lopes Araldi, à minha sobrinha Alice Andrade da Silva Lopes e aos demais familiares que me apoiaram durante todos esses anos e que de alguma forma me ajudaram a ultrapassar mais um desafio em minha vida.

Agradeço a minha orientadora Flavia Alves Pereira, pela ajuda imensurável, pela disposição em ajudar, pelo conhecimento compartilhado durante esse tempo e sem contar pela amizade.

Agradeço aos professores que conheci ao longo dos anos, por terem marcado minha vida de alguma forma, talvez por um conselho, ou um conteúdo ensinado ou até mesmo por um sorriso ou abraço de boa sorte.

Agradeço aos amigos e servidores que me auxiliaram durante esse trabalho, Cilene Borges, Emanuel Francis Marques, Felipe Alcides Rodrigues, Maristela Rey Borin e Vanessa Padilha Salla.

Agradeço a empresa Araupel por ter fornecido matéria-prima para meu projeto, com certeza foi de grande valia.

Certamente estes parágrafos não contemplem a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida, portanto, peço desculpas aquelas que não foram citadas, mas podem estar certas que fazem parte de meu pensamento e de minha gratidão.

Meu sincero obrigado, pelos momentos que nunca irei esquecer e que certamente não teria chegado até aqui sem ter conhecido vocês.

E não sede conformados com este mundo, mas sede transformados pela renovação do vosso entendimento, para que experimenteis qual seja a boa, agradável, e perfeita vontade de Deus.

Romanos 12:2

RESUMO

ARALDI, Carolina Bonatto. **Propriedades físicas da madeira de *Araucaria angustifolia* tratada termicamente**. 2014. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dois Vizinhos, 2014.

Tratamentos térmicos podem ser utilizados para melhorar a resistência natural e a estabilidade dimensional das madeiras, mediante modificações dos seus constituintes químicos. O objetivo deste trabalho foi determinar as propriedades físicas da madeira de *Araucaria angustifolia*, antes e após serem tratadas termicamente, bem como analisar a influência das temperaturas de tratamento, sendo elas 200°C, 220°C e 240°C. Foram realizadas avaliações da umidade de equilíbrio, da perda de massa, da retratibilidade e da densidade pelo método de medição direta do volume por paquímetro nas diferentes temperaturas da madeira tratada. Como resultado, observou-se que a densidade encontrada foi de 0,41g/cm³ a 240°C. A higroscopicidade das peças que receberam o tratamento térmico reduziu e, entretanto a estabilidade dimensional foi estatisticamente melhorada. A diferença da perda de massa entre a maior e a menor temperatura de tratamento foi igual a 5,41%. O tratamento térmico é recomendado para diminuir a umidade de equilíbrio higroscópico da madeira, entretanto há necessidade de que outros estudos relacionados às propriedades mecânicas desse material sejam realizados.

Palavras-chave: Perda de massa. Retratibilidade Volumétrica. Densidade. Umidade. Degradação Térmica

ABSTRACT

ARALDI, Carolina Bonatto. **Physical properties of *Araucaria angustifolia* wood heat treated.** 2014. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Federal Technology University - Paraná. Dois Vizinhos, 2014.

Heat treatments can be used to enhance the natural resistance and dimensional stability of the wood by changes its chemical constituents. The objective of this study was to determine the physical properties of the wood of *Araucaria angustifolia*, before and after being heat treated, and analyze the influence of the treatment temperatures, these being 200°C, 220°C and 240°C. Reviews the equilibrium moisture content were performed, the loss of mass, the shrinkage and density by the method of direct measurement of volume by caliper at different temperatures of treated wood. As a result, it was observed that the density was found to be 0.41g/cm³ to 240°C. The hygroscopicity of the parts receiving the heat treatment reduced, and however, the dimensional stability was statistically improved. The difference in weight loss between the highest and lowest temperature treatment was equal to 5.41%. The heat treatment is recommended to reduce the hygroscopic equilibrium moisture content of wood, however there is need for other related to the mechanical properties of this material studies are performed.

Keywords: Mass loss. Volumetric shrinkage. Density. Moisture. Degradation of the Wood.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios da umidade de equilíbrio da madeira de <i>Araucaria Angustifolia</i>	25
Tabela 2 – Valores médios da perda de massa da madeira de <i>Araucaria angustifolia</i> tratada termicamente em função da temperatura.....	27
Tabela 3 – Valores da densidade básica da madeira de <i>Araucaria angustifolia</i> tratada termicamente.....	29
Tabela 4 – Valores médios da retratibilidade volumétrica da madeira de <i>Araucaria angustifolia</i> tratada termicamente.....	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 TRATAMENTO TÉRMICO	14
3.2 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DA MADEIRA.....	16
3.3 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A DENSIDADE DA MADEIRA	16
3.4 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A PERDA DE MASSA	17
3.5 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA	18
3.6 MADEIRA ESTUDADA.....	18
4 METODOLOGIA	20
4.1 PREPARO DO MATERIAL.....	20
4.2. TRATAMENTO TÉRMICO	21
4.3 PERDA DE MASSA DA MADEIRA	21
4.4 UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DA MADEIRA	22
4.5 DENSIDADE BASICA E RETRATIBILIDADE DA MADEIRA	22
4.6 PROCESSAMENTO DOS DADOS	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.2 UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DA MADEIRA	26
5.3 PERDA DE MASSA DA MADEIRA	27
5.4 PERDA DE MASSA X UMIDADE DE EQUILÍBRIO	29
5.5 DENSIDADE BASICA DA MADEIRA	30
5.6 RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA DA MADEIRA.....	31

6 CONCLUSÃO	33
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material orgânico e heterogêneo, composto principalmente, por celulose, hemiceluloses e lignina. Quando exposta aos ambientes com elevados teores de umidade, variações dimensionais podem ocorrer devido às sorções de moléculas de água, dispersas no meio, na parede celular. Pesquisas têm sido desenvolvidas objetivando aumentar a estabilidade dimensional destas peças. Além disso, é requerido que as novas técnicas de tratamento da madeira contemplem o aumento da resistência aos agentes biodeterioradores com menor utilização de produtos químicos ou sem a presença destes. Neste contexto, destacam-se os tratamentos térmicos.

O tratamento térmico consiste no aquecimento da madeira em temperatura suficiente para que ocorram degradações parciais dos constituintes químicos. As hemiceluloses são os componentes mais instáveis termicamente, devido ao seu baixo peso molecular e estrutura mais ramificada em relação aos demais. Entretanto, outras modificações físicas e químicas poderão ocorrer e suas magnitudes dependem dos procedimentos adotados em função da temperatura, tempo de tratamento, velocidade de aquecimento e propriedades iniciais da madeira.

As principais vantagens do tratamento térmico é que este confere à madeira menor higroscopicidade, maior estabilidade dimensional, maior resistência biológica e alteração a cor. Essa técnica pode ser usada para agregar valor a algumas madeiras, por exemplo, à Araucaria, contribuindo para a menor ocorrência de deformações, como também para o aumento da resistência a fungos e insetos.

Apesar de pouco difundido no Brasil, os termo-tratamentos vêm sendo estudados desde a década de 40, porém são de grande aceitação no Canadá e em alguns países europeus, dentre eles Finlândia, Alemanha e França. Nestes, os tratamentos térmicos iniciaram seu processo em escala industrial no início do ano 2000 e nomeiam as madeiras de acordo com o interesse da empresa, como envelhecimento controlado, tropicalização de coníferas, conversão de madeiras leves para nativas e tratamento ecológico sem químicos (TWBRAZIL, 2010, p.3).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar as propriedades físicas da madeira de *Araucaria angustifolia* tratadas termicamente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito da temperatura do tratamento térmico sobre a umidade de equilíbrio higroscópico das madeiras.

- Avaliar o efeito da temperatura do tratamento térmico sobre a perda da massa das madeiras.

- Avaliar o efeito da temperatura do tratamento térmico sobre a densidade das madeiras.

- Avaliar o efeito da temperatura do tratamento térmico na retratibilidade volumétrica das madeiras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TRATAMENTO TÉRMICO

Segundo a Associação Brasileira de Preservadores de Madeira – ABPM, “preservar a madeira é adotar técnicas para protegê-la, quando em uso, de agentes deterioradores que podem ser de natureza química, física ou biológica”. A preservação da madeira além de permitir o aumento do tempo de vida útil dos produtos madeireiros, auxilia indiretamente na conservação dos recursos florestais.

A madeira é um material heterogêneo que possui diferentes tipos de células adaptadas a desempenharem funções específicas na árvore como rigidez, crescimento e proteção. Essas células estão dispostas nos três sentidos da madeira, radial, tangencial e longitudinal e estão ligadas entre si pela lignina (FIGUEROA & MORAES, 2009, p. 158).

As madeiras são compostas, principalmente, por polímeros de celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos. Quando submetida a tratamentos térmicos, diferentes mudanças podem ocorrer nesses constituintes químicos. A madeira começa a sofrer degradação térmica a partir de 180°C com a liberação de dióxido de carbono, ácido acético e alguns componentes fenólicos (ARAÚJO, 2010, p.10).

As hemiceluloses são os primeiros constituintes a sofrerem modificações com o aumento da temperatura, devido a sua estrutura ser, em maior quantidade, ramificada e possuir um menor peso molecular. A degradação das hemiceluloses diminui a afinidade da madeira com as moléculas de água, o que interfere diretamente na diminuição da sua higroscopicidade (MORAES & SILVA, 2011, p. 5).

À medida que a temperatura é elevada, a madeira apresenta alterações nas suas propriedades como, redução da higroscopicidade e aumento na estabilidade dimensional e também na resistência à organismos xilófagos. Contudo, esse aquecimento pode ocasionar diminuição das propriedades mecânicas (VILAS BOAS, 2011, p.5).

BORGES & QUIRINO (2004, p. 178) submeteram uma amostra de madeira tratada e uma não tratada termicamente à mesma condição de umidade. Os autores observaram que a amostra tratada com calor atingiu um teor de umidade de

equilíbrio menor do que na amostra não tratada, ou seja, conferiu maior estabilidade dimensional.

Os tratamentos térmicos podem ocasionar o escurecimento da madeira (Figura 1) pela condensação da lignina e compostos fenólicos, podendo ser favorável, pois agrega valor a algumas espécies, tornando-as interessantes para aplicações diferenciadas (MENDES, 2010, p. 49).

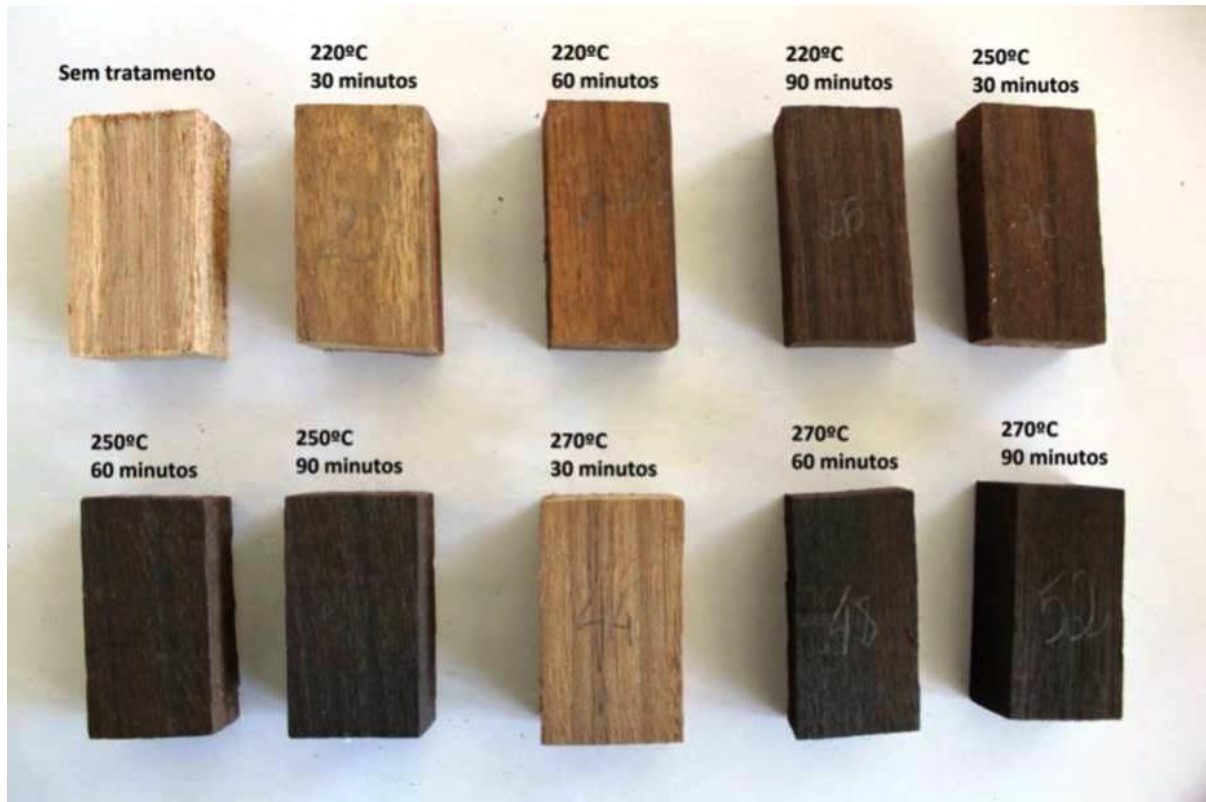


Figura 1 Escurecimento da madeira em relação ao aumento da temperatura e tempo de tratamento térmico.

Fonte: MORAES & SILVA (2011, p.17).

Borges & Quirino (2004, p.5), comentam que a madeira retificada termicamente é obtida pelo princípio da termodegradação de seus constituintes na ausência de oxigênio ou forte deficiência de ar. Os autores definem também, como uma pirólise controlada, que é interrompida antes de atingir a combustão espontânea da madeira.

Embora o termo tratamento térmico sugira uma única metodologia, estes podem diferir entre si em relação a diferentes fatores, como teor de umidade inicial

da madeira, condições da atmosfera, temperatura, espécie de madeira, processo utilizado no tratamento, duração de exposição, velocidade do aumento da temperatura e grau de modificação que se pretende (PEREIRA, 2013, p. 6).

A madeira quando aquecida sob determinadas condições de temperatura, tempo, pressão e umidade pode promover alterações ditas permanentes (TAKESHITA, 2011, p. 28).

Uma vez tratada termicamente, a madeira pode ser usada para revestimentos, confecção de paredes à prova de som, assoalhos, terraços, decks de barcos, móveis para jardim, batentes de porta e janela, parques infantis, móveis externos e internos, portões, cercas, instrumentos musicais, dentre outros (ARAÚJO, 2010, p.2).

3.2 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DA MADEIRA

A umidade relativa do ar, a temperatura do ambiente, a espécie utilizada, a quantidade de extrativos, as tensões mecânicas e a radiação são fatores que influem na umidade de equilíbrio da madeira. A umidade relativa e a temperatura são, entretanto, os fatores de maior relevância (GALVÃO, 1975, p. 2).

O tratamento térmico reduz a higroscopicidade da madeira através da degradação de seu constituinte mais hidrófilo, as hemiceluloses (BORGES & QUIRINO, 2004, p.1).

A elevação da temperatura da madeira reduz a umidade de equilíbrio, para uma considerada umidade relativa, e uma permanente redução na higroscopicidade da madeira após retornar para temperatura normal (TAKESHITA, 2011, p.16).

3.3 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A DENSIDADE DA MADEIRA

A partir do conceito físico mais elementar, podemos conceituar a densidade como quantidade de material lenhoso contido na unidade de volume. Essa propriedade física da madeira é um dos índices mais importantes a ser considerado, por interferir na qualidade dos produtos derivados (MORAES E SILVA, 2011).

Madeiras submetidas aos tratamentos térmicos tendem a ter sua densidade diminuída devido a diferentes fatores como, degradação parcial de hemiceluloses, celulosas e lignina, reticulações entre os elementos, evaporação de extrativos (Araújo, 2010, p. 32). Por outro lado, Brito et al. (2006, p.186), diz que com o aumento do calor durante o tratamento térmico da madeira, a temperatura pode não ser suficiente para causar uma perda de massa na medida em que se reduz o volume da madeira, resultando em um aumento da densidade.

A perda percentual da densidade da madeira durante o processo do tratamento térmico deve ser considerada de acordo com o uso empregado à madeira, pelo fato da mesma perder resistência mecânica, dificultando seu uso estrutural.

3.4 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A PERDA DE MASSA

As fases da pirólise da madeira podem ser identificadas pela sua perda de massa, que ocorre por influência das reações químicas verificadas na elevação da temperatura (BRITO et al., 2006, p.1; TAKESHITA, 2011, p.32).

O calor no processo de tratamento térmico causa alterações na madeira e, quanto maior for a temperatura de tratamento, maiores serão as modificações. Uma mudança macroscópica importante a ser analisada é a perda de massa da madeira tratada termicamente, pois terá como consequência direta mudanças na densidade da madeira (ROGERIO DA SILVA, 2012, p.120).

O tratamento térmico reduz a massa da madeira, pois volatiliza os componentes constituintes da madeira. Essa perda é geralmente mais intensa quando a madeira é tratada em temperaturas superiores a 180°C, além do tempo no qual as amostras ficam expostas ao tratamento (OLIVEIRA, 2009, p. 47).

3.5 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA

A perda de água é um dos efeitos do tratamento térmico de madeiras e que promovem variações distintas na retratibilidade em função da espécie e da umidade da madeira (OLIVEIRA, 2009, p.48).

O termo-tratamento aumenta significativamente a estabilidade dimensional da madeira devido a redução na sua higroscopicidade, ocasionada pela degradação da hemiceluloses e outras modificações ocorridas na estrutura da madeira (ARAÚJO, 2010, p 5)

3.6 MADEIRA ESTUDADA

A *Araucaria angustifolia* é uma conífera pertencente à família Araucariaceae e é também conhecida como Pinheiro-do-Paraná ou Pinheiro-Brasileiro. Esta espécie é nativa do estado do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, contudo fragmentos podem ser encontrados em São Paulo, Minas Gerais e Argentina.

A densidade média de sua madeira é igual a $0,50\text{g/cm}^3$, a 15% de umidade e possui incremento médio anual de 14 a $30\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$. Possui ciclo de vida longo, cerca de 200 a 300 anos e a maioria é dióica, raramente encontra-se monóica. Esta espécie pode alcançar 50 metros de altura e possui um tronco que raramente se ramifica.

A distribuição geográfica da araucária está relacionada principalmente ao clima, adaptando-se ao subtropical mesotérmico ou superúmido, que se caracteriza pela estacionalidade térmica, com verões amenos e invernos frios, além de precipitação abundante e bem distribuída ao longo do ano (OLIVEIRA, 2007, p.50). Por ser heliófita, suporta pouco sombreamento para ter um bom crescimento, e este

apenas nos primeiros meses. Preferem solos argilosos, ricos em matéria orgânica e bem drenados, sendo que os valores máximos e mínimos de precipitação vão de 1.300 a 1.700 milímetros e suportam geadas de até -10°C (DAMIN DA SILVA et al., 2001, p. 63; BASSO, 2010, p. 3).

A araucária sempre esteve associada ao uso madeireiro e por muito tempo foi um dos produtos mais importantes na exportação brasileira, além de ser a conífera mais valiosa de ocorrência natural no país. Segundo Balbuena (2009, p.8), a madeira é muito atrativa para a indústria de celulose e papel, contendo 58% de celulose, 29% de lignina e fibras longas de alto rendimento em celulose.

O uso de sua madeira foi muito amplo, hoje, porém, é escasso, salvo alguns construtores inconscientes dos danos ambientais que provocam. Um dos maiores motivos de sua mínima exploração nos dias atuais deve-se ao reflorestamento com Pinus e Eucalipto, cuja madeira bem inferior, serve e pode servir para substituir a madeira da araucária (BASSO, 2010, p 5).

A araucária encontra-se na lista brasileira de espécies ameaçadas de extinção, o que causou a diminuição e até a proibição de seu corte. Por esse motivo, ressalta-se o grande potencial madeireiro e alimentício da espécie na silvicultura e as pesquisas que estão se desenvolvendo são de grande importância para que seu manejo e para que a implantação seja conduzida de maneira correta.

Além do uso madeireiro, como laminados ou madeira serrada, a araucária pode ser empregada na fabricação de papel; como fonte de alimento, através do uso do pinhão; medicinal, tanto humana quanto para fauna; como combustível, empregando-se os nós que possuem alto poder calorífero; no artesanato e para ornamentação; na recuperação de áreas degradadas; além do grande interesse histórico e cultural. A madeira não é apreciada como combustível, pois apresenta baixo poder calorífero.

Embora a madeira de *A. angustifolia* seja facilmente atacada por fungos apodrecedores e insetos xilófagos (cupins e brocas), ela é altamente permeável a preservativos (SOARES et al., 2011, p.449). A madeira também apresenta tendência a rachaduras na secagem que deve ser controlada em ambiente artificial.

4 METODOLOGIA

4.1 PREPARO DO MATERIAL

As tábuas de *Araucaria angustifolia* são oriundas de floresta plantada e foram cedidas por uma empresa madeireira, localizada no município de Quedas do Iguaçu, Paraná.

Na marcenaria na UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Dois Vizinhos, as tábuas foram serradas, aplainadas e cortadas em corpos de prova com dimensões de 8x3x1cm (Figura 2). Estes foram lixados, classificados e eliminou-se os que apresentavam defeitos como rachaduras, nós, empenos, incidência de insetos e manchas.

Os corpos de prova foram climatizados em umidade relativa de $65 \pm 5\%$ e temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$, até atingirem peso constante de acordo com a NBR 7190/1997 – Projetos de Estrutura de Madeira. Em seguida, os comprimentos, as larguras e as espessuras bem como o peso foram determinados com o uso de paquímetro digital com precisão de 0,01mm e balança analítica.

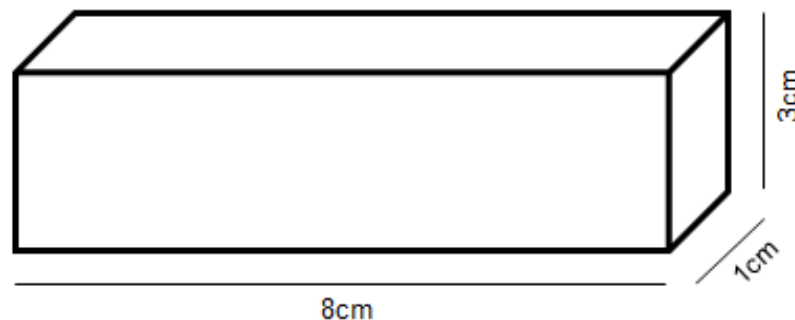


Figura 2 Corpo de prova nas dimensões de 8x3x1cm

Fonte: ARALDI, 2014 (o autor).

4.2. TRATAMENTO TÉRMICO

Os corpos de prova selecionados foram destinados ao tratamento térmico e separados em quatro tratamentos como segue:

T₀= 25 repetições não tratadas termicamente (testemunha);

T₁= 25 repetições tratadas termicamente a 200°C;

T₂= 25 repetições tratadas termicamente a 220°C;

T₃= 25 repetições tratadas termicamente a 240°C.

As amostras foram dispostas em mufla laboratorial com controle de temperatura, de acordo com os tratamentos listados acima, durante uma hora. Os corpos de prova foram embalados em papel alumínio para minimizar o contato direto com o oxigênio, por ser este um comburente.

Depois de retiradas da mufla, os corpos de prova foram colocados novamente em câmara climática (20°C e 65% de umidade relativa), permanecendo até atingir a umidade de equilíbrio higroscópico do material.

4.3 PERDA DE MASSA DA MADEIRA

Antecedendo cada tratamento térmico e posteriormente a realização de cada um deles, as amostras foram climatizadas a 20°C e 65% de umidade relativa e então pesadas e medidas a largura, espessura e comprimento, segundo metodologia descrita por ARAÚJO (2010, p.26).

A avaliação foi realizada com os tratamentos T1, T2 e T3, com um total de 75 repetições, sendo 25 corpos de prova em cada. A perda de massa foi determinada a partir da fórmula 1.

$$PM = \left(\frac{M_s - M_t}{M_s} \right) \times 100 \quad (\text{Fórmula 1})$$

Onde:

PM= perda de massa (%)

Ms= massa seca da madeira (g)

Mt= massa da madeira após o tratamento térmico (g)

4.4 UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DA MADEIRA

Para a determinação da umidade de equilíbrio higroscópico da madeira, foram utilizadas 20 repetições de madeiras tratadas de cada tratamento, totalizando 80 corpos de prova.

A determinação do teor de umidade de equilíbrio é a relação entre o peso da água contida na madeira e seu peso em estado completamente seco, expresso em porcentagem. A expressão algébrica para o cálculo está descrito na fórmula 2.

$$U_{eq} = \left(\frac{P_u - P_s}{P_s} \right) \times 100 \quad (\text{Fórmula 2})$$

Onde:

Ueq= umidade de equilíbrio (%)

Pu= peso úmido a 12% (g)

Ps= peso seco (g)

4.5 DENSIDADE BASICA E RETRATIBILIDADE DA MADEIRA

Os corpos de prova foram imersos em água destilada, onde permaneceram até atingirem massa constante, ou seja, até que atingissem a capacidade máxima de

saturação da madeira em água que ocorreu em cerca de três semanas. Para este ensaio três repetições foram utilizados.

Procedeu-se então a mensuração das dimensões das peças, com faces formando ângulo de 90° entre si, com o uso de paquímetro de 0,01 mm de precisão, as medidas tomadas foram a altura, largura e o comprimento de cada amostra completamente saturada, para o cálculo do volume máximo. Em seguida, elas foram secas em estufa a 100°C, até massa constante, quando tiveram suas dimensões novamente mensuradas para o cálculo do volume no estado anidro. Nessa fase procedeu-se também à determinação das massas dos corpos-de-prova.

Os valores obtidos para massas e volumes foram então usados para as determinações de densidade básica pelo método de medição direta do volume e retratibilidade das madeiras, conforme as fórmulas 3 e 4, respectivamente.

O cálculo da densidade básica baseou-se na metodologia descrita por Trugilho et al. (1990, p.310) (Fórmula 3).

$$D = \frac{Ms}{V_{sat}} \quad (\text{Fórmula 3})$$

$$V_{sat} = \text{Largura} \times \text{Comprimento} \times \text{Espessura}$$

Sendo:

D = densidade básica (g/ cm³)

Ms = massa seca da amostra (g)

V_{sat} = volume saturado (cm³)

O cálculo de retratibilidade foi realizado conforme descrito na NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira (Fórmula 4).

$$Rv = \left(\frac{V_{sat} - V_s}{V_{sat}} \right) * 100 \quad (\text{Fórmula 4})$$

Em que:

R_v = retratibilidade volumétrica (%)

V_{sat} = volume da amostra em seu estado saturado (g/cm³)

V_s = volume seco da amostra após secagem em estufa (g/cm³).

4.6 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O experimento foi conduzido em DIC - Delineamento Inteiramente Casualizado. Os dados foram analisados através do Teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises foram processadas no *software* estatístico Assistat[®] (SILVA & AZEVEDO, 2006).

Para análise dos tratamento térmico, três temperaturas (200, 220 e 240°C e testemunha) foram utilizadas, com 25 repetições cada um, totalizando 100 corpos de prova. Para a perda de massa, 25 repetições foram utilizadas para cada tratamento, totalizando 75 corpos de prova. Na avaliação da umidade de equilíbrio higroscópico da madeira, utilizou-se 20 repetições por tratamento, num total de 80 corpos de prova e para a densidade básica e retratibilidade da madeira três repetições, para cada temperatura, totalizando 12 corpos de prova.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TRATAMENTO TÉRMICO

Quando a madeira foi submetida ao tratamento térmico, verificou-se a migração de extrativos para a superfície de três corpos de prova (Figura 3). Este fato também observado por Oliveira (2009, p.93) e Araújo (2010, p.16), que afirmam que a maioria dos extrativos, por não serem componentes estruturais da madeira, evapora facilmente durante o tratamento térmico. A Araucária por possuir baixo teor de extrativos, esse resíduo pode ter sido advindo de algum nó presente na madeira.



Figura 3 Migração dos extrativos ocorrida durante o tratamento térmico da madeira de *Araucaria angustifolia*.

Fonte: ARALDI, 2014 (o autor)

Os tratamentos térmicos comerciais de madeiras são realizados geralmente abaixo de 230°C e são aplicados com o intuito de aumentar a resistência e vida útil das peças. Acima deste valor de temperatura, a madeira se enfraquece por conta da degradação da matriz lignocelulósica (SOARES, 2011, p.451).

SORATTO (2012, pg.32) afirma que durante a decomposição térmica da madeira pode haver geração de produtos como monóxido de carbono, ácido acético, metano e alcatrão.

Observou-se que houve mudança na coloração da madeira. Quanto mais se elevava a temperatura de tratamento, mais escura a madeira ficava. Borges & Quirino (2004, p.10) e Moraes & Silva (2011, p.5), também notaram esse escurecimento. Possivelmente isso se deve a degradação de compostos fenólicos presentes na madeira, que ao serem dispostos à temperaturas elevadas conferem cores mais enegrecidas ao material.

5.2 UMIDADE DE EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DA MADEIRA

Os teores de umidade de equilíbrio das madeiras tratadas termicamente e a testemunha foram afetados pelo tratamento térmico, ocorrendo interações significativas (Tabela 1).

Tabela 1 Valores médios da umidade de equilíbrio da madeira de *Araucaria angustifolia* tratada termicamente.

TRATAMENTO	UMIDADE DE EQUILÍBRIO (%)
Testemunha	11.56 a
200°C	9.64 b
220°C	8.47 c
240°C	7.28 d
MÉDIA GERAL	9.23
CV(%)	6.24

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$). Onde: CV(%): coeficiente de variação em percentagem.

Segundo Repellin & Guyonnet (2005) apud Soratto (2012, p.30), durante os tratamentos térmicos pode haver degradação de hemiceluloses e modificação da

estrutura da lignina que, mesmo tendo pouca afinidade com a água, passa por um rearranjo e o resultado é uma menor higroscopicidade da madeira.

A maior umidade de equilíbrio foi observada na testemunha, com 11,56%, enquanto nas madeiras tratadas a 200°C, 220°C e 240°C os teores foram iguais a 9,64%, 8,47% e 7,28%, respectivamente. Isso representa uma redução de aproximadamente 17%, 27% e 37% em relação à testemunha. Possivelmente, isso se deve a maior degradação dos constituintes mais hidrofílicos da madeira, à medida que a temperatura era elevada. Dessa forma, menor foi a quantidade de moléculas de água adsorvidas na parede das células.

Mendes (2010, p.73), em trabalho realizado com madeira de *Pinus taeda* tratadas termicamente, também observou diferenças significativas entre os teores de umidade à medida que a temperatura foi aumentando. Entretanto, na temperatura de 240°C o teor de umidade observado pelo autor foi menor ao verificado neste trabalho, com 5,7%. Isso se deve, provavelmente, às diferenças estabelecidas em cada tratamento como ambiente, tempo e espécie.

Modes (2010, p.48), afirma que houve redução da umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura, em madeiras de diferentes espécies de pinus.

5.3 PERDA DE MASSA DA MADEIRA

A análise de variância indicou que a perda de massa das madeiras foi afetada pelos tratamentos térmicos (Tabela 2). De modo geral, observou-se que a degradação térmica das madeiras foi maior nas temperaturas mais elevadas.

A proporção da degradação térmica está ligada a perda de massa da madeira, durante o tratamento. Desse modo, observou-se que houve maior degradação dos constituintes químicos na temperatura de 240°C e menor degradação na temperatura de 200°C, com teores iguais a 8,41% e 3%, respectivamente. Sugere-se que isso se deve a maior degradação, principalmente, das hemiceluloses que se degradam mais facilmente devido a sua estrutura ser mais ramificada.

Tabela 2 Valores médios da perda de massa da madeira de *Araucaria angustifolia* tratada termicamente em função da temperatura.

TRATAMENTO	PERDA DE MASSA (%)
200°C	3.00 c
220°C	5.55 b
240°C	8.41 a
MÉDIA GERAL	5.66
CV(%)	27.55

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$). Onde: CV(%): coeficiente de variação em percentagem.

Modes (2010, p.45) tratou madeira de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* em estufa elétrica e com uso combinado de autoclave e estufa elétrica. A autora verificou uma percentagem de perda de massa muito similar para as duas espécies em relação ao tratamento, com 12,8% para *P. taeda* e 11,76% para *E. grandis*, para ambos os tratamentos.

A perda de massa encontrada no tratamento a 200°C foi de 3%. Este resultado foi menor ao observado por Oliveira (2009, p.84), para a mesma espécie, com uma perda de 9%. Essa diferença pode ter ocorrido devido ao equipamento utilizado para o tratamento, sendo que o autor utilizou um forno com rampa de aquecimento e neste trabalho foi utilizado mufla.

Soares (2011, p.452), em trabalho realizado com *Araucaria angustifolia*, observou uma perda de massa superior para a temperatura de 200°C, cerca de 8%, enquanto que no presente estudo foi de 3%. O equipamento utilizado foi o mesmo, mufla laboratorial, e essa diferença pode ser explicada pelo tempo de exposição da madeira ao tratamento térmico, que foi de 8h.

Os resultados observados neste trabalho para a temperatura de 200°C foram semelhantes aos verificados por Calonego (2009, p.71), estudando tábuas de *Eucalyptus grandis*, em que obteve uma perda de massa de 5,7%.

5.4 PERDA DE MASSA X UMIDADE DE EQUILÍBRIO

A relação entre a perda de massa e a umidade de equilíbrio da madeira de *Araucaria angustifolia* tratada termicamente, está disposta no gráfico a seguir (Gráfico 1):

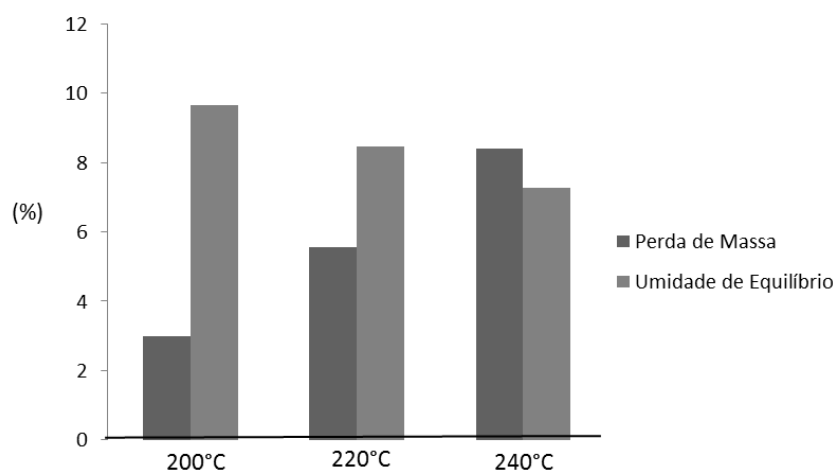


Gráfico 1 Perda de massa e umidade de equilíbrio da madeira de *Araucaria angustifolia* tratadas termicamente nas temperaturas de 200°C, 220°C e 240°C.

Observou-se que a perda de massa e a umidade de equilíbrio são diretamente proporcionais com o aumento da temperatura.

Com a elevação da temperatura houve perda de massa (Tabela 2) e, possivelmente, modificações químicas na madeira. Este fato pode ter contribuído para que o número de sítios de adsorção tenha diminuído, refletindo diretamente na menor umidade de equilíbrio higroscópico (Tabela 1). Segundo Modes (2010, p.48), com os tratamentos térmicos, ocorre uma restrição da capacidade das madeiras em trocar umidade com meio circundante.

Oliveira (2009, p.84) afirma que a perda de água livre ocorre até 100°C e a água de constituição começa a ser perdida a partir de 140°C, através de reações de condensação que ocorrem nas regiões amorfas de constituintes como hemiceluloses e celulose. Juntamente, ocorre também a perda de extrativos de baixo peso molecular que se volatilizam. Com isso, sugere-se que esses fatores podem

contribuir para a menor umidade de equilíbrio das madeiras, como também para a perda de massa das madeiras.

5.5 DENSIDADE BASICA DA MADEIRA

Observa-se que as densidades das madeiras termo-tratadas e a testemunha foram semelhantes, ou seja, não houve diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 3).

Tabela 3 Valores da densidade básica da madeira de *Araucaria angustifolia* tratada termicamente.

TRATAMENTO	DENSIDADE BÁSICA(g/cm ³)
Testemunha	0.37 a
200°C	0.42 a
220°C	0.43 a
240°C	0.41 a
MÉDIA GERAL	0.41
CV(%)	6.33

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$). Onde: CV(%): coeficiente de variação em percentagem.

A densidade é uma das propriedades mais importantes da madeira, pois esta diretamente ligada ao tipo de uso do material e nas demais propriedades.

Este resultado não era esperado, pois, durante os tratamentos térmicos, houve perdas de massa (Tabela 2). Com isso a densidade definida como a quantidade de material lenhoso contido num certo volume, deveria reduzir com o tratamento térmico.

Alguns autores encontraram redução na densidade após o tratamento térmico, dentre eles Modes (2010, p.47), Brito et al. (2006, p.186), Gunduz et al. (2009, p.4393) e Unsal et al. (2003, p.148). Porém com a elevação da temperatura, Brito et al. (2006, p.186) notou que as densidades da madeira *Eucalyptus grandis*,

também mostraram tendência de aumentar o seu valor em relação às das madeiras testemunhas, apesar das diferenças não terem sido significativas. O autor explica que de acordo com as fases da pirólise, apesar da elevação da ação do calor, tal aumento não teria sido suficiente para provocar uma perda de massa na mesma proporção da redução no volume das madeiras.

5.6 RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA DA MADEIRA

A retratibilidade das madeiras de *Araucaria angustifolia* não foi afetada pelos tratamentos térmicos (Tabela 4).

Tabela 4 Valores médios da retratibilidade volumétrica da madeira de *Araucaria angustifolia* tratada termicamente.

TRATAMENTO	RETRATIBILIDADE VOLUMÉTRICA (%)
Testemunha	17.56 a
200°C	15.83 a
220°C	9.25 a
240°C	12.64 a
MÉDIA GERAL	13.82
CV(%)	33.78

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$). Onde: CV(%): coeficiente de variação em percentagem.

Verifica-se na tabela acima, que a retratibilidade volumétrica da madeira de *Araucaria angustifolia* foi de 9,25% e 15,83%, para as temperaturas 220°C e 200°C, respectivamente. As madeiras tratadas a 220°C foram as mais estáveis em relação às demais e a redução volumétrica foi de 8,31%, em relação à testemunha.

A retratibilidade volumétrica das madeiras não diferiu significativamente entre os tratamentos térmicos e a testemunha. Com isso, observou-se que a

aplicação de calor não contribuiu para que a estabilidade dimensional das madeiras fosse melhorada.

Os resultados encontrados não são coerentes com os apresentados por Calonego (2009, p.85), que afirma que as madeiras, quando submetidas ao tratamento térmico, podem apresentar melhora na estabilidade dimensional com a diminuição dos sítios de adsorção da parede celular. Além disso, Araújo (2010, p.34), em trabalho com madeira termo-tratada de eucalipto, afirma que a retratibilidade volumétrica foi afetada pelos tratamentos à 180°C, 200°C e 220°C.

Oliveira (2009, p.89), avaliou a retratibilidade volumétrica de *Eucalyptus grandis* e Araucária e obteve como resultado que as duas espécies apresentaram comportamento semelhante, principalmente nas amostras retiradas próximas a casca, tanto para a temperatura de secagem (102°C) quanto para a temperatura de tratamento (180°C).

6 CONCLUSÃO

- A umidade de equilíbrio higroscópico da madeira foi afetada significativamente pelo tratamento térmico, diminuindo com o aumento da temperatura de tratamento.
- A perda de massa da madeira tratada termicamente tendeu a ser maior com o aumento de temperatura de tratamento
- Os tratamentos térmicos não afetaram significativamente a densidade das madeiras.
- Os tratamentos térmicos não afetaram significativamente na retratibilidade volumétrica da madeira de *A. angustifolia*.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABPM – **Associação Brasileira de Preservadores de Madeira**. Disponível em: <<http://www.abpm.com.br/preservacao>>. Acesso em: 18 de julho de 2013.

ARAÚJO, Solange de Oliveira. Propriedades de madeiras termoretificadas. **Tese** (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais. 93pag. 2010.

BASSO, Clarissa M. Grazzana. A Araucária e a paisagem do planalto sul Brasileiro. **Revista de Direito Público**, Londrina, v.5, n.2, p.1-11, ago. 2010.

BORGES, Livia Marques & QUIRINO, Waldir Ferreira. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaeavar hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, vol.1, n.2, pag 173-182, abril-junho, 2004.

BRITO, J.O.; GARCIA, J;N.; BORTOLETTO JUNIOR, G.; PESSOA, A.M.C.;SILVA, P.H.M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termoretificação. **Cerne**, Lavras, v.12, p.182-188, 2006.

CALONEGO, Fred Willians. Efeito da termoretificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Tese** (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

DAMIN DA SILVA, Helton; BELLOTE, Antonio F. Jurado; FERREIRA, Carlos Alberto; BOGNOLA, Itamar Antonio. Recomendação de solos para *Araucaria angustifolia* com base nas suas propriedades físicas e químicas. **Bol. Pesq. Fl.**, Colombo, n.43, p.61-74, jul/dez, 2001.

FIGUEROA, Manuel J. Manriquez & MORAES, Poliana Dias de. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.9, n.4, p.157-174, out-dez, 2009.

GALVÃO, A. Paulo M. Estimativas da umidade de equilíbrio da madeira em diferentes cidades do Brasil. **IPEF**, n.11, p.53-65, 1975.

GUNDUZ, Gokhan; AYDEMIR, Deniz; KARAKAS, Gurdeniz. The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood

and changes in physical properties. **Materials & Design**, v. 30, n. 10, p. 4391-4395, 2009. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TX5-4W26GCD-2&_user=687358&_coverDate=12%2F31%2F2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1194972193&_rerunOrigin=google&_acct=C000037899&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687358&md5=5bf6d8f5b97c826e8ff1560959c10c4b#secx2. Acesso em: 10 de março de 2014.

MENDES, Rafael Farinassi. Efeito térmico sobre as propriedades de painéis OSB. **Dissertação** (Mestrado) – Escola Superior Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2010.

MODES, Karina Soares. Efeito da retificação térmica nas propriedades físico-mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

MORAES E SILVA, Matheus. Efeito da termorretificação na resistência biológica da madeira de bracatinga-comum (*Mimosa scabrella*). **Trabalho de Conclusão de Curso** (graduação). Universidade Estadual do Centro-Oeste – Unicentro, Irati. 2011.

OLIVEIRA, Juliano Morales. Anéis de crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze: bases de dendroecologia em ecossistemas subtropicais montanos no Brasil. 139 p. **Tese** (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, nov. 2007.

OLIVEIRA, Rodrigo Marquês de. Utilização de técnicas de caracterização de superfícies em madeiras tratadas termicamente. **Tese** (Doutorado). Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 123p. 2009.

PEREIRA, Flávia Alves. Propriedades de painéis tipo OSB, fabricados com flocos de *Eucalyptus grandis* tratados termicamente. **Tese** (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

ROGÉRIO DA SILVA, Marcio. Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalipto citriodora* e *Pinus taeda*. 223 p. **Tese**(Doutorado) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012

SILVA, F. de A. S. e. & AZEVEDO, C. A. V. de. A New Version of The Assisat-Statistical Assistance Software. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN

AGRICULTURE, 4, Orlando-FL-USA: **Anais**. Orlando: American Society of Agricultural and Biological Engineers, p.393-396. 2006.

SOARES, Andrey Coatrini; OLIVEIRA, Rodrigo M. de; BRISOLARI, André; SALES, Almir; GONÇALVES, Débora. Molhabilidade em amostras de *Araucaria angustifolia* e *Pinnus elliottii* após tratamento térmico e envelhecimento. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.39, n.92, p.447-456, dez 2011.

SORATTO, Déborah Nava. Efeito das variáveis do tratamento térmico nas propriedades da madeira de *Eucalyptus sp.* **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2012.

TAKESHITA, Saly. Redução na higroscopicidade e na movimentação dimensional da madeira de folhosas submetida a tratamentos térmicos. **Dissertação** (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2011.

TRUGILHO, Paulo Fernando, SILVA, Dimas Agostinho da; FRAZÃO, Francisco Juvenal Lima; MATOS, Jorge Luis Monteiro de. Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. **Acta Amazonica**. 20 (único): 307-319. 1990.

TWBRAZIL – ThermoWood Brazil. **Madeira modificada com calor TMT** (Thermally Modified Timber). Apresentação resumida. Ficha Técnica do produto. Ponta Grossa, Paraná, Brasil, 7p. 2010.

UNSAL, O.; KORKUT, S.; ATIK, C. The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehn.) wood. **Maderas, Ciência y Tecnología**, v. 5, n. 2, p. 145-152, 2003.

VILAS BOAS, Mariana Almeida. Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2011.