

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
BRUNO HENRIQUE SIMÕES MACHADO**

Tratamentos térmicos em madeira e seus benefícios

**Taubaté - SP
(2018)**

BRUNO HENRIQUE SIMÕES MACHADO

Tratamentos térmicos em madeira e seus benefícios

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Fabio Henrique Fonseca Santejani

Coorientador(a): Ivair Alves dos Santos

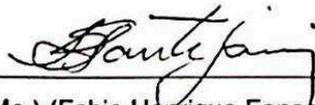
**Taubaté – SP
(2018)**

BRUNO HENRIQUE SIMÕES MACHADO

TRATAMENTOS TÉRMICOS EM MADEIRA SEUS BENEFÍCIOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE ENGENHARIA
MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE
GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. (Dr. ou Me.) (Fabio Henrique Fonseca Santejani)
Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. (Me.) (Fabio Henrique Fonseca Santejani)
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. (Msc.) (Ivair Alves dos Santos)
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. (Msc.) José Carlos Sávio de Souza
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

(11/12/2018)

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

M149t Machado, Bruno Henrique Simões
Tratamentos térmicos em madeira e seus benefícios / Bruno Henrique Simões
Machado. -- 2018.
41 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia
Mecânica e Elétrica, 2018.

Orientação: Prof. Me. Fabio Henrique Fonseca Santejani, Departamento de
Engenharia Mecânica.

1. Madeira. 2. Propriedades físicas, químicas e mecânicas.
3. Redução. 4. Termorretificação. I. Título. II. Graduação em Engenharia Mecânica.

CDD – 620.12

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Jorge Machado e Regina
Simões, amigos e familiares.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

À Universidade de Taubaté – UNITAU, que ofereceu um excelente ambiente educacional com profissionais qualificados

Ao meu orientador, *Prof. (Dr. Msc) Fabio Henrique Fonseca Santejani* por todo o incentivo e motivação na orientação deste trabalho.

Ao *Prof. (Dr. Msc) Ivair Alves dos Santos* por toda a ajuda na hora em que mais precisei e por ter aconselhados em todo o processo de realização.

Aos meus pais *Jorge e Regina*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Aos Professores, Msc. Ivair Alves dos Santos, Msc Fábio Henrique Fonseca Santejani e Msc José Carlos Sávio de Souza por aceitarem compor a banca examinadora.

Às funcionárias da Secretaria pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

À minha namorada Eduarda, que sempre esteve presente nessa etapa final, acreditando nas minhas capacidades e me mantendo motivado para conseguir concluir todo esse processo.

Aos meus amigos (Adriano, Paulo, Gabriel, Bruno, Guilherme Waack e Machado) pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhora tudo o que tenho produzido na vida.

EPÍGRAFE

A imaginação é mais importante que a ciência,
porque a ciência é limitada, ao passo que
a imaginação abrange o mundo inteiro.

(ALBERT EINSTEIN)

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado a importância dos tratamentos realizados nas madeiras (ou termorretrificação) com o objetivo melhorar as propriedades da madeira e, desta forma promover o resultado de produtos com maior valor agregado. Avaliou-se o comportamento das modificações presentes nas espécies de *Eucalypto citriodora* (*Corymbia Citriodora*) e *Pinus taeda*, termicamente tratadas com temperaturas variantes entre 160 a 240 ° C e, para o pínus, chegando até 260 °C. Os resultados obtidos através dos experimentos do tratamento térmico da madeira foram classificados de forma visual, modificação das propriedades físicas, químicas, mecânicas (resistência e rigidez), e sua proteção contra fungos. As modificações que foram apresentadas na parte química é uma redução nos teores extrativos e hemiceluloses, após a termorretrificação, e um aumento no teor de celulose e lignina. De uma visão geral, as propriedades de resistência das madeiras diminuíram e as propriedades de rigidez aumentaram ao longo do tratamento térmico, tendo uma alteração em suas propriedades colorimétricas levando ao escurecimento, devido a degradação dos seus principais componentes químicos, principalmente a hemicelulose.

Palavras-chave: termorretrificação, propriedades físicas, químicas e mecânicas, redução, madeira.

ABSTRACT

In this work, it is indicated the best results in relation to wood (or thermortification) with higher added value. "O-se the behavior of the doses present in the species of *Eucalyptus citriodora* (*Corymbia Citriodora*) and *Pinus taeda*", thermally treated with the differences between 160 to 240 °C and, for the pinus, reaching 260 °C. The results obtained can be conducted by analyzing the physical, chemical and mechanical properties (strength and stiffness) and their protection against fungi. The changes that were made in the chemical part are a reduction in the extractive contents and hemicelluloses, after a thermortification, and an increase in the content of cellulose and lignin. The decreased and resistant properties of the heat treatment have decreased and increased the peeling rates, especially the hemicellulose.

KEYWORDS: thermortification, physical, chemical and mechanical properties, reduction, wood

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Formula molecular da celulose.....	17
Figura 2.1.2 – Alcool p-cumario; 2 – alcool conifero; 3 - alcool sinápilico.....	18
Figura 2.5 – Driagrama do processo de produção.....	23
Figura 4.1 – Gráfico do aquecimento e resfriamento do tratamento termico da madeira.....	26
Figura 4.3 – Gráfico de aquecimento do <i>E. citriodora</i> a 160 °C.....	28
Figura 4.4 – Gráfico de aquecimento do <i>Pinus taeda</i> a 160 °C.....	28
Figura 4.5 – Estufa, caixa de metal.....	29
Figura 4.6 – Madeira tratada termicamente a 160 °C.....	28
Figura 4.7 – Madeira tratada termicamente a 180 °C.....	30
Figura 4.8 – Gráfico de aquecimento <i>E. citriodora</i> a 200 °C.....	30
Figura 4.9 – Gráfico de aquecimento <i>Pinus taeda</i> a 200 °C.....	31
Figura 4.10 – Gráfico de aquecimento <i>E. citriodora</i> a 220 °C.....	32
Figura 4.11 – Gráfico de aquecimento <i>Pinus taeda</i> a 220 °C.....	32
Figura 4.12 – Madeira tratada termicamente a 220 °C	33
Figura 4.13 – Madeira tratada termicamente a 240 °C.....	33

Figura 4.14 – Gráfico de aquecimento do *E. citriodora*34

Figura 4.15 – Madeira de *Pinus taeda* tratada termicamente a 260 °C.....35

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Temperaturas de tratamento termicos.....	27
Tabela 4.2 – temperaturas finais do tratamento termicos nas madeiras.....	35

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

CCA	ARSENIATO DE COBRE CROMATADO
CCB	BORATO DE COBRE CROMATADO

INTRODUÇÃO	14
OBJETIVO.....	16
OBJETIVO ESPECIFICO.....	16
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
IDENTIFICAÇÃO MACROSCÓPICA DA MADEIRA	17
TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA.....	20
PROCESSO LE BOIS PERDURE.....	20
PROCESSO RETIWOOD E RETITECH	21
THERMOWOOD	22
PLATOWOOD	23
METODOLOGIA.....	25
APLICAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO	26
CONCLUSÃO.....	37
RÊFERÊNCIAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

Com a carência de madeiras de boa qualidade tem-se buscado a utilização de espécies de reflorestamento, essa solução encontrada tem se tornado muito viável para atender a demanda dos produtos florestais exigidos no mercado. Pelo clima apresentado no Brasil, a predominância das espécies de reflorestamento é composta pelos gêneros Pinus e Eucalipto, sendo essas arvores que apresentam um crescimento acelerado, de baixa constância dimensional e de uma visão geral uma fraca durabilidade. Logo, é necessário que se utilize meios para melhorar as propriedades dessas madeiras para uma melhor recebimento no mercado comercial.

Com a intenção de melhorar a estabilidade dimensional e a vida útil das espécies plantadas, são empregados impermeabilizantes e realizados métodos de preservação, tais como controle biológico, umidade e uso de agentes controladores de pragas e fungos. O tratamento profilático da madeira causa um acréscimo no custo inicial, porém, devido a maior durabilidade gerada pelo tratamento este acréscimo é diluído ao ponto de ser vantajoso em relação a madeira que não foi realizada o tratamento.

Devido ao país ser tropical, o Brasil apresenta elevados índices de ataques na madeira por fungos e insetos. A exposição do material a estes agentes, sofrem deterioração e diminuição das propriedades mecânicas; assim, tornando-a inadequada para a utilização, e amplificando os meios para que sejam controlados esses agentes.

Os produtos químicos mais utilizados mundialmente para combater esses agentes são o creosoto, arseniato de cobre cromatado (CCA) e o borato de cobre cromatado (CCB) (CARVALHO, 2000). Mas o uso destes produtos tem causado um aumento na poluição ambiental, tais como: destruição do solo, rios e lençóis freáticos. Existe atualmente um déficit de eliminação dos resíduos químicos gerados das madeiras tratadas após a utilização dos produtos. Este cenário propicia a indagação mundial quanto ao uso destes produtos, tornando importante uma busca por produtos e métodos alternativos para que abaisse esse dano ambiental (HAKKOU PÉTRISSANS; GÉRARDIN, 2006)

Com todas as essas advertências os tratamentos térmicos da madeira são apresentados como um método alternativo interessante, podendo causar melhoras nas suas propriedades. Tjeersdema e Militz (2005) descrevem que, no processo da

realização de tratamento térmico, nenhum agente químico é adicionado para a utilização do tratamento da madeira.

Tratamento térmico da madeira, também conhecido como termorreificação é realizado a partir do aquecimento de amostras em faixas de temperaturas que não causem a carbonização, sendo realizado a uma temperatura abaixo de 280 ° C, sendo este um método que causa modificações na estrutura devido à ação do calor. A madeira tratada termicamente é obtida pelo princípio da termodegradação de seus constituintes a ausência ou presença controlada de oxigênio ou ar.

As modificações causadas nas propriedades da madeira durante o tratamento térmico é variante a espécie da madeira que está sendo tratada, da porcentagem de umidade, da atmosfera predominante e, também, do método utilizado no processo. A relação de temperatura proporciona maiores impactos do que o tempo nas propriedades da madeira e, acima de 150 ° C, as alterações físicas e químicas serão permanentes

(WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007; YILDIZ; GEZER; YILDIZ,2006)

O tratamento térmico após realizado modifica os componentes químicos da madeira, em que as hemiceluloses afetadas de forma maior que a celulose, devido à falta de cristalinidade (GOODRICH et al, 2010). Com a variação de temperatura entre 160 e 220 ° C é possível analisar um aumento na degradação dos componentes amorfos da celulose (BOLUK, 2008).

Os benefícios associados a este método são a extensão na estabilidade dimensional da madeira e a resistência contra intempéries nas condições em contato com líquidos, dureza superficial e ligações químicas mais fortes. Após aplicação é apresentado redução no teor de umidade de equilíbrio e melhoria na propriedade de inchamento; quanto menor apresentação de variação dimensional maior será agregado o valor do produto para ser comercializado, com isso é viável a utilização de espécies que foram descartada, também podendo modificar a cor para uma forma mais escurecida, em que comercialmente é apresentada de forma mais atrativa, o tratamento térmico proporciona a realização de produtos com uma maior qualidade, (JONES, 2011; BORGES; QUIRINO, 2004)

Os primeiros estudos realizados no brasil sobre tratamentos térmicos foi apresentado por Brito (1993). O autor alcançou resultados específicos sobre a temperatura influenciar no processo de redução de massa, alteração da densidade, composição química e capacidade de retração volumétrica da madeira de

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

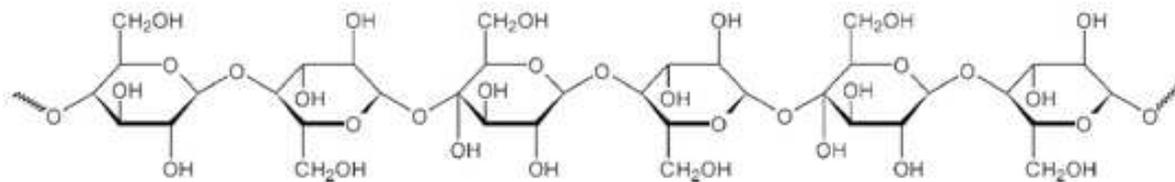
2.1 IDENTIFICAÇÃO MACROSCÓPICA DA MADEIRA

A celulose é um carboidrato do tipo polissacarídeo abundante nos vegetais e por isso, comum na natureza. Ela consiste em até 50% da composição da madeira, de acordo com Miller (1999) e Sjostrom (1981).

A celulose é um polímero de estrutura linear que estabelece ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxilas presentes, sua fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$ com um grau de polimerização (GP) (de 5.000 a 10.000). Sua massa molar (de 162.000 a 2.400.000 $g \cdot mol^{-1}$).

A estrutura da celulose é de um homo polissacarídeo composto de unidades β -D-glicopirranose formados por ligações β -1,4-glicosídicas, tem como composição fundamental o açúcar D-glicose, Figura 1.

Figura 1- Fórmula molecular da celulose. Repare que as unidades do β -D-glicopirranose estão em conformação de cadeira (4C1) e os substituintes) OH-2, OH-3 e CH_2OH são orientados contingentemente



Fonte- PIBID QUÍMICA (2008)

As polioses são polissacarídeos presentes na madeira em menor grau de polimerização que a celulose (150 ~ 200), seu peso molecular varia entre 25.000 a 35.000. Estão relacionadas à celulose e à lignina nos tecidos vegetais, no entanto a celulose é constituída pela repetição de mesma repetição monomérica, nas polioses são encontrados várias unidades de açúcares diferentes de 5 ou 6 átomos de carbono, tais como xilose, manose, glicose, arabinose, etc.

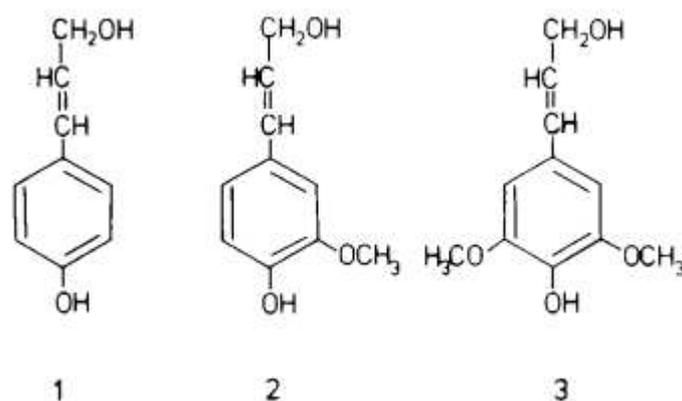
A polioses é definida pela mistura de polímeros, polissacarídeos com menor massa molecular que a celulose, nos quais são estreitamente conjuntados à

celulose. No entanto, a celulose como uma substância química, contém exclusivamente a D-glucose como unidade fundamental, por ser um polímero de fácil hidrolização as polioes apresentam componentes monoméricos como: D-glicose, D-manose, D-xilose, L-arabinose e poucas quantidades de L-ramnose, além de ácido D-glicorônico, ácido 4-O-metil-D-glicorônico e ácido galacturônico. O grau de polimerização encontrados nas hemiceluloses pode atingir 200 e, seus teores encontram-se dentro o intervalo de 20 a 40% do peso relativo da madeira (SJOSTROM, 1981).

A lignina, também conhecida como lenhina, é uma molécula tridimensional amorfa encontradas nas plantas terrestres, em associação com a celulose na parede celular, com intuito de conferir rigidez, impermeabilidade e resistência contra ataques biológicos aos tecidos vegetais. Esta molécula é o terceiro componentes mais significativo encontrado na madeira, correspondendo entre 15 a 35% do seu peso (Anselme Payen, 1838). É impossível ser retirada da madeira simultaneamente sem que haja degradação da natureza.

As ligninas apresentam uma constituição por unidades de fenilpropano e dispõem de sua origem a partir da polimerização desidrogenativas (iniciada por enzimas) dos seguintes pioneiros primários: álcool trans-coniferílico, álcool-sinápílico e álcool para trans-cumário, Figura 2; estes são derivados a partir de unidade de D-glucose, por uma diversidade de reações enzimáticas, envolvendo oxidação, redução, animação, desaminação, descarboxilização etc. (MILLER, 1999; SJOSTROM, 1981).

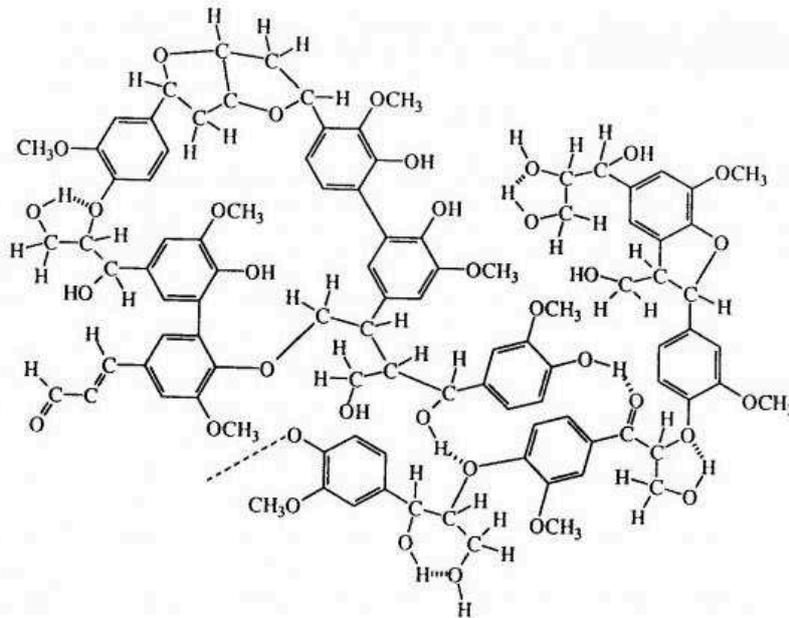
Figura 2- Álcool p-cumário; 2, álcool coniferílico; 3, álcool sinápílico



Fonte-Sjostrom (1981)

Como resultado chave da polimerização das estruturas básicas da lignina é apresentado uma estrutura molecular heterogênea em que as unidades básicas são juntas por ligações de carbono-carbono e ligações de éter. Ilustrado na figura 3

Figura 3- molécula de lignina



Fonte-infoescola, Debora Carvalho Meldau

Além dos constituintes da madeira, são vistos compostos orgânicos e inorgânicos. As características relacionadas com cor, odor, resistência a agentes biológicos, densidade, higroscopicidade e inflamabilidade está ligada aos compostos orgânicos de baixa massa molar que formam os extrativos da madeira, incluem compostos polifenólicos, materiais corantes, óleos essenciais, gorduras, resinas, ceras e goma de amido simples. São nomeados como extrativos porque podem ser retirados da madeira com a utilização de solventes como água, álcool, acetona, benzeno ou éter. Sua presença na madeira está relacionada a uma taxa de 5 a 30%, dependendo da espécie analisada.

Os componentes inorgânicos são associados basicamente por sulfatos, oxalato, carbonatos e silicatos, sua contribuição geralmente é entre 0,2 e 1% das substâncias presentes na madeira, conquanto grande valores sejam ocasionalmente registrados. Os conteúdos encontrados nas árvores são variáveis com relação a espécie, disponibilidade no solo, a necessidade individual e a época do ano analisada (MILLER, 1999; MORI et al., 2003)

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO DA MADEIRA

Os processos alterações da madeira podem ser separados em quatro tipos: superficial, químico, térmico e impregnação, sendo que a que mais tem evoluído nos últimos tempos em termos comerciais é o térmicos, pelo seu baixo custo para efetuar o processo.

O foco principal da utilização do tratamento térmicos é melhorar as propriedades da madeira exclusivamente com o uso de calor. Os impactos causados por esse método é variável por diversos fatores como, por exemplo, temperatura do tratamento, espécie de madeira, duração do tratamento e pressão atmosférica do local. Conforme a duração e da temperatura aplicada durante o processo de tratamento térmico, a madeira pode apresentar melhorias na estabilidade dimensional, resistência contra mau tempo, resistência a água. Após o processo de tratamento térmico é analisado uma modificação no teor de umidade e nas propriedades de inchamento, outro fator que ocorre após o processo é a alteração na coloração para um tom escuro da madeira, característica que, normalmente, encontra em espécies tropicais.

A execução do tratamento térmico é variante com relação a sua temperatura e seu tempo, tendo em vista que a temperatura está entre 180 a 280 ° C com uma duração de 15min a 24 h, de acordo com espécie da madeira, tamanho das amostras, umidade da amostra, propriedades mecânicas desejadas, resistência à ação biológica e sua estabilidade dimensional final (KORKUT; HIZIROGLU, 2009). Com base nessas alegações foram desenvolvidos métodos diferenciados para serem comercializados podendo atender de forma abrangente todo o mercado industrial, sendo esses métodos apresentados abaixo:

2.3 PROCESSO LE BOIS PERDURE

O objetivo desta tecnologia era encontrar uma maneira de proteger as madeiras de todas as espécies sem a utilização de produtos ou agentes químicos, buscando uma melhora na resistência e estabilidade dimensional. A solução proposta foi baseada no processo evolutivo da espécie humana em que gastavam a

ponta das lanças no fogo para endurece-las e garantindo uma longevidade. Portanto, necessário reproduzir de maneira moderna e industrial essas abordagens empíricas para melhoria da madeira.

A tecnologia de *Perdure* consiste em submeter a madeira a uma alta temperatura por um único processo em uma atmosfera fixa. A madeira é aquecida a um valor acima dos 200 °C, sem o uso de produtos químicos. Este processo causa um fortalecimento nas ligações moleculares da madeira, o que melhora as propriedades físico-mecânicas naturais. Após a realização do tratamento é originado um novo material, sendo superior à madeira. A tecnologia de *Perdure* não acarreta nenhuma rejeição atmosférica. Gera apenas resíduos líquidos em quantidade limitada. O ciclo de tratamento é apresentado em três fases sendo elas: eliminação de água livre; eliminação de água impregnada e o tratamento térmico. As duas primeiras operações são as de períodos mais curtos, dependendo do teor de umidade inicial. A terceira fase, a do tratamento propriamente dito, consiste em uma modificação macromolecular da madeira. Esse resultado é alcançado através da submissão da madeira em altas temperaturas, causando a migração de álcoois, alcatrões e resinas das células da madeira para as paredes da madeira, formando uma impermeabilização que impede ou minimiza o apodrecimento quando exposta.

2.4 PROCESSO RETIWOOD E RETITECH

O processo denominado como *Retiwood* é francês e foi produzido e patenteado pela Saint Etienne “Ecole des Mines” em 1997. Esse método foi mais tarde industrializado pela New Option Wood (now) SA.

Este processo é realizado até que a madeira seja reduzida sua umidade para 12% em temperaturas variando de 160 a 180 °C. Nesta temperatura, a madeira não é capaz de sofrer modificações e seu estado continua a ser reversível. A partir deste ponto, as modificações da madeira serão permanentes, sendo que, sua tonalidade original, parâmetros de estabilidade e durabilidade serão alterados progressivamente. Com base na espécie submetida ao tratamento haverá diferentes temperaturas para que seja efetuado efetivamente o processo de tratamento térmico (RETIWOOD, 2009). A temperatura que o processo de *RetiWood* pode atingir é até de 240 °C e, para que não cause degradação da madeira é necessário um minucioso controle do elemento oxigênio, que é capaz de permitir a combustão da

madeira.

2.5 THERMOWOOD

O thermowood é um processo desenvolvido pela VTT, na Finlândia, e registrada Finished ThermoWood Association.

É um processo fundamentado no aquecimento da madeira entre temperaturas de 180 e 250 ° C, em atmosfera controlada, com utilização de vapor de água, no qual, de acordo com o fabricante protege a madeira e influencia em suas alterações químicas. Com temperaturas superiores a 200 °C há uma alteração química, como degradação da celulose e hemiceluloses. A diferença apresentada pela VTT é diferenciado pois apresenta a utilização do gás nitrogênio como proteção e alguns processos são realizados sob pressão.

O processo ThermoWood pode ser dividido em três fases:

-Primeira fase: Aquecimento e secagem.

Com o auxílio do calor e vapor, a temperatura alcança rapidamente um valor de 100 ° C. sucessivamente, a temperatura é elevada a 130 ° C, durante esse período de tempo a madeira é seca com sua umidade próxima de zero por cento.

Segunda fase: Tratamento térmico.

Após as temperaturas de secagem sejam atingidas, a temperatura do forno é elevada entre 185 e 215 ° C, sendo mantidas permanentemente constante por duas ou três horas, dependendo exclusivamente do aplicação final do produto

-Terceira fase: Resfriamento e condições de umidade.

Esta fase consiste em baixar a temperatura entre 80 e 90 °C, por meio de aspersão de água, com uma umidade entre 4 e 7%, Figura 4

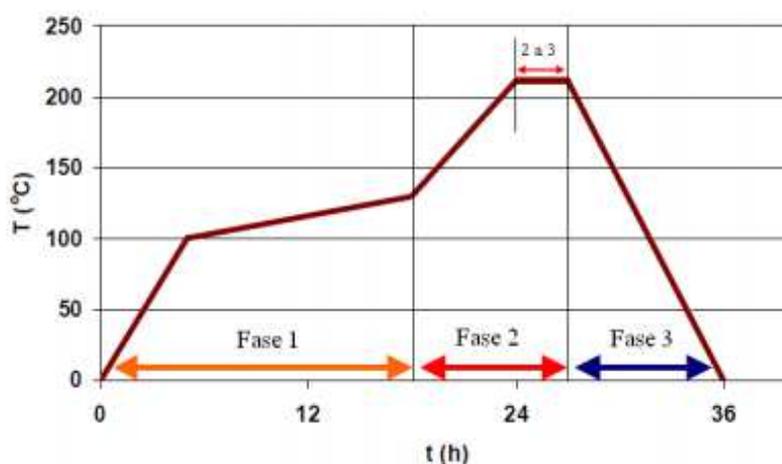


Figura 4- diagrama do processo de produção

fonte: VTT

Sugere este tipo de tratamento para uso externo, como revestimentos, portas exteriores, mobiliário de jardim etc. (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

2.6 PLATOWOOD

O processo PlatoWood foi desenvolvido na Holanda, pela companhia Plato International BV, após estudos iniciais nos laboratórios da Royal Dutch Shell. O processo é baseado em quatro etapas:

- Hidrotermólise: aquecimento da madeira entre 150 e 180 ° C, com umidade entre 14 e 20%, sobre uma pressão altamente elevada de aproximadamente 7 atm, por um período de 4 a 5 horas;
- Etapa de Cura: aquecimento da madeira, entre 150 e 190 ° C, em ambiente seco, por um tempo intervalo de tempo de 14 a 16 horas;
- Etapa de condicionamento: elevação da umidade para um nível desejado, regularmente entre 4 a 6%, por um período de 2 a 3 dias.

Dependendo da espécie da madeira e do resultado desejado, este tempo pode ser menor (PLATO INTERNATIONAL BV, 2002; MILITZ; NORDIC WOOD).

2.7 ALTERAÇÕES QUÍMICAS NO CONTEÚDO DO CARBONO

A madeira apresenta uma estrutura complexa formada por camadas de celulose, hemiceluloses, lignina. No tratamento térmico, as moléculas apresentadas sofrem diferentes mudanças, dependendo da intensidade da temperatura utilizada. Com variações de altas temperaturas, os grupos acetilas de hemiceluloses reagem formando ácidos acético, ao que devido formando cadeias de células menores. O calor é capaz de produzir reações de desidratação e oxidação da celulose, promovendo a codensação da lignina. Essas combinações geram alterações drásticas nas propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira. O escurecimento da madeira deve-se à combinação de todas essas reações (KARTAL, HWANG; IMAMURA. 2007; WAHL, et al., 2004)

3 METODOLOGIA

A ênfase neste trabalho é apresentar os materiais, métodos, resultados e conclusões obtidas através do tratamento térmico da madeira da espécie *Eucalypto citriodora* e *Pinus taeda*, em diferentes níveis de temperaturas. São analisadas as modificações causadas pelos tipos de métodos utilizados durante todo o processo, sempre buscando notificar as propriedades físicas, mecânicas e entomológicas que foram alteradas como consequência da ação do tratamento térmico.

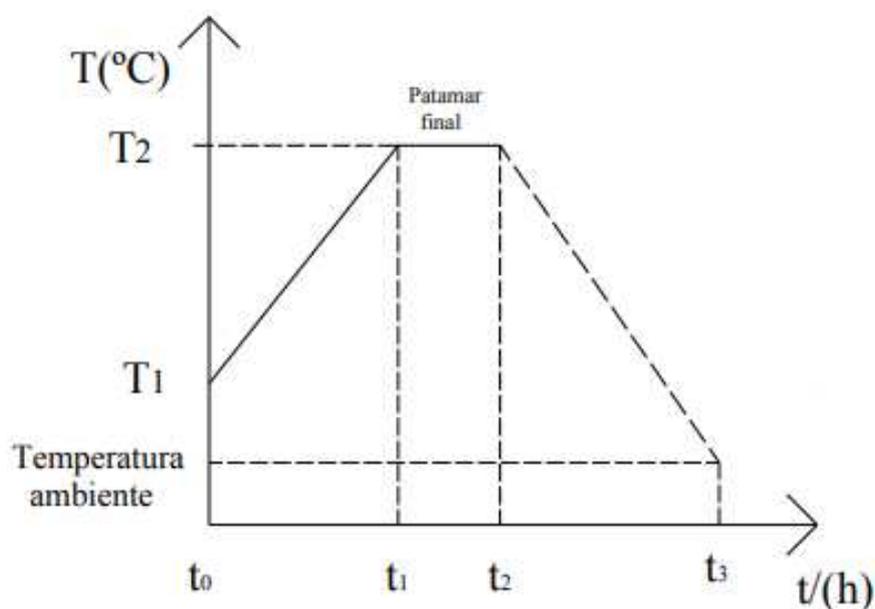
4 APLICAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO

A velocidade, o tempo de aquecimento, o teor de umidade e a espécie da madeira são fatores importantes para o processo de tratamento térmico, pois definem as possíveis alterações na estrutura molecular da madeira (FIGUEROA; MORAES, 2009; KORKUT; HIZIROGLU, 2009). A taxa aquecida adota nesse estudo foi de $0,033 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. A baixa taxa de aquecimento foi adotada visando evitar danificações causadas em rachaduras e trincas nas espécies estudadas.

A umidade analisada inicialmente das amostras de madeira antes do tratamento térmico foi de 12%. O gráfico de aquecimento foram estipulados de t_0 a t_1 , figura 3.1.

O tempo das amostras dentro da estufa após a temperatura final é conhecido como patamar final, definido de t_1 a t_2 , com uma variação de $2 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Terminando o processo de tratamento térmico, apenas o sistema de ventilação de ar permaneceu ligado na estufa, até que atinja uma temperatura interior de $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, etapa atingida de t_2 a t_3 , Figura 6.

Figura 6-gráfico de aquecimento e resfriamento do tratamento térmico da madeira



Fonte-Marcio Rogerio da Silva, universidade de são Paulo

O tratamento térmico das amostras foi iniciado em temperatura ambiente ($25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e o tempo inicial para a rampa de aquecimento foi e 40 min, sendo necessários diferentes temperaturas para iniciar a rampa de aquecimento (T_1) em relação das

espécies em estudos e das diferentes faixas de temperatura.

O processo de tratamento foi realizado em sete etapas de temperaturas para ambas as espécies. Sendo que para cada etapa de temperatura foi repetido o experimento três vezes, denominando os em: ETI, ETII e ETIII, tabela 1

Tabela 1-temperaturas usadas no tratamento térmico

Espécie	Blocos	Faixas de temperatura (°C)						
<i>E. citriodora</i>	ETI	160	180	200	220	240	260	280
	ETII							
	ETIII							
<i>Pinus taeda</i>	ETI	160	180	200	220	240	260	280
	ETII							
	ETIII							

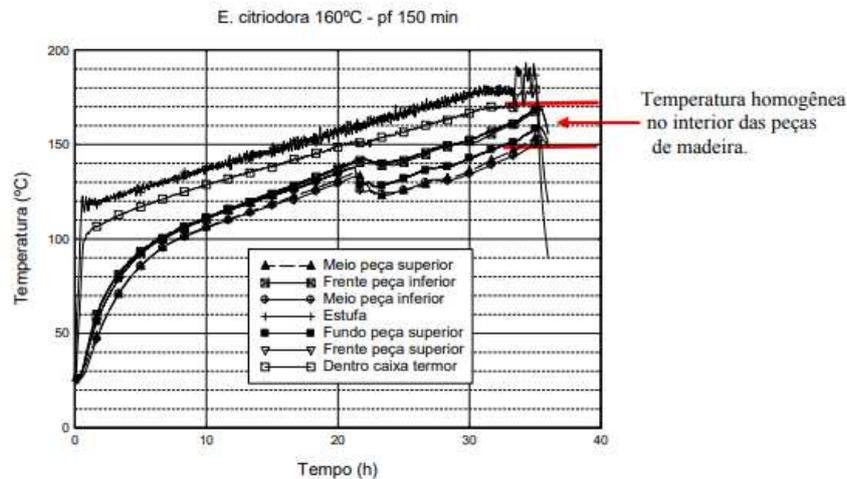
Fonte: Marcio Rogerio da Silva, universidade de são Paulo

Durante a realização dos experimentos, foi constatado que o patamar final de temperatura era diferente para cada espécie estudada, ocasionando diferentes tempos para a homogeneização do gradiente de temperatura no interior das peças de madeira.

Pelo gráfico apresentado abaixo, a temperatura dentro da estufa era sempre maior do que à temperatura no interior da madeira. Portanto, houve a exigência de ajustar o gráfico para cada etapa de temperatura.

Para o tratamento térmico da espécie *Eucalipto citriodora* em 160 °C foi imprescindível iniciar a rampa de aquecimento em 120°C e termina-la em 180°C, com um patamar final de 150min. Ocasionalmente homogeneidade ao longo da peça de madeira. Figura 7.

Figura 7- Gráfico de aquecimento do *E. citriodora* a 160°C

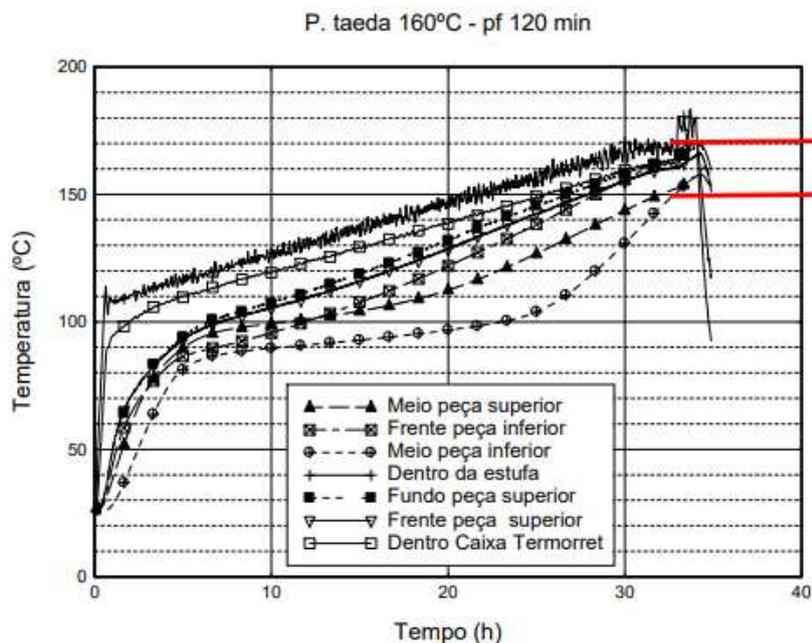


Fonte: Marcio Rogerio da Silva, universidade de são Paulo

Cabe enfatizar que a temperatura de aquecimento utilizado na estufa a partir da temperatura ambiente até o início da rampa de aquecimento foi de 40 min, para todos os ensaios realizados.

Para o gráfico de tratamento térmico do *Pinus taeda* na temperatura de 160°C, mostrado na Figura 4.4, a rampa inicial de aquecimento foi de 110°C e finalizada em 170°C, atingindo seu patamar final em 120 min, sendo necessário a ocorrência de 32,97h para realizar o tratamento térmico em cada etapa.

Figura 8- Gráfico de aquecimento da *Pinus taeda* a 160°C



Fonte: Marcio Rogerio da Silva, universidade de são Paulo

Para efetuação do tratamento térmico foram utilizados sete peças de madeira, com dimensões de 56x16x6 cm³, para cada etapa dentro de uma caixa de metal com uma tampa. Figura 9.

Figura 9-estufa, caixa de metal



Fonte: USP- Marcelo Rogerio

Figueroa e Moraes (2009) estudaram o comportamento da madeira em temperaturas elevadas e notificaram que na variação de 100 a 200 °C há liberação de água na madeira e que na faixa de 140 °C é liberada a água de impregnação.

Após a retirada total da água da madeira o gradiente de temperatura das amostras começaram a reduzir. Logo, o comportamento de perda de água de impregnação facilitou para que a umidade chegue a 0%

Figura 4.5 mostra o resultado do tratamento com a temperatura respectivamente a 160 °C.

Figura 9-Madeira tratada termicamente a 160 °C



Fonte: Marcio Rogerio da Silva, universidade de são Paulo

Para o tratamento térmico com temperatura de 180 °C, a rampa de aquecimento iniciada em 110°C e terminada em 190°C na espécie *E. citriodora*, chegando ao patamar final de 150 min, concluindo em 43,57 h de ensaio. No caso do *Pinus taeda*, a rampa foi iniciada em 110°C e terminada em 190°C com patamar final de 120 min, tempo para conclusão de 23,07 h.

Apresentação da madeira tratada com temperatura de 180°C, Figura 10.

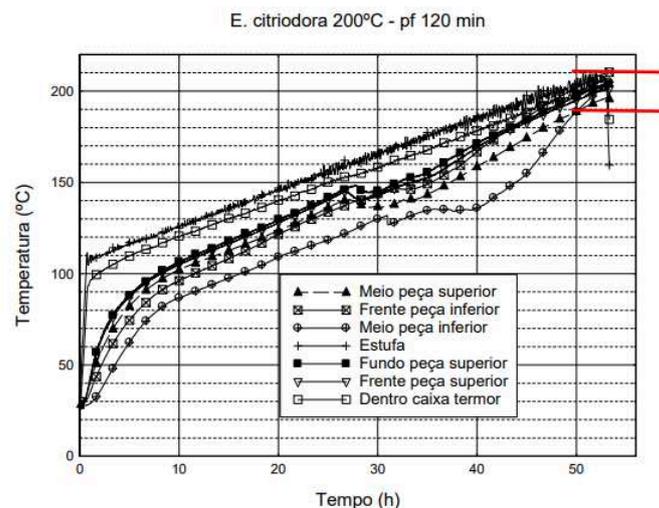
Figura 10- Madeira tratada termicamente a 180 °C



Fonte: Marcio Rogerio da Silva, universidade de são Paulo

O tratamento térmico da *E. citriodora* a 200 °C, teve sua rampa de aquecimento inicial em 110 °C e finalizada em 210 °C, com redução de patamar final para 120 min.

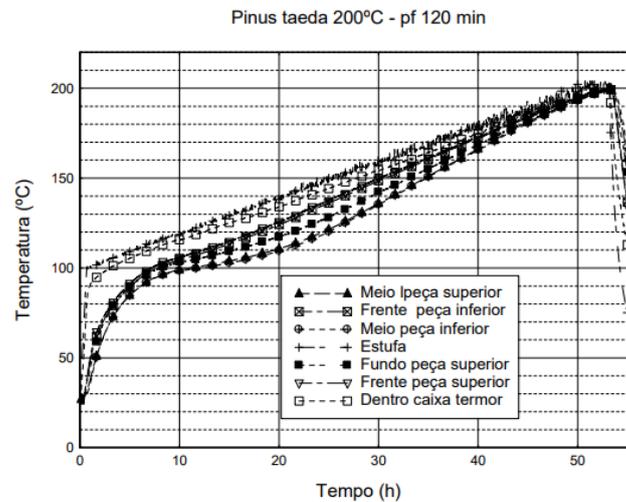
Figura 10- Gráfico de aquecimento *E. citriodora* a 200 °C



Fonte: Marcio Rogerio- USP

Para a rampa da *Pinus taeda*, temos o início em 105 °C e a finalização em 205 °C, chegando também ao patamar final em 120 min.

Figura 10- Gráfico de aquecimento *Pinus taeda* a 200 °C



Fonte: Marcio Rogerio- USP

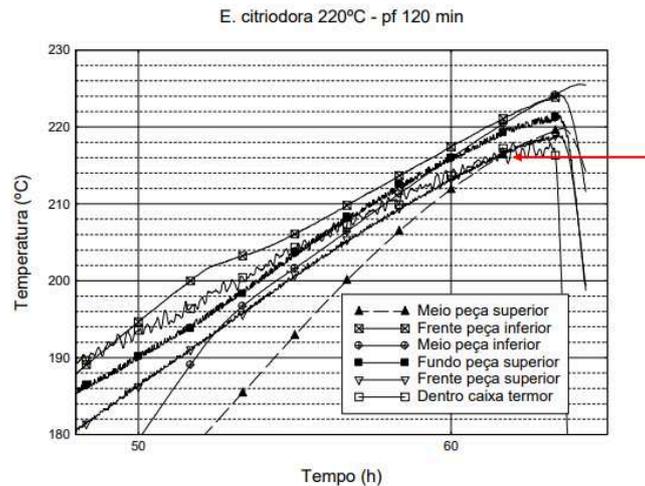
Na condição de tratamento térmico a 200 °C, o *E. citriodora* apresentou reações exotérmicas em apenas um local nas peças analisadas, quando submetido a uma temperatura de 195 °C.

Ajustando a temperatura para 220 °C, a rampa de aquecimento para o tratamento térmico do *E. citriodora* foi iniciada em 105 °C e finalizada em 225 °C, com patamar final de 120 min, semelhante ao tratamento térmico a 200 °C, tendo o tempo de duração de 63,27 h.

Com essa tem-se notificado reações exotérmicas ao longo de todas as partes da peça, sendo iniciadas em 190 °C, Figura 4.10, atestando com o tratamento a 200 °C

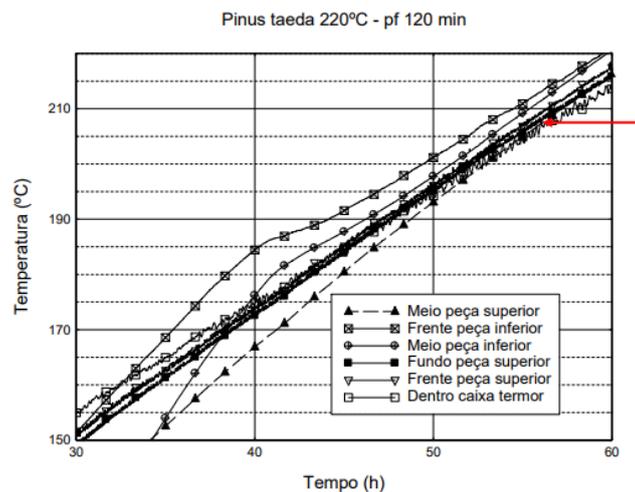
No caso do aquecimento térmico do *Pinus taeda* a 220 °C foi iniciada também a 105 °C e finalizada a 225 °C, com patamar final de 120 min, finalizando com tempo de duração de 63, 27 h. notificando inícios de reações exotérmicas com temperaturas a partir de 160 °C.

Figura 11- Gráfico de aquecimento *E. citriodora* a 220 °C



Fonte: Marcelo Rogerio-Usp

Figura 12 -Gráfico de aquecimento *Pinus taeda* a 220 °C



Fonte: Marcelo Rogerio - Usp

As reações da madeira tem sido descritas como endotérmica, exotérmica, ou ambas. Em geral, temos os inícios das reações exotérmicas entre 180 e 200 °C, e ocorrem devido à presença de reações secundárias, favorecidas pelo aumento de temperatura. Todos tratamentos que são realizados com uma temperatura superior a 220 °C mostraram a mesma tendência de comportamento quanto as reações exotérmicas.

Figura 13-Madeira tratada termicamente a 220 °C, a esquerda *E. citriodora* a direita *Pinus taeda*



Fonte: Univerdade de São Paulo

Em 240 °C, a *E. citriodora* iniciou sua rampa aquecimento em 105° e terminou em 245 °C, com patamar final de 120 min, totalizando 73,27 h. Como analisado nos dois casos anteriores predominância de ocorrências exotérmicas a 200 °C.

Para o tratamento térmico da *Pinus taeda* a 240 °C, sua rampa de aquecimento iniciou em 105 e terminou em 245 °C; tendo uma alteração no patamar final para o pinus, reduzindo-o para 60 min, tempo final de duração de 72,37 h. reações exotérmicas apresentadas a partir de 160 °C.

Figura 14-Madeira tratada termicamente a 240 °C, a esquerda *E. citriodora* e à direita *Pinus taeda*



Fonte: Universidade de São Paulo, Marcelo Rogerio

Para a taxa de aquecimento do *E. citriodora* à 260 °C foi programada para iniciar em 105 °C e terminada em 265 °C, da mesma forma dos tratamentos anteriores, com patamar final de 60 min e com um tempo de processo de 82,48h de ensaios. Contudo, ao atingir uma temperatura de aproximadamente 255 °C, iniciou-se o flashover da madeira de eucalipto, em que não foi mais possível controlar o ensaio, chegando a uma temperatura de 340 °C, Figura 4.14. A reação (na escassez de ar) torna-se exotérmica entre 275~280 °C (KLOCK et al., 2005). Rodriguez (2009)

relata que o fator que diferencia a torrefação (que é um tratamento térmico entre 225 °C e 300 °C) da carbonização é o caráter endotérmico das reações globais que ocorrem dentro da madeira sob aquecimento. Assim a torrefação é um produto intermediário entre a madeira anidra e o carvão vegetal.

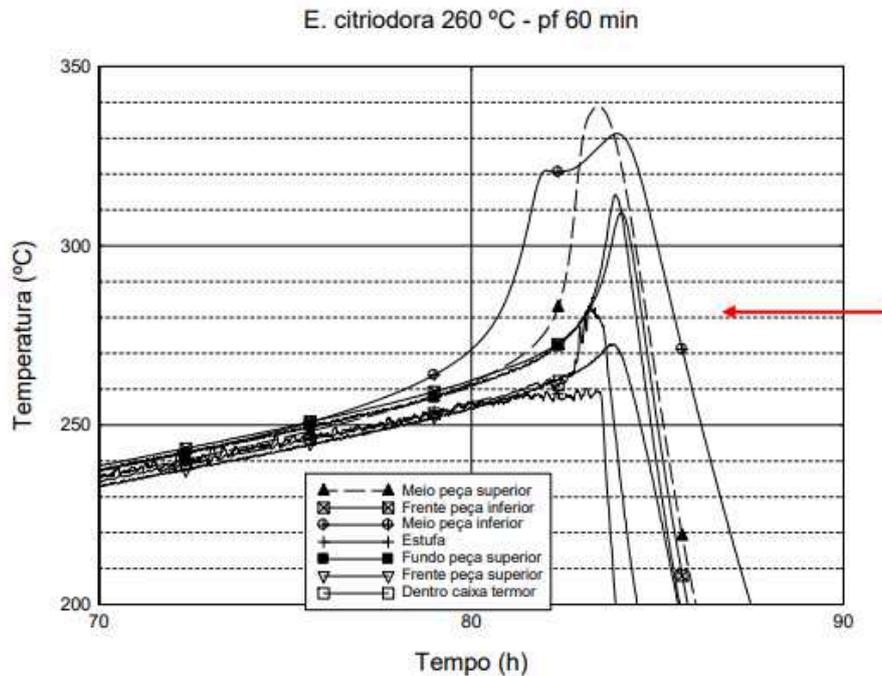


Figura 4.14- Gráfico de aquecimento do *E. citriodora*
fonte: Universidade de São Paulo, Marcelo Rogerio

O tratamento a 260 °C do *Pinus taeda* foi realizado com sucesso, sem os problemas apresentados para o *E. citriodora*, na mesma variação de temperatura, em rampa de aquecimento em 105 °C e com finalização 265 °C, com patamar final de 60 min, totalizando 82,47 h de ensaio. Observados reações exotérmicas foram iniciadas a partir de 160 °C.



Figura 4.15- madeira de *Pinus taeda* tratada a 260 °C
fonte: universidade de São Paulo

Para temperaturas com valores acima de 260 °C não foi possível terminar o tratamento, pois as madeiras apresentaram o início de carbonização, portanto foi finalizado os tratamento com a temperatura de 260 °C.

Após o termino dos processos realizado, foi representado nessa tabela 4.2 as conclusões finais de temperaturas.

Espécie	Temperaturas e patamares finais					
<i>E. citriodora</i>	160 °C – 150 min	180 °C – 150 min	200 °C – 120 min	220 °C – 120 min	240 °C – 120 min	–
<i>Pinus taeda</i>	160 °C – 120 min	180 °C – 120 min	200 °C – 120 min	220 °C – 120 min	240 °C – 60 min	260 °C – 60 min

Tabela 4.2- temperaturas finais do tratamento térmicos nas madeiras

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

Após a caracterização das propriedades físicas, mecânicas (de resistência e rigidez) e entomológicas na madeira natural e tratada termicamente, os resultados avaliados foram tratados estatisticamente, com o intuito de analisar a existência ou não de diferenças entre os mesmos.

O principal defeito ocasionado pelo calor foram fendilhados, em relação a rachas e fendas, para ambas as espécies testadas. Houve um acréscimo na largura das fendas, em função do aumento da temperatura, sendo que as maiores fendas provocadas para uma temperatura acima de 240°C.

Para o *Pinus taeda*, de maneira geral, são mais estáveis em relação ao tratamento térmico. Como observado para o *E. citriodora*, à medida que se elevou a temperatura do tratamento térmico, também causando fendas em peças de Pinus, entretanto em menos quantidades.

5 CONCLUSÃO

A partir do progresso dos ensaios de tratamento térmico da madeira, foi assimilado que, para cada tipo de espécie de madeira e para cada variação de temperatura, houve uma distinção quanto ao tratamento térmico que foi submetido, com base na relação inicial e final da rampa de aquecimento e os patamares finais obtidos para homogeneização do gradiente de temperatura. Não foi capaz de definir um padrão geral para os ensaios de tratamento térmico. Os únicos pontos semelhantes, nas diferentes variações de temperatura foram a taxa de aquecimento e tratamento térmico na temperatura de 220 °C, visto que *E. citriodora* e *Pinus taeda* foram submetidos ao mesmo programa de tratamento térmico, com patamares finais de 120min, e rampa de aquecimento iniciada e terminada em 105 a 225 °C.

Após esses ensaios analisados, podemos concluir que os tratamentos térmicos são uma solução importante para a modificação das estruturas das madeiras, sendo eles um método seguro e não poluente na propagação de toda sua realização.

As mudanças mais importantes foram nas propriedades físicas, mecânicas (de resistência e rigidez) e entomológicas na madeira, os resultados obtidos foram tratados estatisticamente, com a finalidade de analisar a existência ou não de diferenças entre os mesmos. Quanto maior for a atuação do calor, maiores serão as alterações na perda de massa e na densidade aparente da madeira. A degradação dos principais constituintes da madeira leva à perda de massa e, quando maior a rigidez do tratamento térmico, maior será a porcentagem de perda, para ambas as espécies.

Em suma, podemos concluir que diante aos vários métodos de tratamentos térmicos são encontrados resultados satisfatórios para que sempre busquem novos métodos para seu desenvolvimento.

RÉFERÊNCIAS

- MARCIO ROGÉRIO DA SILVA. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *Eucalypto citriodora* e *Pinus taeda***. Universidade de São Paulo (USP).
- AKGUL, M.; GUMUSKAYA, E.; KORKUT, S. **estrutura cristalina de pinho escocês tratado termicamente** [*Pinus sylvestris* L.] and *Uludag fir* [*Abies nordmanniana* (Stev) subsp. *Bornmuelleriana* (Mattf)] wood. *Wood Science and Technology*, v.41, p.281-289.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7190. **Projeto de estrutura de madeira**. Rio de Janeiro. ABNT, 1997.
- BOONSTRA, M.J.; TJEERDSMA, B. **Chemical analysis of heat treated softwoods** *holzforschung*, v.64, p. 204-211, 2006.
- BORGES, L.M.; QUIRINO, W.F. **Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var, *hondurensis* tratado termicamente**. *Revista Biomassa & Energia*, v.1, n.2, p. 173-182, 2004
- KORKUT, S; HIZIROGLU, S. **efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas da madeira** (*Corylus colurna* L.). *Materials and Desing*, v. 30 p. 1853-1858, 2009.
- MAGALHAES, W.L.E. **Tratamento mecânico visando o aumento da permeabilidade em madeiras de *Pinus elliottii***. Engelm Var.elliotti. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 9, Cuibá.
- MILITZ, H.; TJEERDSMA, B. **Heat treatment of wood by the platô-process** *Centre Technique du Bois et de l'Ameublement Paris* – France, Nordic Wood.
- MITSUI, K.; IMAGAKI, T.; TSUCHIKAWA, S. **Monitoring of hydroxyl groups in wood during heat treatment using NIR spectroscopy**. *Biomacromolecules*. v.9, n.1, p.286-288, 2008.
- PLATO INTERNATIONAL BV. **The platô technology. A novel wood upgrading technology**. Netherlands, 2002.

RETIWOOD. **Processo Retiwood. Acessado em:**

<<http://www.retiwood.com/en/processes.html>>