

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA FLORESTAL
CÂMPUS DOIS VIZINHOS

ROBSON PINHEIRO

**INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA TEMPERATURA SOBRE AS
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Pinus* sp.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

DOIS VIZINHOS

2017

ROBSON PINHEIRO

**INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA TEMPERATURA SOBRE AS
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Pinus* sp.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Msc. Ramiro Faria França

**DOIS VIZINHOS
2017**

P654i Pinheiro, Robson.
Influência do tempo e da temperatura sobre as
propriedades físico-mecânicas da madeira de *Pinus sp.*
/ Robson Pinheiro – Dois Vizinhos, 2017.
29f.:il.

Orientador: Msc. Ramiro Faria França
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de
Engenharia Florestal, Dois Vizinhos, 2017.
Bibliografiap. 27-29

1. Pinheiro 2. Madeira – Deterioração 3. Estruturas
de madeira (Construção civil) I. Wendt, Simone
Neumann, orient. II. Universidade Tecnológica Federal
do Paraná – Dois Vizinhos III. Título

CDD: 634.9751



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA TEMPERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Pinus* sp.

por

ROBSON PINHEIRO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 08 de Junho de 2017 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.

Ramiro Faria França
Orientador(a)

Prof. Dr. Marcos Aurélio Mathias de Souza
Membro titular (UTFPR)

Italo Mayke
Membro titular (UTFPR)

Prof. Msc. Douglas Carvalho
Membro titular (UTFPR)

RESUMO

PINHEIRO, R. **INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA TEMPERATURA SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Pinus* sp.** 2017, 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação Bacharel em Engenharia Florestal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dois Vizinhos, 2017.

O gênero *Pinus* agrupa mais de 100 espécies. No Brasil, o *Pinus* vem sendo plantado há várias décadas, inicialmente para fins ornamentais e a partir de 1950 com produção em escala comercial para suprir o abastecimento de madeira, tendo grande utilização na construção civil. A madeira é questionada sobre sua utilização na construção civil, principalmente com relação ao fogo, por ser um material combustível ela acabou sendo substituída por outros materiais como o ferro e aço. Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi de determinar a redução da resistência mecânica da madeira de *Pinus* sp. quando submetida a diferentes temperaturas, sendo 100, 250 e 500°C com diferentes tempos de exposição, 15, 30 e 45 minutos para cada temperatura. Para a temperatura de 100°C, quanto maior o tempo de exposição, maiores valores são obtidos de tensão máxima em ensaios de compressão paralela as fibras. A maior tensão foi obtida pelo tratamento 250°C (15min), mas diminuindo conforme o aumento do tempo, devido a quebra de ligações químicas. O comportamento da resistência a compressão é inversamente proporcional ao tempo de exposição, maiores valores são verificados em maiores tempos. A redução da área transversal está relacionada com o aumento da temperatura e do tempo.

Palavras-chave: Estruturas de madeira. Comportamento térmico. Segurança estrutural.

ABSTRACT

PINHEIRO, R. INFLUENCE OF TIME AND TEMPERATURE ON THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF THE WOOD OF PINUS sp. 2017, 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação Bacharel em Engenharia Florestal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Dois Vizinhos, 2017.

The Pinus genus groups more than 100 species. In Brazil, Pinus has been planted in the country, initially for ornamental purposes, and since 1950 with production on a commercial scale to supply the wood supply, having great use in civil construction. The wood is questioned about its own use in civil construction, especially with regard to fire, as it is a combustible material to end up substituted with other materials such as iron and steel. In this way, the objective of this work is to determine the reduction of the mechanical resistance of Pinus sp. When subjected to different temperatures, being 100, 250 and 500 ° C with different exposure times, 15, 30 and 45 minutes for each temperature. At a temperature of 100 ° C, the longer the exposure time, the higher the values obtained from the maximum stress in parallel compression tests such as fibers. A greater attempt was obtained by the treatment 250 ° C (15min), but decreasing as the time increased, due to the breakdown of chemical bonds. The behavior of the compressive strength is inversely proportional to the time of exposure, higher values are verified in larger times. The reduction of the transverse area is related to the increase in temperature and time.

Key-words: Wood structures. Technical performance. Structural safety.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 MADEIRA COMO MATERIAL CONSTRUTIVO	8
3.2 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA.....	10
3.3 COMPORTAMENTO DE INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS	15
4.1 MATERIAL.....	15
4.2 TRATAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	16
4.3 ALTERAÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA	17
5.RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5.1 COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS	19
5.2 FLEXÃO ESTÁTICA	22
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

1.INTRODUÇÃO

O cultivo de florestas com espécies exóticas tiveram início no final do século XX, especialmente na região sul do país para atender, principalmente a demanda de madeira serrada. As espécies nativas acabaram sendo substituídas por espécies que apresentavam um rápido crescimento, como o Pinus e Eucalipto.

A madeira teve importante participação na construção civil, sendo utilizada por muito tempo como elemento estrutural, por apresentar boas características de durabilidade e resistência, viabilidade econômica e por estar disponível em grande quantidade na natureza. A utilização da madeira em construções foi diminuindo com o passar do tempo, sendo preterida a outros materiais para o uso estrutural, sendo mais utilizada para caixarias, moldes e outras estruturas temporárias no canteiro de obras.

A madeira é um material de fácil manuseio, tendo uma densidade baixa em relação a outros materiais como o concreto, ferro e aço, além de ser renovável e sustentável, quando explorada legalmente.

A falta de conhecimento técnico, em particular das propriedades físicas e mecânicas da madeira, e o fato de ser um material combustível, proporcionaram inseguranças e dúvidas sobre sua utilização, além da presença do ferro, aço e concreto que surgiram com a evolução da construção civil e foram introduzidos nas edificações como alternativas mais rápidas e com menor custo. Em edificações, existem diversos fatores que alteram a resistência e a durabilidade dos materiais.

Portanto, analisar as propriedades físicas e comportamentos da madeira perante as várias situações que ocorrem na construção civil, promove uma melhor percepção sobre seu desempenho, sendo possível esclarecer dúvidas na utilização desse material e melhorar as condições de segurança perante algumas situações.

Dessa forma, com relação a temperatura, avaliando a sua reação frente a variações, fornecendo resultados de alterações de resistência e descrevendo os danos causados, este trabalho contribuirá para divulgação de conhecimento técnico a fim de que a madeira seja melhor compreendida sobre sua utilização nessas condições.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem o propósito de determinar as variações dimensionais e resistência mecânica ocasionadas na madeira de *Pinus* sp. devido à exposição a altas temperaturas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a variação de massa e de volume da madeira nos diferentes tratamentos estabelecidos;
- Obter os valores de resistência mecânica nos regimes de exposição determinados para flexão estática e compressão paralela as fibras
- Construir através de modelos as relações entre o comportamento mecânico e a temperatura para o *Pinus* sp.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MADEIRA COMO MATERIAL CONSTRUTIVO

Durante muito tempo as florestas nativas supriram a demanda de matéria prima para a produção, como escoramentos de lajes de forma temporária, construção de andaimes e produtos de utilização duradoura de maior resistência e diâmetro. Em 1967 as florestas plantadas começaram a ganhar força como um meio de negócio, através de incentivos do governo federal para os reflorestamentos, para suprimento da demanda de madeira e início da extinção das matas de *Araucaria angustifolia*, sendo introduzidas novas espécies exóticas para plantação, especialmente o pinus e o eucalipto (BALLONI, 2009).

Santini, Haselein e Gatto (200) destacam que durante as décadas de 60 e 70, com o incentivo do governo, espécies exóticas de crescimento rápido foram introduzidas no país, visando atender o consumo da madeira pelas indústrias. Essas espécies disponibilizariam a madeira, e aumentariam o estoque na região sul do país. O *Pinus elliottii* e o *Pinus taeda* foram as espécies de coníferas que tiveram a melhor adaptação na região.

Segundo IBÁ (2015), o Brasil totalizou 7,74 milhões de hectares de florestas plantadas para fins industriais em 2014, um aumento de 1,8% comparado ao ano anterior, porém abrangendo uma área que não corresponde nem a 1% do território brasileiro. A ocupação dos plantios de *Pinus* sp. representam 1,59 milhão de hectares e os estados do Paraná e Santa Catarina possuem as maiores concentrações, com 42,4% e 34,1%, respectivamente.

A queda da confiança na economia brasileira, devido a alterações nos programas de governo no ano de 2014, levou a redução das compras de vários produtos. A construção civil foi afetada diretamente. A queda do crédito imobiliário e a desaceleração da construção civil ocasionaram uma queda de 6,1% no consumo doméstico de madeira serrada, 0,5 milhões de metros cúbicos a menos, comparados ao período anterior. É importante ressaltar que a produtividade média dos plantios, de 39 m³/ha.ano para eucalipto e 31m³/ha.ano para Pinus, mantém o Brasil na liderança no ranking mundial (IBÁ, 2015).

Em consequência das suas características e vasta quantidade presente no meio, a madeira sempre teve um papel importante na construção, sendo um material com várias

aplicações utilizadas pelo homem, diferentes estruturas e acabamentos, como pontes, casas e pavilhões (MARQUES, 2008).

Para escolha de um produto, é necessário avaliar várias características importantes em relação ao meio ambiente, como a disponibilidade de matéria-prima, os impactos ambientais sobre o processo de extração, transporte, utilização e demolição, eficiência, durabilidade, manutenção, reutilização e possível reciclagem do material (ARAÚJO, 2013).

Atualmente a sua presença na construção civil está relacionada em produtos de acabamento, esquadrias, molduras, pisos e estruturas de telhados. As madeiras menos nobres são utilizadas como fôrmas temporárias de concreto armado, escoras, e estruturas (COPAT, 2014).

A madeira é um material de fácil manuseio, possui baixa densidade, aproximadamente 12% da densidade do aço, é uma característica importante nesse sentido. Inicialmente em forma de tora, o seu desdobro é um processo simples que não necessita de tecnologias avançadas e outra grande vantagem é que o material pode ser repostado com as técnicas de reflorestamento (GESUALDO, 2003).

A madeira possui características que beneficiam a construção civil, além de contribuir para sustentabilidade ambiental, por ser obtido de reservas renováveis, ter uma possível reutilização do seu material e economia de recursos hídricos, pois em nenhum processo industrial a água é utilizada (COPAT, 2014).

Segundo Junior e Dias (1997) apesar da madeira seja susceptível ao ataque de insetos e apodrecimentos sob as condições específicas, técnicas e tratamentos adequados são utilizados com as tecnologias existentes, a madeira pode ser protegida contra a deterioração por décadas. Sendo um excelente material para construções, economicamente viável devido a sua resistência, disponibilidade e durabilidade.

Em relação ao sistema estrutural de residências tipo treliças, o uso da madeira é mais comum do que outros materiais, sendo utilizada pela facilidade em que as treliças possam ser fabricadas e montadas para se obter uma estrutura desejada (JUNIOR; DIAS, 1997).

O desgaste e a deterioração da madeira podem ocorrer através de diferentes maneiras. Por isso, torna-se importante a identificação e caracterização da causa principal. Os defeitos são identificados como: mecânicos, físicos, químicos e biológicos. O fogo é o principal agente físico de destruição, pois sua ação é mais rápida

e evidente comparando a deterioração de outros agentes e microrganismos (MENDES; ALVES, 1988).

Segundo Copat (2014) a madeira possui características naturais que favorecem as condições de isolamento térmico, absorção acústica, além de obter baixa massa específica e grande resistência mecânica. Seu uso também é vantajoso em estruturas de madeira pois há baixo desperdício dos materiais, pois os elementos são fabricados previamente.

3.2 PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA

É muito importante conhecer as propriedades físicas e mecânicas das madeiras, se referindo quanto ao uso e aplicações no qual as mesmas serão destinadas. As madeiras podem ser classificadas e separadas em suas utilizações que demonstram ser mais apropriadas, por exemplo em estruturas, uso em ambientes internos e externos de habitação, móveis, painéis e embalagens, entre outros, e com outros aspectos relacionados a economia, estético, durabilidade e trabalhabilidade (NETO, et al., 2009).

A massa específica é uma das principais propriedades físicas da madeira, servindo como referência para sua classificação. A madeira pode ser mais resistente, elástica e dura, conforme o aumento do peso, porém com uma trabalhabilidade mais dificultosa e maior variabilidade. O conhecimento da massa específica é importante para se obter informações sobre a qualidade e classificação de uma madeira (MORESCHI, 2005).

Em outros países é bastante comum a madeira ser classificada utilizando métodos não destrutivos, sendo identificadas suas propriedades físicas e mecânicas como avaliação visual, químicas, técnicas de vibração, emissões acústicas e entre outros. A utilização da avaliação visual indica a qualidade através da cor, quantidades, tipos, posições dos nós, ataques de microrganismos e direções das fibras presentes na madeira (GONÇALVES; BARTHOLOMEU, 2000).

Assim como todos os materiais que são utilizados em construção civil, a madeira quando usada para a finalidade estrutural também devem ser classificadas e avaliada previamente por suas propriedades físicas e mecânicas. A norma brasileira NBR 7190 (1997) estabelece classificações diferentes de resistências que são relacionadas as suas características, módulo de elasticidade e densidade. (SEGUNDINHO *et al.*, 2011).

A madeira é um material poroso e higroscópico, possuindo a capacidade de troca de água com o ambiente, e sua secagem natural pode ser um processo lento pois depende de fatores como a densidade, porosidade e tamanho do material (REZENDE, 2003).

A retratibilidade é decorrente do processo de perda de água, conseqüentemente diminuição da umidade, que além da perda de massa causa alteração das suas dimensões e seu volume. Estudar o comportamento da madeira em relação as suas variações dimensionais é fundamental para se determinar sua melhor utilização industrial, aproveitando de uma maneira mais eficiente, com relações que existem entre a densidade, retratibilidade, umidade, e suas expansões (REZENDE, 2003).

O teor de água presente na madeira influencia nas suas propriedades físico-mecânicas. As variações dos teores de umidade promove alterações das dimensões da madeira, que é denominado de retração e incitamento higroscópico e com o aumento da umidade, a resistência da madeira diminui. A umidade da madeira influencia ainda no seu tratamento com fluídos, curvamento, resistência ao ataque de fungos xilófagos, processo de colagem, na fabricação de compensados, aglomerados e processamento mecânico (JANKOWSKY, 1990).

O controle do teor de umidade da madeira é necessário para a sua utilização correta, para evitar o desenvolvimento de defeitos como arqueamentos, empenamentos, torções e outros defeitos que estão relacionados as propriedades mecânicas. Sendo um material higroscópico, ela sempre está submetida a obter alterações no teor de umidade por causa da variação do clima no meio ambiente, para se atingir um estado de equilíbrio com a atmosfera, denominado de equilíbrio higroscópico (MORESCHI, 2005).

Após uma determinada deformação, a madeira possui uma propriedade que possibilita a madeira reaver a sua forma original após a remoção de uma carga que foi aplicada, denominada de elasticidade. Essas propriedades elásticas são características de corpos maciços de madeira, que são analisadas quando há uma carga aplicada sobre o limite proporcional da elasticidade, quando essa carga for acima do limite ocorrerá as deformações plásticas que são irreversíveis, posteriormente o material apresentará rupturas (MORESCHI, 2005).

O peso específico da madeira é a relação entre a quantidade de massa por unidade de volume. Entre as espécies existem variação de pesos, mesmo apresentando dimensões iguais, porém as espécies mais pesadas geralmente possuem características

de maior durabilidade. Quanto maior o peso específico, a resistência mecânica e a durabilidade da madeira aumentam proporcionalmente, e conseqüentemente a permeabilidade e a trabalhabilidade diminuem (COPAT, 2014).

É possível se obter indicadores que possibilitam selecionar as madeiras capazes que são empregadas em estruturas de telhados com mais facilidade, que é através do ensaio de resistência a tração. Existem outros testes, tal como no ensaio de compressão perpendicular às fibras, uma carga é aplicada sobre a fração de madeira para se verificar a resistência máxima que a espécie suportará sem ser danificada (MADY, 2016).

3.3 COMPORTAMENTO DE INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES

A madeira possui um bom desempenho quando é usada em edifícios projetados, construídos e conservados de forma correta, porém a sua utilização como material de construção é restrito devido ao preconceito referente ao seu comportamento ao fogo, sendo um material combustível e no momento quando é aquecida, libera gases combustíveis que, quando expostos ao calor, queimam e produzem chamas. Através desses gases quentes e as chamas, parte da madeira é aquecida, e a que ainda não foi atingida pelo calor e disponibiliza mais gases inflamáveis, causando um encadeamento que alimenta a combustão (FIGUEROA; MORAES, 2009).

A estrutura do xilema é responsável por reter inúmeras massas de ar em seu interior, agindo como um isolante. Existe três mecanismos que são necessários no transporte do calor, sendo a radiação, convecção e a condução. A madeira é um mau condutor térmico por causa de sua estrutura celular, e de sua constituição por membranas celulósicas (MADY, 2016).

Independentemente das características vantajosas que apresenta, a madeira possui grande variabilidade mecânica, é susceptível ao ataque de insetos, além de ser um material combustível. Incêndios em diferentes tamanhos de construções ocorrem com alta frequência, sendo iniciados a partir de ignições de outros materiais presentes nas construções como vazamento de gás, curtos circuitos em instalações elétricas e eletrodomésticos ligados as fontes de energia (OLIVEIRA, 2012).

No Brasil, o desconhecimento do comportamento da madeira sob a ação do fogo gera incertezas e insegurança, porque os possíveis riscos relacionados aos incêndios são fatores que limitam o seu uso para a construção de edificações e estruturas em madeira,

no qual não recebem o apoio financiamento de construções desse material pelas instituições bancárias nacionais (FIGUEROA; MORAES, 2009).

Segundo IBAPE (2013) durante um incêndio, é importante se obter informações de quando iniciou o incêndio e quando o fogo foi apagado em cada local em que ele ocorreu, pois o fogo se espalha, e seu combate não ocorre de uma vez, fazendo com que as partes estruturais fiquem expostas a altas temperaturas e durações diferentes. Sendo assim, na ocorrência de um incêndio em uma edificação, sabe-se que a temperatura interna no incêndio, depende da duração do incêndio, e que sua preocupação principal é que tenha uma garantia de sua estabilidade seja preservada.

A ocorrência de incêndio ocorre por meio da conciliação de três fatores diferentes, como: fonte de calor, combustível mais o comburente, que iniciam todo o processo e conhecendo o tempo de incêndio e da exposição às chamas, pode-se estimar a quais temperaturas uma edificação fica exposta (IBAPE, 2013).

Quando peças de diâmetro maior são expostas ao fogo, uma camada superficial de carvão é formada, agindo como uma espécie de isolante, que impede a saída de gases inflamáveis, reduzindo o aquecimento e a degradação do material, favorecendo a capacidade de sustentação das cargas de uma edificação, conservando as propriedades físicas da madeira mesmo sendo exposta após elevadas temperaturas durante um certo tempo (PINTO, 2004).

A madeira apresenta um conjunto de características físicas e mecânicas que, apesar de ser um material orgânico, são raramente encontradas em outros materiais e possui também inúmeras variações de padrões estéticos. A constituição e organização do tecido xilemático na madeira são responsáveis pela característica física de baixa condutividade térmica, pois as células que constituem a madeira possuem elevada proporção de celulose, que é um mau condutor (MADY, 2016).

Por ser um combustível sólido, quando exposta a uma elevada temperatura, a madeira passa por um processo de degradação térmica. Diferentes resíduos de interesse comercial são gerados, como os compostos químicos voláteis, gases, vapor d'água, fumaça, cinzas e carvão. Esse processo de degradação térmica, auxilia na compreensão e no estudo do comportamento da madeira quando utilizada em sistemas construtivos. A madeira é lentamente aquecida durante o intervalo até os 200°C, e libera primeiramente o vapor d'água, gases e perda de massa uniforme. Mesmo que a carbonização aconteça a temperatura acima de 95°C, a madeira não entra em ignição (PINTO; JUNIOR, 2011).

O primeiro processo endotérmico é denominado de pirólise lenta, e em segundo momento são liberados os gases em um processo mais rápido, denominado de pirólise rápida, e mesmo que não se tenha uma ignição de imediato, uma condição exotérmica é atingida. Entre a temperatura que determina a transição da reação endotérmica e exotérmica, é determinado como o ponto de ignição (PINTO; JUNIOR, 2011).

A partir do momento em que a temperatura chega na faixa entre 280°C a 500°C uma grande quantidade de gases combustíveis que abastecem a combustão são liberados com a presença de chamas, nos quais são: metano, metanol, formaldeído, ácido fórmico e acético e hidrognio e alcatrões altamente inflamáveis (PINTO; JUNIOR, 2011).

O peso específico e o teor de umidade da madeira afetam na condutividade térmica para qualquer espécie. Conforme o peso específico e a umidade aumentam, a capacidade da madeira em conduzir calor também aumentará, em madeiras secas a um teor de umidade estável possuem melhor função isolante (MADY, 2016).

O material gasoso é transportado para fora da madeira por meio de vapores, formando uma suspensão de gotículas que compõe a fumaça. O efeito isolante desse carvão recém-formado retarda o tempo necessário para que a madeira atinja seu ponto exotérmico (PINTO; JUNIOR, 2011).

Entre a temperatura de 500°C e 1000°C a madeira entra em processo de degradação, quando as chamas desaparecem, e a queima luminosa do monóxido de carbono e hidrognio se inicia. Por meio da incandescência do carvão que sobrou e aparentar ser brilhante, denomina-se essa etapa como combustão incandescente (PINTO; JUNIOR, 2011).

Portanto, a falta de conhecimento do comportamento físico e mecânico da madeira sob a ação do fogo fez com que houvesse uma utilização menor desse material em partes estruturais das construções. O conhecimento sobre o comportamento da madeira mediante a sua redução da resistência mecânica perante as altas temperaturas de incêndios permite esclarecer dúvidas no emprego deste material na construção civil, e melhorar as condições de segurança nas edificações (OLIVEIRA, 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

O material utilizado no presente trabalho foi selecionado de lotes de madeira serrada de *Pinus* sp.. As madeiras em tábua com dimensões de aproximadamente 30 cm de comprimento, 30 cm de largura e 2,5 cm de espessura.

Os corpos de prova foram confeccionados com adaptações das normas específicas para cada ensaio pois o material disponível obtinha limitações em relação a espessura, por isso foram seccionadas, e classificadas com dimensões de 2,5 cm de largura x 2,5 cm de espessura x 7,5 cm de comprimento para os testes de compressão paralela as fibras. Para o teste de flexão estática, a dimensão dos corpos de prova foram de 2,5 cm de largura x 2,5 cm espessura x 10 cm de comprimento.

No total foram confeccionados 300 corpos de prova, sendo 15 por tratamento, incluindo as testemunhas, para cada teste mecânico. As normas e demais referências utilizadas neste trabalho são descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Normas e ensaios de caracterização dos corpos de prova

Ensaio	Normas / Metodologia
Umidade	TAPPI 208 om-94
Massa Específica	NBR 7190
Redução da Área Transversal	FRANÇA (2015)
Compressão Paralela	NBR 7190
Flexão Estática	NBR 7190

As amostras antes de seguirem para exposição em altas temperaturas, foram acondicionadas em sala climatizada para equilíbrio da umidade da madeira. Após o período de 4 semanas para a estabilização, foram medidos o volume (cm³), massa (g) e área da seção transversal (cm²) dos corpos de prova. Para cálculo da umidade, volume e massa foram utilizados paquímetros, balança de precisão e estufa de secagem á 100°C com controle de temperatura, realizando a remoção da umidade do material até a condição de madeira seca (0% de teor de umidade) por 24 horas.

Parte dos corpos de prova foram ensaiados antes dos tratamentos, realizando os testes de compressão paralela às fibras e flexão estática, para estabelecer os valores médios para a Testemunha, madeira não submetida a ação de temperaturas e com umidade de equilíbrio em 15% (base seca). As particularidades de cada ensaio serão descritas a seguir.

4.2 TRATAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA

Para avaliar a ação da temperatura sobre a resistência mecânica dos corpos de prova de *Pinus* as amostras, primeiramente, foram separadas por tratamento com 10 repetições sendo delineamento em blocos casualizados.

As amostras foram mantidas em sala climatizada para estabilização da umidade do material em 15% (base seca) a 22°C, UR 25%, para o tratamento T1, os corpos de prova foram diretamente inseridos em forno mufla, com controlador microprocessado de temperatura. Após atingir a temperatura estabelecida, os corpos de prova foram colocados dentro do forno onde permaneceram pelo tempo estabelecido. As amostras foram retiradas do equipamento e alocadas em um dissecador para interrupção do processo e resfriamento.

Os corpos de prova foram submetidos a diferentes temperaturas com diferentes tempos de exposição, seguindo o delineamento experimental conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Delineamento experimental (DBC) das testemunhas

Temperatura (°C)	Tempo de Exposição (min.)	Amostras
TESTEMUNHA	-	TEST
	15	A15
T1-100	30	A30
	45	A45
	15	B15
T2-250	30	B30
	45	B45
	15	C15
T3-500	30	C30
	45	C45

4.3 ALTERAÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

Assim como nas testemunhas, nos tratamentos foram avaliados a perda de massa (%), a redução em volume (cm³) e a redução da área transversal, visto que este parâmetro exerce influência para determinação dos coeficientes de resistência mecânica.

Quanto a perda de massa:

$$PM = \frac{M_s - M_t}{M_s} * 100$$

Onde:

PM: Perda de massa (%);

Ms: Massa seca (g);

Mt: Massa após o tratamento (g);

Os corpos de prova foram avaliados após os tratamentos, segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), obtendo os valores de resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) em MPa e dos módulos de elasticidade (MOE) em MPa, este para o ensaio de flexão estática. Os resultados foram obtidos após ensaios destrutivos realizados em máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL-3000 sem o auxílio de extensômetro, com a deformação obtida através do gráfico fornecido pelo software, TESC.

O módulo de elasticidade, rigidez da madeira à flexão é determinado pela inclinação da curva, porém, o deslocamento considerado se refere ao medido no meio do vão entre os apoios do suporte da amostra:

$$E_{M0} = \frac{(F_{m, 50\%} - F_{m, 10\%})L^3}{(\vartheta_{50\%} - \vartheta_{10\%})4bh^3}$$

Onde,

E_{M0} = Módulo de elasticidade (MPa)

F = Carga máxima (N)

ϑ = Flecha (mm)

Após determinação dos valores, foi utilizado, para verificação das diferenças entre os tratamentos, o teste de Tukey a 5% de probabilidade, relatando em tabelas os valores médios (\bar{x}) encontrados, juntamente com o coeficiente de variação (S) através do software STATISTICA R7.

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 COMPRESSÃO PARALELA AS FIBRAS

Após os tratamentos dos respectivos corpos de prova, as comparações entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus* sp. para os testes de compressão paralela as fibras e as análises estatísticas dos dados são representados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de tensão máxima e perda de massa e massa específica dos tratamentos

Amostras	Tensão Máxima (MPa)	Perda de Massa (%)	Massa Específica (g/cm ³)
Test.	30.30 cd	---	0.531 a
A15min	33.38 bcd	4.35 d	0.509 a
A30min	48.86 ab	7.54 cd	0.570 a
A45min	50.04 a	9.19 cd	0.528 a
B15min	52.53 a	7.52 c	0.531 a
B30min	43.03 abc	15.52 b	0.541 a
B45min	21.00 d	24.07 a	0.539 a

É importante citar que para o tratamento T3-500, não foi possível obter resultados de análise de compressão paralela as fibras e flexão estática. A relação entre a temperatura de 500 °C do tratamento 3 e as dimensões dos corpos de prova, ocasionaram carbonização total e danificação dos mesmos, impossibilitando os ensaios mecânicos e os cálculos de perda de massa devido a fragmentação do material. Para avaliação da resistência mecânica a esta temperatura de exposição, as amostras necessitam de uma maior seção transversal.

Vale ressaltar que para os tratamentos realizados a 250°C os corpos de prova foram previamente secados em estufa, com isso, a perda de massa constatada sofre pouca influência da retirada da água da madeira e sim a degradação de compostos químicos fundamentais da madeira.

Para o tratamento T3, recomenda-se corpos de prova de maior dimensão para que seja possível avaliar a ação da alta temperatura no material, de forma que não haja degradação total. O comportamento da madeira frente a altas temperaturas exposta a madeira é objeto de estudo e de destaque frente a outros materiais construtivos, visto que sua carbonização ocorre da superfície para o interior, criando uma camada de proteção ao material, que ainda possibilita sua resistência.

Segundo Figueroa e Moraes (2009), as macromoléculas apresentam diferentes níveis de degradação térmica em função cristalinidade de cada uma. Por exemplo, no caso da celulose, ocorre a temperaturas entre 200 °C e 280 °C, com uma degradação progressiva que inclui despolimerização e desidratação. Outro ponto importante é que, quando a celulose é tratada termicamente, o teor de umidade retarda a sua degradação térmica. A decomposição térmica da lignina ocorre em ampla faixa de temperatura, porém uma pequena parte se decompõe em temperaturas menores que 450°C (PEREIRA et al.,2013).

No caso do tratamento 3, temperatura de 500°C, a degradação total da celulose e de grande parte da lignina fez com que as ligações químicas do polímero natural fossem totalmente rompidas em toda extensão do corpo de prova, impedindo a caracterização do material.

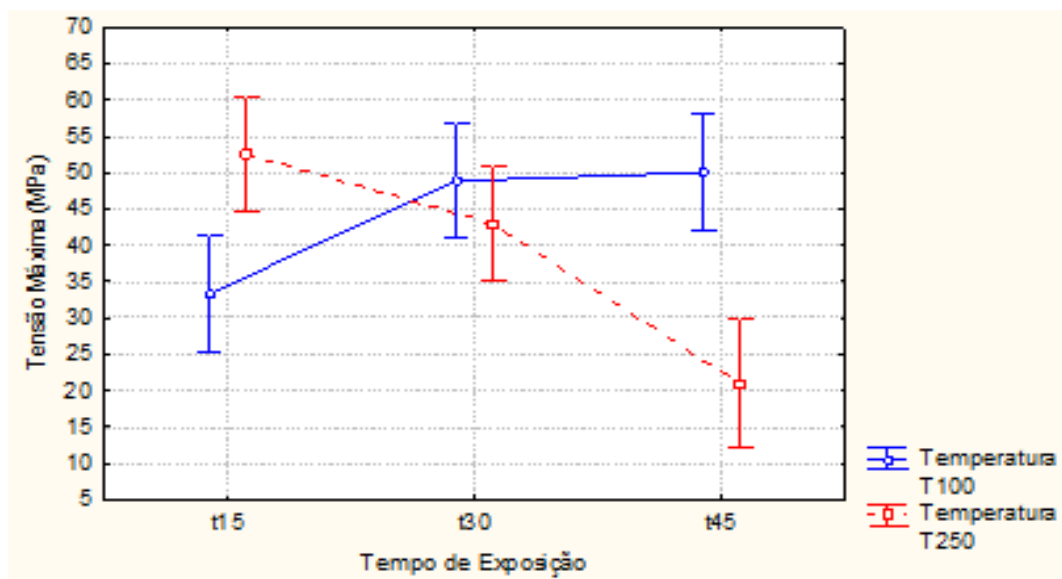
A coluna referente a massa específica demonstra que o fator não influencia nos resultados referentes as análises físicas e mecânicas. As amostras não se diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey e desta forma não pode-se discutir a massa específica como fator de resposta aos resultados, embora esteja diretamente relacionada a tensão máxima admissível da madeira, em ensaios de compressão e flexão.

Dentre os tratamentos avaliados, como visto na Tabela 3, analisando os dados de tensão máxima obtidos no ensaio de compressão paralela as fibras, observa-se o maior valor para a amostra B15: 52,53MPa (temperatura de 250°C e tempo de exposição de 15 minutos). Estatisticamente, se equiparam a este resultado as amostras A30, A45 e B30.

Segundo os resultados obtidos por Neto et al. (2009), foram determinados valores médios da resistência de compressão paralela as fibras de duas espécies de pinus, sendo 34,5 MPa para o *Pinus oocarpa*, e 27,42 MPa para o *Pinus taeda*. O valor médio encontrado para este trabalho está situado entre os citados (30,30 MPa) obtidos para testemunha, com umidade a 15%.

O comportamento dos dados segue a linha de que, inicialmente, o principal fator de interferência na propriedade avaliada é o teor de umidade da madeira. Os tratamentos do grupo T1 (100°C) realizam a remoção da umidade do material, o aumento da tensão máxima é proporcional a diminuição da umidade da madeira conforme Gráfico 1.

Gráfico 1: Relação entre os tratamentos e valores de tensão máxima (MPa).



É possível constatar que, para o tratamento T1, quanto maior o tempo de exposição, maiores os valores de tensão máxima, 33,38MPa(b), 48,86MPa(a), 50,04MPa(a), respectivamente. Como apresentado anteriormente, devido a remoção da umidade da madeira. O tempo de exposição para este tratamento apresentou dois grupos estatisticamente diferentes, sendo que os dois maiores tempos de exposição não se diferiram entre si, porém apresentaram diferença quando comparados ao tempo de 15min.

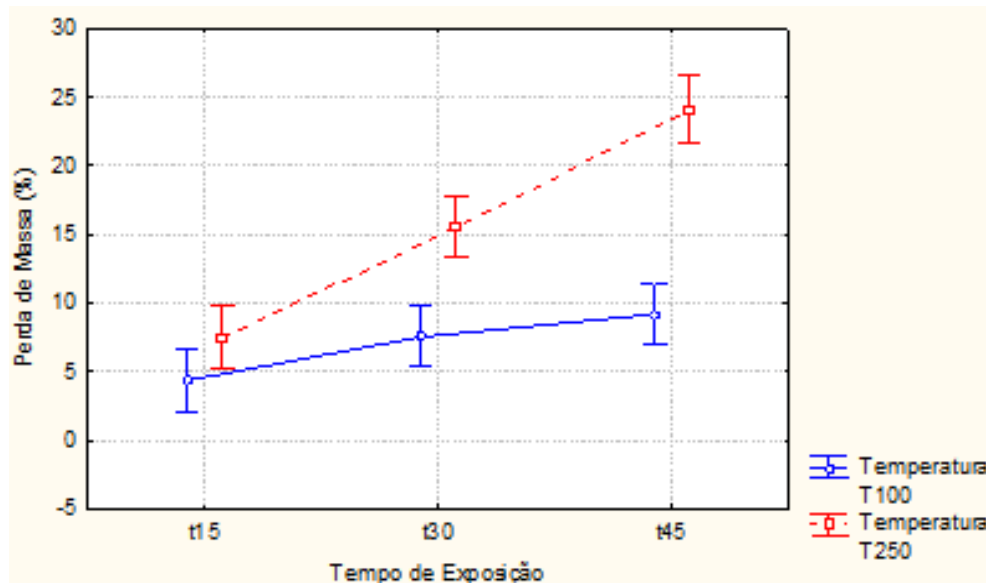
Para o T2 (250°C), os resultados são de 52,53MPa(a), 43,03MPa(a) e 21,00MPa(b), respectivamente para os tempos de 15, 30 e 45 minutos. O comportamento para esta temperatura foi inverso ao discutido para a temperatura de 100°C, com o aumento do tempo de exposição, evidenciou-se um menor valor de resistência a compressão, sendo que o tempo de 45min diferiu estatisticamente dos outros tempos.

A alteração do comportamento das moléculas, transição vítrea, uma transição para um estado desorganizado do polímero, causa sua maior mobilidade, afeta a capacidade de resistência a esforços. Segundo Figueroa e Moraes (2009), abaixo de 250°C, ocorre a transição vítrea, da madeira seca, da celulose e das hemiceluloses. Os autores ainda citam que a partir de 200°C há o aumento da reação química e eliminação dos gases, tendo a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas como um

fator de redução da resistência do material sob exposição a altas temperaturas prolongadas.

O Gráfico 2 apresenta a perda de massa entre as temperaturas, para os ensaios de compressão paralela as fibras. E como esperado, quanto maior o aumento da temperatura e do tempo de exposição, maior a perda de massa.

Gráfico 2. Perda de massa para os tratamentos T1 e T2 (amostras para o ensaio de compressão paralela).



5.2 FLEXÃO ESTÁTICA

Após os tratamentos dos respectivos corpos de prova, as comparações entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus* spp. para os testes de flexão estática, foram determinados o módulo de elasticidade MOE (MPa) e perda de massa, as análises estatísticas dos dados são representados na Tabela 4.

Tabela 4. Módulo de Elasticidade e perda de massa após os tratamentos.

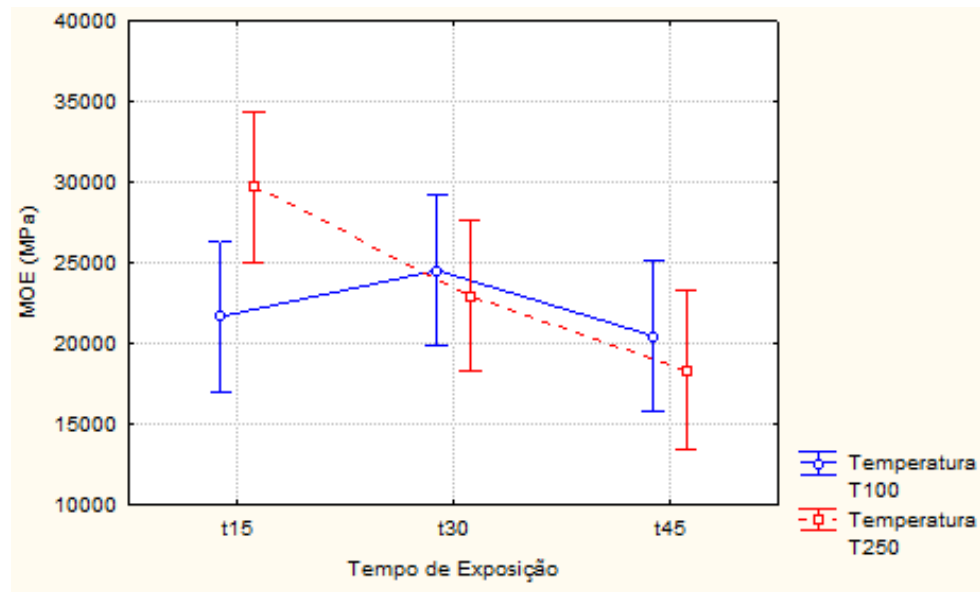
Amostras	MOE (MPa)	Perda de Massa (%)
Test.	17.666 b	---
A15min	21.665 ab	3,38 c
A30min	24.525 ab	3,94 c
A45min	20.455 ab	4,08 c
B15min	29.688 a	3,16 c
B30min	22.934 ab	9,07 b
B45min	18.367 b	18,75 a

Dentre os tratamentos avaliados, os dados de MOE (MPa) obtidos no ensaio de flexão estática, observa-se o maior valor para a amostra B15, 29,688 MPa (temperatura de 250°C e tempo de exposição de 15 minutos). Estatisticamente, se equiparam a este resultado as amostras A15, A30, B30 e A45.

Ballarin e Palma (2003) em *Pinus taeda* obtiveram valores médios, de madeira juvenil e adulta, de MOE 13,81MPa, amostras com densidade média de 0,605g/cm³ a 12 % de umidade. Embora com valores de massa específica superiores, o módulo de elasticidade encontrado por Ballarin e Palma (2003) é inferior ao calculado para as testemunhas, 17,67Mpa ($\rho = 0,532\text{g/cm}^3$; 15% de umidade).

No Gráfico 3 é possível verificar a diminuição do módulo de elasticidade do material quando exposto a temperaturas mais elevadas, no caso, o T2 com temperatura de 250°C causou diferentes valores médios, comprovados estatisticamente, entre os tempos de 15 e 45min. As amostras expostas a temperatura de 100°C não apresentaram variações perceptíveis.

Gráfico 3. Módulo de elasticidade em diferentes tempos de exposição.



O Gráfico 4 apresenta o comportamento da redução da área transversal das amostras, frente aos diferentes corpos de prova empregados nos testes mecânicos, compressão e flexão.

Gráfico 4. Perda de massa para os tratamentos T1 e T2 (amostras para o ensaio de flexão estática).

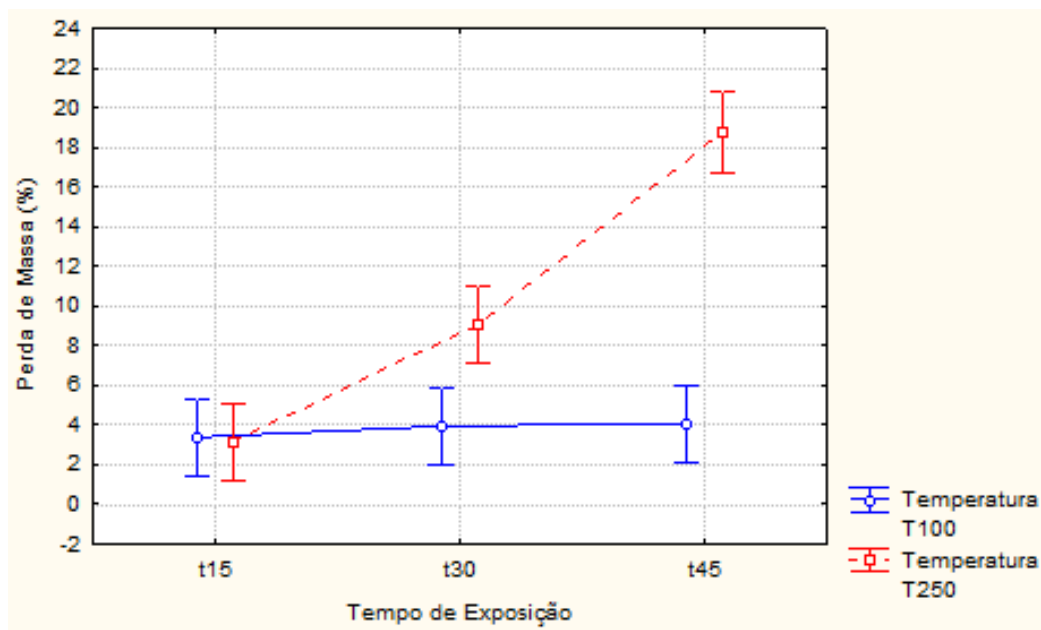
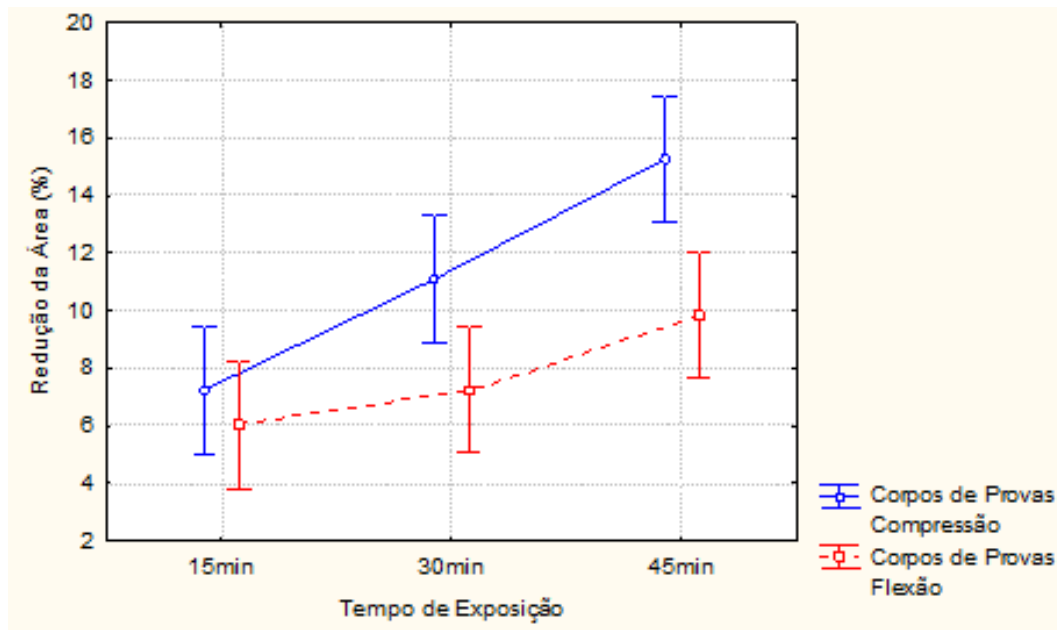


Gráfico 5. Redução da área transversal das amostras.

Os corpos de prova para realização dos ensaios possuem dimensões diferentes, as curvas de redução da área transversal, mesmo apresentando tendências iguais, apontaram diferenças entre as amostras.

Foi realizado teste de correlação de Pearson para verificação do comportamento das propriedades mecânicas da madeira com a redução da área da seção transversal dos corpos de prova. Embora não significativa, a correlação apontou que maiores reduções da seção resultam em maiores valores de resistência mecânica.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

- Para a temperatura de 100°C, quanto maior o tempo de exposição dos tratamentos e tempos estabelecidos, maiores valores são obtidos de tensão máxima em ensaios de compressão paralela as fibras. Dentre os tratamentos, o maior valor de tensão máxima em ensaio de compressão paralela as fibras foi de 52,53MPa, para o tratamento com 250 °C e 15 minutos de exposição.
- Para temperatura de 250°C, o comportamento da resistência a compressão é inversamente proporcional ao tempo de exposição, maiores valores são verificados em menores tempos.
- Dentre os tratamentos, o maior valor do módulo de elasticidade medido através do ensaio de flexão estática foi de 28,69MPa, para o tratamento com 250°C e 15 minutos de exposição.
- Para determinação das propriedades mecânicas da madeira submetida à temperatura acima de 450°C recomenda-se a confecção de corpos de prova com maior seção transversal, considerando o calor específico do material.
- A diminuição da área transversal está relacionada com um aumento de temperatura e tempo de exposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 7190: Projeto de estruturas da madeira**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 60p. Rio de Janeiro, 1997.

ARAÚJO, R. T. Alternativas sustentáveis de uso da madeira na construção civil. **Revista Especialize Ipog**. Manaus, janeiro, 2013.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.3, p.371-380, 2003.

BALLONI, C. J. V. **Caracterização física e química da madeira de *pinus elliottii***. 2009. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” Campus experimental de Itapeva, 2009.

COPAT, G. P.; **Madeira tratada com ignífugos: Análise da resistência mecânica após a exposição ao fogo**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto alegre, v.9 n.4, p.157-174, outubro/ dezembro, 2009.

FRANÇA, R.F. **Estrutura anatômica da madeira e do carvão de espécies da Caatinga e suas propriedades**. Dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná, 100f. Curitiba, 2015.

GESUALDO, F. A. R.; **Estruturas de Madeira**. Notas de Aula. Universidade Federal de Uberlândia, Curso de Engenharia Civil, 2003.

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v.4, n.2, p. 269- 274, 2000.

IBÁ, Relatório Ibá 2015, **Indústria Brasileira de Árvores**, Edição Outubro 2015.

IBAPE, Perícias relacionadas a incêndios. **XVII – COBREAP - Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias** - Santa Catarina, 39 f. 2013.

JANKOWSKY, I. P. Fundamentos de secagem de madeiras. **Documentos Florestais**. Piracicaba, p. 1-13, Junho, 1990.

JUNIOR, C. C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.1, p.71-77, 1997.

MADY, F. T. M. **Conhecendo a madeira**. Não paginado. Disponível em: <<http://www.conhecendoamadeira.com/>>. Acesso em: 20 abril 2016.

MARQUES, L. E. M. M. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção**. 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil- Especialização em construções civis) - Faculdade de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

MENDES, A. S.; ALVES, M. V. da S.; **A degradação da madeira e sua preservação**. Instituto Brasileiro de desenvolvimento florestal, 1988.

MORESCHI, J. C.; **Propriedades da Madeira**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

NETO, S. P. M.; TELES, R. F.; RODRIGUES, T. O.; VALE, A. T. ; SOUZA, M. R.; Propriedades mecânicas da madeira de cinco procedências de *Pinus caribea* var. *hondurensis* implantadas no Cerrado do Distrito Federal, **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**, 2009.

OLIVEIRA, L. K. **Resistência mecânica da madeira: Estudo da variação mediante ação do fogo**. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A.C. Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v.37, n.3, p.567-576, 2013.

PINTO, E. M. A madeira como um material construtivo resistente ao fogo. **Revista Eletrônica de Ciências**. São Carlos, n. 27, junho/ agosto, 2004.

PINTO, E. M.; JUNIOR, C. C. Comportamento da madeira exposta ao fogo. **Revista da Madeira**, n. 128. Agosto, 2011.

REZENDE, M. A.; Retratibilidade da madeira de *Pinus caribea* var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis* e suas relações com a umidade e densidade. **Revista Scientia Florestalis**. n.64, p.120-127, 2003.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. R. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.10, n.1, p.85-93, 2000.

SEGUNDINHO, P. G. A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; JUNIOR, C. C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v.36, n.6, p. 1155-1161, 2012.

TAPPI. **T 208 0M-94: Moisture in Wood, pulp, paper and paperboard**. Official standard. TAPPI Methods, 4p. 1994.