

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

BRUNO SANGALI ARANTES

DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS ELÁSTICOS DA MADEIRA
TECA (*Tectona grandis* L.F.) SUBMETIDAS A DIFERENTES
TRATAMENTOS TÉRMICOS

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2022

BRUNO SANGALI ARANTES

DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS ELÁSTICOS DA MADEIRA
TECA (*Tectona grandis* L.F.) SUBMETIDAS A DIFERENTES
TRATAMENTOS TÉRMICOS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2022


BRUNO SANGALI ARANTES

DETERMINAÇÃO DOS MÓDULOS ELÁSTICOS DA MADEIRA
TECA (*Tectona grandis* L.F.) SUBMETIDA A DIFERENTES
TRATAMENTOS TÉRMICOS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 07 de março de 2022.


COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 REJANE COSTA ALVES
Data: 14/07/2022 11:17:57-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof^a. D.Sc. Rejane Costa Alves

Universidade Federal do Espírito Santo


Orientadora

Documento assinado digitalmente
 PEDRO GUTEMBERG DE ALCANTARA SEGUNDINHO
Data: 15/07/2022 09:35:14-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. D.Sc. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador

Documento assinado digitalmente
 ALICE SOARES BRITO
Data: 15/07/2022 08:47:06-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof^a. D.Sc. Alice Soares Brito

Instituto Federal do Norte de Minas Gerais

Examinadora

Aos meus pais, Ozonia Sangali Arantes
e Reinaldo Lino Arantes.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradecer a Deus e a São Judas Tadeu, que me acompanharam e me mantiveram firme nos momentos mais difíceis e ao longo de toda a caminhada até o presente momento.

Aos meus pais, Ozonia Sangali Arantes e Reinaldo Lino Arantes, por serem a minha base, sempre me apoiando, incentivando e me ensinando a ser quem eu sou. Devo tudo a vocês.

A minha irmã, Bianca Sangali Arantes, por me ajudar, apoiar e aconselhar em tudo desde o dia em que nasci. Obrigado por estar ao meu lado e pela parceria de sempre.

A minha namorada, Thaís Gonçalves Tavares, por estar sempre ao meu lado, por desde o ensino médio acreditar no meu potencial, me incentivar e por ser meu porto seguro durante toda essa etapa da graduação, sem você os desafios teriam sido muito maiores.

A minha orientadora Prof^a. D.Sc. Rejane Costa Alves, por ter me fornecido as maiores oportunidades que tive na universidade, sempre com muita paciência e disponibilidade, além de todos os conselhos e ensinamentos.

Ao Prof. D.Sc. Djeison Cesar Batista por ter disponibilizado o material para a realização do presente trabalho, como também por toda calma e ensinamentos.

Por fim, agradecer a Universidade Federal do Espírito Santo, pela oportunidade de desenvolver a ciência, pelo local e equipamentos que foram fundamentais para a realização deste trabalho.

RESUMO

Em virtude do aumento do consumo de produtos florestais madeireiros surge-se a necessidade por buscar espécies plantadas de rápido crescimento e tecnologias que visem melhorar as propriedades das mesmas, além de métodos mais sustentáveis para estimar essas propriedades. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi comparar os valores dos módulos elásticos da madeira teca submetidas a diferentes tratamentos térmicos: escala laboratorial e industrial. As amostras de madeira passaram por três diferentes tipos de tratamentos térmicos: 160/CS, 185/OS e 210/OS. Apenas o tratamento 160/CS foi realizado por processo industrial, sendo o restante realizado no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da UFES, em Jerônimo Monteiro. Para a caracterização das constantes elásticas da madeira, as mesmas foram ensaiadas a densidade aparente, propagação de ondas de excitação e por último a flexão estática, utilizando 16 amostras por tratamento (controle, 160/CS, 185/OS e 210/OS), totalizando assim 64 corpos de prova. Os ensaios de propagação de onda ocorreram utilizando o equipamento Sonelastic e seguindo a norma ASTM E1876 (2006). Para isto ensaiou-se três modos de vibração da madeira (longitudinal, flexional e torcional). Os ensaios para a determinação das características físicas e mecânicas foram realizados seguindo a prescrição da NBR 7190 da ABNT (1997). Em relação às dimensões das amostras, os corpos de prova ensaiados pelo método de propagação de ondas foram os mesmos utilizados para densidade aparente e flexão estática (2x2x30 cm). De cada corpo de prova de flexão estática confeccionou-se dois CPs para serem colocados na estufa a fim de se estimar a umidade, com 2x2x3 cm (largura, espessura, comprimento). O valor de densidade aparente variou de 634,13 a 668,66 [Kg.m⁻³], enquanto os valores de umidade variaram de 7,57 a 13,26 [%]. Já as propriedades de módulo de elasticidade estático variaram de 9755 [MPa] a 160 °C a 11778 [MPa] a 185 °C. O método não destrutivo de propagação de ondas de excitação mostrou ser uma ferramenta eficiente para estimar o módulo de elasticidade, com R-Sq= 84,15 a 93,91 [%] para excitação de ondas flexionais e R-Sq = 76,38 a 95,43[%] para excitação de ondas longitudinais. Em contrapartida, o método de propagação de onda de excitação torcional mostrou baixa confiabilidade (R-Sq = 41,1%) para estimar o G din.

Palavras-chave: Madeiras comerciais. Métodos não destrutivos. Caracterização. Propagação de onda. Temperatura.

SUMÁRIO

RESUMO	v
SUMÁRIO	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 O problema e sua importância	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivo específico.....	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Densidade aparente	4
2.2 Módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR)	5
2.3 Termogravimetria	7
2.4 Propagação de ondas de excitação	9
3. METODOLOGIA	14
3.1 Tratamento térmico	15
3.1.1 Tratamentos	15
3.1.1.1 Processo industrial	16
3.1.1.2 Processo laboratorial	16
3.2 Propagação de onda de excitação	17
3.3 Ensaio destrutivo	20
3.4 Estatística	22
4. RESULTADOS DA PESQUISA	23
4.1 Propagação de ondas de excitação	23
4.2 Ensaio destrutivo	25
5. CONCLUSÃO	31
6. REFERÊNCIAS	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de corpos de prova a serem ensaiados	22
Tabela 2 – Resultados obtidos por meio de propagação de ondas	24
Tabela 3 – Resultados obtidos por meio dos ensaios destrutivos	27
Tabela 4 – Regressão dos ensaios dinâmicos para a obtenção do MOE.	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modo fundamental de vibração longitudinal	10
Figura 2 – Condição de contorno imposta ao corpo de prova para a excitação do modo de vibração fundamental longitudinal	11
Figura 3 – Modo fundamental de vibração flexional	11
Figura 4 – Condição de contorno imposta ao corpo de prova para a excitação do modo de vibração fundamental flexional	12
Figura 5 – Modo fundamental de vibração torcional.....	12
Figura 6 – Condição de contorno imposta ao corpo de prova para a excitação do modo de vibração fundamental torcional	13
Figura 7– Câmara climática QUIMIS Q315C21 com as amostras	14
Figura 8 - Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação	17
Figura 9 – Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação para a obtenção do modo de vibração longitudinal	18
Figura 10 – Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação para a obtenção do modo de vibração flexional	18
Figura 11 - Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação para a obtenção do modo de vibração torcional	19
Figura 12 – Ensaio de flexão estática	21
Figura 13 – Frequência dos quatro tratamentos para os três modos de vibração (flexional, longitudinal e torcional)	24
Figura 14 – Dispersão dos resultados de força máxima entre os corpos de prova de cada tratamento (A) e Força máxima (B)	27
Figura 15 - Módulos de elasticidade sob elevadas temperaturas/ Módulo de elasticidade do tratamento controle	28
Figura 16 – Análise de regressão entre MOE e E din	29
Figura 17 – Análise de regressão entre MOR e G din	30

1. INTRODUÇÃO

O crescimento constante do emprego da madeira nos mais diversos setores da economia brasileira, como exemplo indústrias de papel e celulose, moveleiras, energia e construção civil, transformou o setor florestal em um dos setores de importância no país, segundo o relatório anual do Indústria Brasileira de Árvores (2020), o setor florestal contribuiu com 1,2% da formação do PIB brasileiro de 2019, apresentando uma receita bruta de R\$ 97,4 bilhões no mesmo ano, além de um crescimento de 12,6% comparado com o ano anterior.

Em contrapartida, Marcovitch e Pinsky (2020) afirmam que entre 2019 e 2020, o desmatamento na Amazônia e as queimadas elevaram em níveis exponenciais. A taxa de desmatamento aumentou 34% durante o período entre 2018-2019 (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2020). Sabe-se que o desmatamento na Amazônia 90% da madeira retirada do bioma amazônico é de forma ilegal, sem a documentação exigidas para extração legal (Revista Dom Total, 2021). Havendo a necessidade de buscas de espécies alternativas para abastecimento madeireiro.

Uma espécie que vem ganhando espaço atualmente é a madeira de teca (*Tectona grandis*), uma espécie provinda de plantios florestais de reflorestamento. Que por sua vez, torna-se uma opção frente ao uso de madeiras oriundas de florestas nativas. Devido às suas características tecnológicas como a elevada estabilidade dimensional, densidade de média a alta, durabilidade natural, trabalhabilidade e coloração atrativa, a madeira de teca adquiriu reconhecimento mundial com empregos em produtos de finalidades decorativas, construções navais, construção civil de fins nobres, assoalhos e decks, setor mobiliário, indústria de laminados e adornos em geral (DIAS et al., 2018).

Contudo, novas tecnologias vêm sendo criadas com o intuito de melhorar a qualidade e o uso destas madeiras, com destaque para os tratamentos térmicos, que se consolidaram como uma alternativa para melhorar as características físicas e mecânicas, principalmente a umidade equilíbrio higroscópico e, conseqüentemente, a estabilidade dimensional (GUIRARDI, 2020). Em estudo realizado Batista, Tomaselli e Klitzke (2011), encontraram que a modificação térmica melhorou a estabilidade dimensional da madeira e proporcionou a mesma uma coloração mais escura, dessa forma assemelhando essas características as de madeiras tropicais normalmente comercializadas. Além disso, o tratamento térmico confere à madeira maior

resistência a microrganismos e a ações climáticas, quando comparada à mesma sem tratamento (MOURA et al., 2012).

Com a tomada de consciência ecológica, os métodos não destrutivos de avaliação de madeira têm sido amplamente utilizados no mundo. Trabalhos como de Segundinho (2018) e Candian e Sales (2009) são utilizados para estimar propriedades físico-mecânicas das madeiras. Gonçalves e Bartholomeu (2000), utilizaram o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) como resposta à relação entre a velocidade de propagação da onda e a densidade da madeira, fazendo uma aproximação da equação, sem levar em consideração as várias influências ocorridas em materiais anisotrópicos, como os Coeficientes de Poisson dos módulos de deformação transversais. Outros estudiosos, como Bucur (1983) e Gonçalves et al. (2019) chamam o produto da equação que utiliza a relação velocidade de propagação de onda e densidade da madeira de constante elástica. Eles afirmam que, para ser considerada como E_{din} , é necessário ser levada em consideração uma série de outros fatores, como por exemplo, os coeficientes de Poisson. Vale destacar que, nesta pesquisa, o autor utiliza as nomenclaturas “ Módulos elásticos (E) ” ou E_{din} como forma simplificação.

Diante da necessidade de buscar espécies alternativas para diminuir as pressões sob as florestais nativas brasileiras, têm-se a necessidade de estudar as propriedades físico-mecânicas de espécies florestais plantadas a fim de subsidiar o correto uso e finalidades para emprego comercial.

1.1 O problema e sua importância

O aumento do consumo de madeira, aliado a devastação das florestas fez surgir a preocupação com a utilização de madeiras corretamente caracterizadas, e por consequência, tem sido necessário desenvolver métodos e análises mais rápidas e que gerem menos perdas, nesse contexto, tem-se introduzidos os métodos não destrutivos para avaliação desse material (ALVES, 2017).

Atualmente no Brasil, poucas informações a respeito das constantes elásticas das madeiras são encontradas na literatura. Em contrapartida, Ballarin e Nogueira (2003) afirmam que o conhecimento dos principais parâmetros elásticos é de fundamental importância para que seja possível a modelagem matemática de seu comportamento estrutural.

Contudo, levando em consideração as problemáticas abordadas, têm-se a necessidade e importância de um estudo detalhado sobre o assunto. O presente trabalho se justifica por proporcionar sanar parte desses questionamentos, trazendo dados e análises a respeito dessas propriedades mecânicas de madeiras oriundas de florestas plantadas. Além de se propor a responder um questionamento a respeito de qual a influência do processo de modificação térmica nas propriedades mecânicas da madeira de teca (*Tectona grandis* L.f.).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Comparar os valores dos módulos elásticos da madeira de teca submetidas a diferentes tratamentos térmicos: escala laboratorial e industrial.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar a densidade aparente das madeiras para os quatro tratamentos (controle, 160 °C, 185 °C e 210 °C);
- Determinar o MOE e MOR a partir dos ensaios de flexão estática para os quatro tratamentos (controle, 160 °C, 185 °C e 210 °C);
- Determinar as correlações entre os resultados do ensaio não destrutivo de propagação de ondas de excitação com as propriedades estáticas de módulo de elasticidade e módulo de rigidez para os quatro tratamentos (controle, 160 °C, 185 °C e 210 °C).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Densidade aparente

A madeira é material originário de um sistema biológico complexo, o que o torna um material de extrema variabilidade. Sua ultra-estrutura e composição química, bem como suas propriedades físicas e mecânicas, variam significativamente entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e, mesmo, entre diferentes partes de uma mesma árvore. A variabilidade, geralmente encontrada dentro de uma árvore individual, deve-se, provavelmente, às mudanças sofridas pelo câmbio durante o envelhecimento e modificações impostas pelas condições ambientais (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

Foelkel et al. (1971) afirmam que a densidade da madeira é uma característica complexa resultante da combinação de diversos fatores, e existem inúmeros trabalhos mostrando sua relação com as dimensões das fibras, particularmente espessura da parede, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira primaveril e outonal, e arranjo dos elementos anatômicos. Dentre as inúmeras propriedades da madeira, a densidade é a mais utilizada, pelo motivo de que além de poder ser determinada mais facilmente que outras, a densidade se correlaciona diretamente com a massa, composição celular, e demais propriedades físicas, mecânicas, térmicas, acústicas e elétricas. Por conseguinte, uma propriedade que proporciona indicar a qualidade e aplicabilidade da madeira (BATISTA, 2012). Trautenmüller et al. (2014) citam que a densidade pode ser considerada um dos principais parâmetros tecnológicos por ser um excelente indicador das propriedades da madeira. De modo que tal afirmação pode ser justificada pela relação dessa propriedade física da madeira com inúmeras características intrínsecas que constituem a mesma, como a heterogeneidade, porosidade e higroscopicidade (SANGUMBE et al., 2019).

Dependendo da condição de umidade da amostra, a densidade da madeira pode ser descrita de várias formas, as duas mais usuais são a determinação densidade básica e densidade aparente (OLIVEIRA, 1997). A densidade aparente é definida pela norma da NBR7190/1997 da ABNT, como sendo uma massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume de corpos-de-prova com teor de umidade de 12%. Dias e Lahr (2000), afirmam que a densidade aparente, se refere à densidade medida à um certo teor de umidade, cujo a norma adotou 12% como valor de referência para a umidade de equilíbrio da madeira.

A densidade aparente, determinada por meio da umidade de equilíbrio estabelecida pela norma de 12%, é uma propriedade física que fornece várias informações sobre as propriedades mecânicas da madeira, justificando assim, os estudos da influência da densidade aparente e propriedades mecânicas da madeira, com o intuito de fornecer informações afim de uma utilização mais correta, coerente e com menos desperdício desse material (DIAS; LAHR, 2000). Hellmeister (1983), faz uma afirmação similar, segundo o autor a densidade aparente é a propriedade física mais significativa para a caracterização de madeiras destinadas à construção civil.

Observando literaturas existentes a respeito da densidade da madeira de teca, Lincoln (1986) apresentou para madeira adulta valor médio próximo de $0,650 \text{ g.cm}^{-3}$ para a espécie, o IPT apresenta valores de $0,660 \text{ g.cm}^{-3}$ para a densidade aparente a 15% de umidade, Pinto (2007) encontrou para a densidade aparente valores médios de $0,53 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,55 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,67 \text{ g.cm}^{-3}$ para a madeira de teca com 5,10 e 10 anos, respectivamente. Chagas et al. (2014), em estudo encontrou valores médios para a densidade básica iguais a $0,512 \text{ g.cm}^{-3}$ para a teca com 4 anos de idade, $0,506 \text{ g.cm}^{-3}$ para a idade de 6 anos e $0,518 \text{ g.cm}^{-3}$ para a idade de 12 anos, a autora encontrou ainda valores médios de densidade aparente de $0,527 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,514 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,522 \text{ g.cm}^{-3}$ para a madeira de teca com 4, 6 e 12 anos, respectivamente.

Lobão et al. (2004) citam que a densidade influencia intensamente a resistência mecânica da madeira, os autores encontraram em madeiras de menor densidade, menores valores para resistência mecânica, sendo o oposto verdadeiro. Em conjunto a essa afirmação, Andrade Junior (2016) relatou forte correlação entre a densidade aparente à 12% de umidade e as propriedades mecânicas, especificamente para o módulo de elasticidade (MOE), e a importância da verificação da densidade aparente da madeira para complementar a acurácia dos resultados dos ensaios dinâmicos.

2.2 Módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR)

O módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) são parâmetros de grande relevância na caracterização tecnológica da madeira, esses dois parâmetros fornecem uma boa aproximação da resistência do material, constituindo-se, na prática, parâmetros de vasta aplicação na classificação dos materiais (PINTO, 2007). Braz et al. (2013) afirma que o comportamento e esforços máximos e mínimos de peças de madeira são obtidos pelos valores de módulos de elasticidade e de ruptura, ressaltando que estes parâmetros também

variam de acordo com a espécie, umidade da madeira, massa específica e tempo de duração de carga durante os ensaios mecânicos, entre outros fatores.

Moreschi (2012) define que o módulo de elasticidade expressa a carga necessária para distender um corpo de prova de 1cm^2 de seção transversal, a uma distância igual ao seu próprio comprimento. Moreschi (2012) cita a impossibilidade de distender a madeira nestas proporções sem que antes ela chegue à ruptura, dessa forma o módulo de elasticidade é apenas um valor teórico, cujo é utilizado utilizado para obter facilidade em cálculos e como indicador de qualidade para a classificação de peças de madeira. Matos (1997) faz afirmações a respeito do módulo de elasticidade ou módulo de Young que vão em encontro com esta definição.

Embora o módulo de elasticidade (MOE) não ofereça informações reais e definitivas a respeito da madeira, Moreschi (2012) afirma que quanto mais altos os valores do MOE, mais alta será a resistência da madeira e mais baixa será a deformabilidade da mesma e quanto mais baixo forem os valores do MOE da peça de madeira, menor será a qualidade da madeira para fins de construção civil.

O módulo de ruptura à flexão estática é definido por Moraes Neto et al. (2009), como a razão entre o máximo momento, que pode atuar em um corpo-de-prova, ao teor de umidade de 12%, e o módulo de resistência elástica da seção transversal do corpo de prova. Oliveira (1997), define o módulo de ruptura (MOR), como sendo expresso em termos de esforços por unidade de área, de modo que o mesmo representa o máximo de esforços que é aplicado sobre as fibras no extremo superior e inferior da seção transversal da peça.

Cossolino e Pereira (2010), afirmam que o conhecimento dos módulos elásticos é alvo da atenção de diversos profissionais, com inúmeras necessidades e aplicações. Cossolino e Pereira (2010) citam que o comportamento mecânico de um material possui uma relação direta com sua resposta, ou deformação, à carga ou força à que está sendo submetido, de forma que o módulo de elasticidade é a propriedade que relaciona a deformação elástica de um material com a tensão, podendo então o módulo de elasticidade ter diferentes definições, variando de acordo com o tipo de esforço aplicado. A caracterização das propriedades elásticas se faz importante para materiais como a madeira, pois os resultados são utilizados na seleção de materiais, em simulações numéricas, em cálculos estruturais e na estimativa de propriedades mensuráveis apenas por ensaios destrutivos, dada essa importância, os módulos elásticos também são largamente utilizados na classificação e no controle de qualidade de madeiras (OTANI et al., 2017). O módulo de elasticidade fornece uma ideia da rigidez da

madeira ou a sua maior ou menor capacidade de deformar-se em função da carga aplicada no esforço de flexão (ARAÚJO, 2010).

Pinto (2007) ao analisar o MOE e MOR da madeira de teca em função de diferentes idades, encontrou valores médios para o módulo de elasticidade de 8591 MPa, 10999 MPa e 16433 MPa, para as idades de 5, 10 e 30 anos, respectivamente, e, encontrou valores médios para módulo de ruptura de 31,27 MPa, 74,24 MPa e 125,85 MPa para as idades de 5, 10 e 30 anos, respectivamente. Motta et al. (2013) ao estudar o efeito do tratamento térmico na resistência à flexão estática da madeira de *Tectona grandis* L.f. encontrou para a madeira sem tratamento valores de 9764,97 MPa e 96,8407 MPa para MOE e MOR, respectivamente, para a mesma madeira submetida a uma temperatura de 140°C, os autores encontraram valores de 10095,06 MPa para o MOE e 105,05 MPa para o MOR.

2.3 Termogravimetria

A madeira possui diversas propriedades que a torna uma matéria-prima ideal para as mais diversas finalidades e aplicações, mas, em contrapartida, possui também características muitas vezes indesejadas, como por exemplo sua alta higroscopicidade, heterogeneidade e anisotropia, essas características indesejadas geram grande parte dos problemas apresentados em seu uso. Estas propriedades, próprias da madeira, acarretam na necessidade da aplicação de tratamentos que permitam minimizá-las, com o intuito de melhorar seu comportamento em uso (MODES et al., 2017).

Dessa forma, segundo Silva (2012), o tratamento térmico tem como objetivo melhorar propriedades da madeira com o auxílio do calor. As extensões das alterações térmicas dependem de alguns fatores, como espécie da madeira, temperatura final do tratamento, atmosfera predominante e duração do tratamento. A modificação térmica da madeira é um processo ativo e definido como a aplicação de calor à madeira com o objetivo de causar melhorias no desempenho do material. O processo pode ser classificado como ativo, pois o calor possui a capacidade de acarretar modificações nas propriedades químicas da madeira, resultando assim, em mudanças em outras propriedades, como a físico-mecânicas (HILL, 2006).

Esteves e Pereira (2009) afirmam que as propriedades de densidade, higroscopicidade, resistência mecânica e durabilidade natural das madeiras termicamente tratadas são fortemente afetadas pela perda de massa do material

no processo. Correlacionando a influência do tratamento térmico da madeira a densidade da mesma. Silva (2012) em estudo realizado em peças estruturais das espécies *Eucalypto citriodora* (*Corymbia citriodora*) e *Pinus taeda*, tratadas termicamente nas temperaturas de 160, 180, 200, 220 e 240 °C e, para o pinus até 260°C, encontrou redução da densidade aparente das peças com o aumento da temperatura, justificando tal fato devido à perda de massa ocorrida.

Guirardi (2020) afirma que comumente ocorre a perda de massa da madeira durante o processo de modificação térmica, essa perda de massa, por sua vez, pode acarretar em uma diminuição nas propriedades mecânicas do material. Define-se a madeira quimicamente como um biopolímero tridimensional composto por uma rede interligada de celulose, hemicelulose, lignina e pequenas quantidades de compostos extraíveis e inorgânicos, dessa forma, elevadas temperaturas acarretam na degradação térmica dos componentes químicos presentes na estrutura molecular do material (CARRASCO et al., 2016). Pinheiro e Sèye (1998), citam que a perda de massa na madeira, ocorre justamente devido a degradação da hemicelulose e da celulose à altas temperaturas.

Relacionando a termogravimetria, com as propriedades físicas da madeira, Batista (2012) afirma que existe unanimidade no fato de que a madeira tratada termicamente apresenta menor higroscopicidade, o que acarreta em maior estabilidade dimensional da mesma e, redução na densidade da madeira, gerando assim, redução na resistência mecânica desses materiais.

Segundo Batista (2012) o tratamento térmico acarreta na diminuição da resistência mecânica da madeira. Estudos realizados apresentaram um efeito significativo da temperatura sobre o módulo de ruptura das madeiras tratadas termicamente, comparado a uma menor influência da temperatura sobre o módulo de elasticidade (MOURA et al., 2011).

Manríquez e Moraes (2009), ao estudarem literaturas existentes sobre o efeito da variação da temperatura na resistência à compressão paralela as fibras em diferentes madeiras, concluíram que sob o efeito da variação de temperatura de 20 °C até 210 °C, o módulo de elasticidade diminuiu cerca de 40%, e chegando a uma diminuição de até 90% quando alcançado uma temperatura de 250 °C. Carrasco et al. (2016) em estudos realizados com híbridos de eucaliptos, corroboram essa conclusão, em suas pesquisas os autores observaram que o módulo de elasticidade diminuiu apenas pelo fato de se aumentar a temperatura, onde, até 120 °C existe uma diminuição linear não muito acentuada, em torno de 8%, e de 120 °C até 200 °C, a diminuição também é linear, porém, bastante acentuada chegando a 38%, os autores observaram também que acima de 100 °C

a correlação entre a resistência, módulo de elasticidade relativo e massa específica relativa é altíssima.

Motta et al. (2013) ao realizar tratamento térmico na madeira de teca até a temperatura de 140 °C, não observou diferença estatisticamente significativa do aumento da temperatura em relação à força máxima de flexão estática e o módulo de elasticidade, porém os autores relatam que maiores valores foram encontrados para esse tratamento, mostrando que a resistência da madeira foi elevada.

2.4 Propagação de ondas de excitação

A madeira apresenta propriedades físicas distintas de acordo com a sua orientação, fenômeno esse chamado de anisotropia. Entretanto, podem ser consideradas três direções principais (longitudinal, radial e tangencial), e assim, a madeira pode ser considerada como um material ortotrópico, sendo um material de característica ortotrópica, considera-se que a madeira apresenta planos ortogonais de simetria que fazem com que suas propriedades sejam constantes de acordo com estes planos. Considerando assim, uma simplificação, pois dependendo da propriedade em que se está avaliando, é possível notar uma variação de valores ao longo das direções (BODIG; JAYNE, 1993).

As propriedades da madeira variam de acordo com a orientação das fibras e dos anéis de crescimento, e um corpo-de-prova pode vibrar em diferentes modos, para cada um destes modos haverá uma frequência fundamental característica (OTANI et al., 2017). Por esse motivo é importante quando se for caracterizar essas peças por meio da técnica de excitação por impulso, estar ciente da condição de contorno ideal.

Segundo a norma da ASTM E1879 (2006) o método de propagação de onda de excitação por impulso, baseia-se essencialmente na determinação dos módulos elásticos de um material a partir das frequências naturais de vibração de um corpo de prova de geometria regular. Estas frequências são excitadas por meio de um impacto mecânico de curta duração, posteriormente seguido da captação da resposta acústica por meio de um sensor. No final, um tratamento matemático é feito no sinal para a obtenção do espectro de frequências (transformada de Fourier). A norma afirma ainda que, em seguida serão calculados os módulos elásticos dinâmicos através de equações previstas em norma, considerando nestas equações a massa, geometria, dimensões do corpo-de-prova e a frequência obtida pelo equipamento.

A vibração do corpo de prova pode variar em diferentes modos, e para cada um desses destes modos existirá uma frequência fundamental característica (HEYLIGER et al., 2001). O fator que determinará qual modo de vibração será excitado são as condições de contorno impostas na caracterização, de modo que a frequência fundamental destes modos é determinada em função da geometria, da massa, das dimensões e dos módulos elásticos (OTANI et al., 2017).

Em resumo, são três os modos de vibração empregados, por exemplo, em corpos prismáticos, longitudinal, flexional ou transversal e torcional. Os modos de vibração longitudinal e flexional permitem o cálculo do módulo de elasticidade, já o torcional permite determinar o módulo de deformação transversal e o coeficiente de Poisson. Analisando experimentalmente, separa-se a metodologia em duas partes, a primeira irá se basear na excitação, detecção e obtenção das frequências de ressonância, e em seguida, a segunda consistirá em adotar relações matemáticas e de procedimentos computacionais, para a obtenção dos módulos elásticos a partir das frequências de ressonância (ATCP, 2021).

O modo de vibração longitudinal, será quando o corpo de prova for solicitado na direção longitudinal, o módulo elástico que será medido corresponde ao Módulo de Elasticidade na direção do comprimento do corpo de prova (OTANI et al., 2017). Na Figura 1, observa-se o modo de vibração longitudinal fundamental, onde as regiões azuis apresentam os pontos em que a vibração é mínima e nas regiões vermelhas os pontos onde a vibração é máxima (OTANI et al., 2017). Na Figura 2, apresenta-se a condição de contorno ideal para o modo de vibração longitudinal.

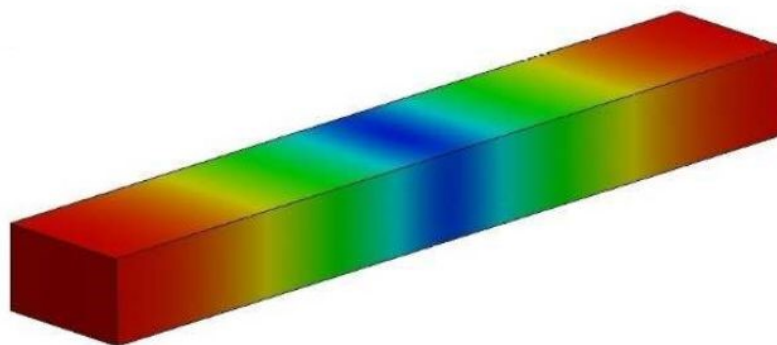


Figura 1 – Modo fundamental de vibração longitudinal.

Fonte: Otani et al. (2017).

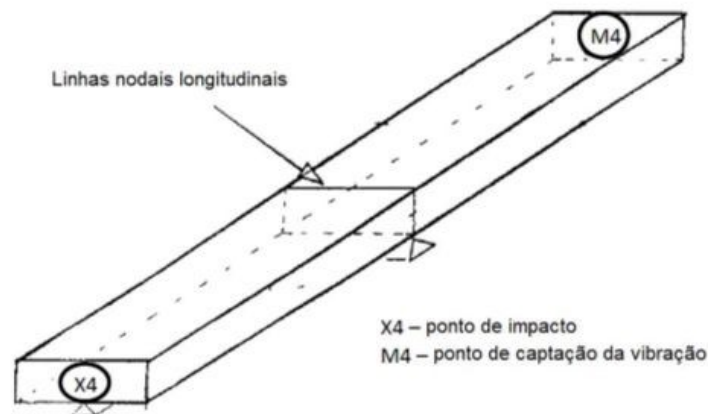


Figura 2 – Condição de contorno imposta ao corpo de prova para a excitação do modo de vibração fundamental longitudinal.

Fonte: Otani et al. (2017).

O modo de vibração flexional, ocorrem solicitações simultâneas de tração e compressão. Para materiais homogêneos e isotrópicos, o módulo elástico obtido em um ensaio de flexão coincide com o módulo elástico medido na direção longitudinal. Porém, se a rigidez do corpo de prova for diferente na superfície quando comparado com o centro, ou se o corpo de prova apresentar pequenos defeitos em sua superfície, resultará em uma discrepância nos valores obtidos pelos modos de vibração flexional e longitudinal (KAW, 2006). Na Figura 3, é possível observar o modo de vibração flexional fundamental, de modo que as regiões azuis apresentam os pontos em que a vibração é mínima e nas regiões vermelhas os pontos onde a vibração é máxima (OTANI et al., 2017). Na Figura 4, visualiza-se a condição de contorno ideal para o modo de vibração flexional.

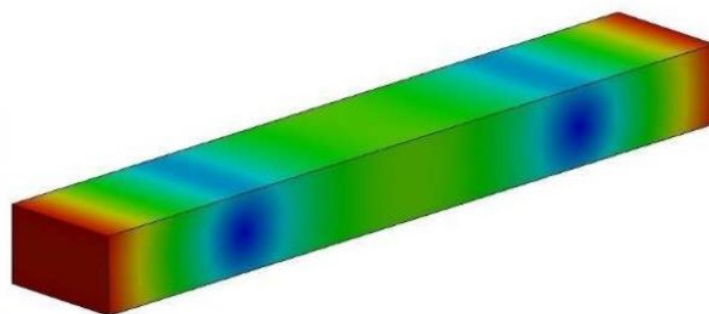


Figura 3 – Modo fundamental de vibração flexional.

Fonte: Otani et al. (2017).

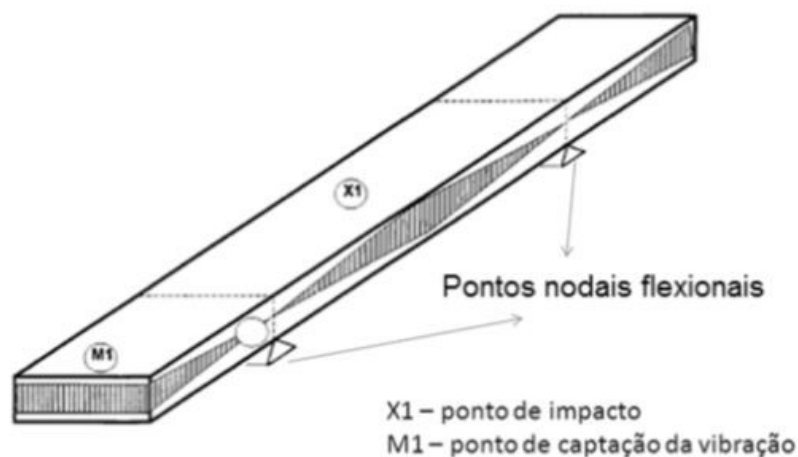


Figura 4 – Condição de contorno imposta ao corpo de prova para a excitação do modo de vibração fundamental flexional.

Fonte: Otani et al. (2017).

Tratando-se do modo de vibração torcional, Bodig e Jayne (1993), descrevem que quando um corpo de prova for solicitado por torção, dois modos de cisalhamento agirão sobre esse corpo simultaneamente. Dessa forma, o aparelho de medição, no caso do presente trabalho o Sonelastic, irá apresentar o resultado obtido através de uma combinação dos módulos de cisalhamento atuantes. Na Figura 5, é apresentado o modo de vibração torcional fundamental, sabendo-se que as regiões azuis apresentam os pontos em que a vibração é mínima e nas regiões vermelhas os pontos onde a vibração é máxima (OTANI et al., 2017). Na Figura 6, observa-se a condição de contorno ideal para o modo de vibração torcional.

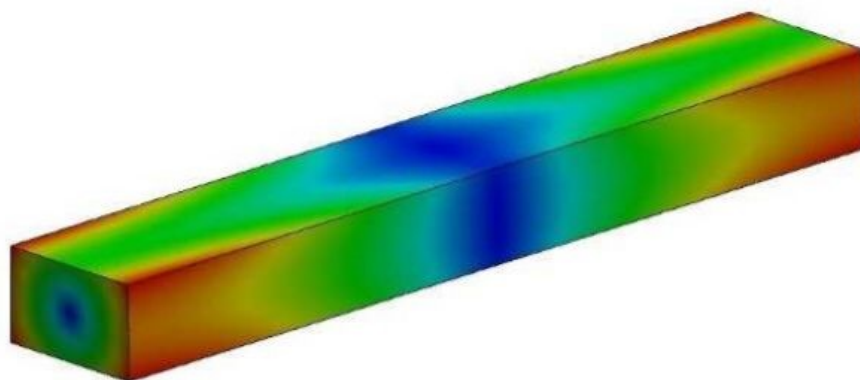


Figura 5 – Modo fundamental de vibração torcional.

Fonte: Otani et al. (2017).

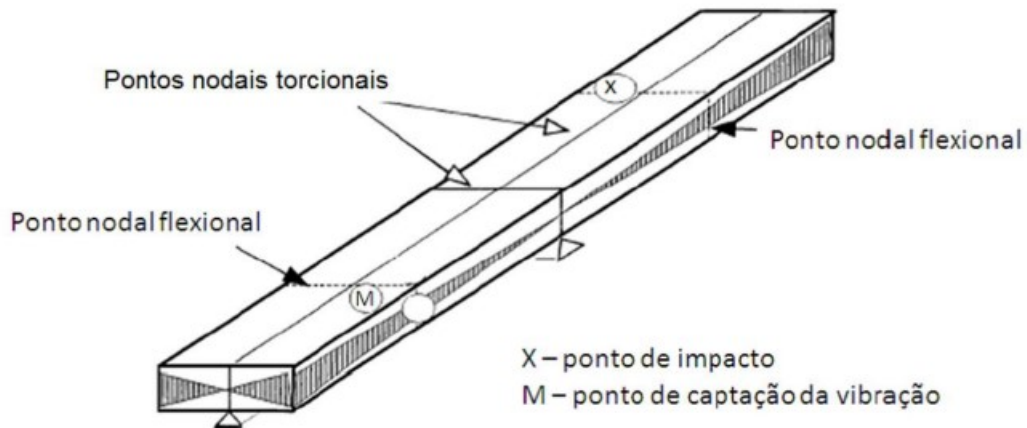


Figura 6 – Condição de contorno imposta ao corpo de prova para a excitação do modo de vibração fundamental torcional.

Fonte: Otani et al. (2017).

A velocidade da onda está altamente relacionada com a densidade da área transversal da árvore (RINNTECH, 2005). Sandoz (1996), afirma que a velocidade de propagação de ondas é baseada na vibração da microestrutura da madeira e fundamentalmente sobre as propriedades elásticas do eixo de propagação. Segundo Oliveira (2001) a velocidade de propagação de onda é maior na direção longitudinal devida à orientação das células nesse eixo, propiciando um caminho contínuo para ondas e na direção tangencial as velocidades são menores. Wang et al. (2007), diz que a velocidade de propagação é controlada pela umidade, orientação dos elementos constituintes e microestrutura de fibra, além da geometria do material avaliado.

3. METODOLOGIA

Estudou-se no presente trabalho a madeira juvenil de teca (*Tectona grandis* L.f.), comercializada pela empresa TWBrazil, localizada em Ponta Grossa, Paraná. As análises foram realizadas no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Os corpos de prova para os ensaios de propagação de onda de excitação, flexão estática, umidade e densidade aparente foram confeccionados na marcenaria do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Em seguida a confecção dos corpos de prova, o material foi posto em uma câmara climática (QUIMIS Q315C21) com umidade e temperatura controladas, conforme o apresentado na Figura 7, com intuito de que as amostras atingissem conformidade a 20 °C de temperatura e 60% de umidade, condição ideal para a realização dos ensaios mecânicos.



Figura 7 – Câmara climática QUIMIS Q315C21 com as amostras.

Fonte: Arquivo pessoal.

Após a colocação do material na câmara climática foram pesados diariamente corpos de prova selecionados como controle e assim determinando sua umidade, de modo que tal etapa foi encerrada após a verificação de que o material se encontrava climatizado.

3.1 Tratamento térmico

3.1.1 Tratamentos

As madeiras utilizadas no presente projeto foram submetidas a três tratamentos térmicos, conforme será apresentado abaixo:

- 160/CS: madeira modificada termicamente em processo industrial higrotérmico, a 160 °C, em sistema fechado (pressurizado). Este tratamento foi escolhido com base em Wentzel et al. (2018), em que a perda de massa corrigida foi similar a 210 °C em sistema aberto;
- 185/OS: madeira modificada termicamente em escala laboratorial a 185 °C em sistema aberto. Esta é a mesma temperatura final do padrão Thermo-S, (inchamento/contração tangencial entre 6 % e 8 %, classe de durabilidade 3) do processo ThermoWood® para madeira de folhosas (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003);
- 210/OS: madeira modificada termicamente em escala laboratorial a 210 °C em sistema aberto. A escolha dessa temperatura está relacionada ao mencionado no tratamento 160/CS. Ainda, é similar a temperatura final indicada para folhosas do padrão Thermo-D (inchamento/contração tangencial entre 5 % e 6 %, classe de durabilidade 2) do processo ThermoWood® (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

Como forma de esclarecimento a respeito da metodologia utilizada nos processos térmicos, tem-se o seguinte:

3.1.1.1 Processo industrial

O processo industrial de modificação térmica (160/CS) foi realizado na empresa TWBrazil, Ponta Grossa, Paraná. É um processo higrotérmico e pressurizado – sistema fechado (HILL, 2006), realizado em sete fases: i) aquecimento inicial de 20 °C (temperatura ambiente) a 110 °C, a uma taxa de aquecimento nominal de 1,30 °C/min; ii) temperatura constante por 30 minutos; iii) aquecimento até 140 °C, a uma taxa de aquecimento nominal de 0,50 °C/min; iv) temperatura constante por 30 minutos; v) aquecimento até 160 °C, a uma taxa de aquecimento nominal de 0,60 °C/min; vi) temperatura constante por 90 minutos; vii) resfriamento até 60 °C, a uma taxa nominal de resfriamento de 0,25 °C/min. O processo completo leva cerca de 12 horas.

As peças amostradas para o tratamento 160/CS foram dispostas em autoclave juntamente com a madeira de processo da empresa.

3.1.1.2 Processo laboratorial

Os processos de modificação térmica dos tratamentos 185/OS e 210/OS foram realizados no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo (DCF/UFES), localizado em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo. Foi utilizado um forno elétrico (Linn Elektro Therm, Alemanha), com dimensões internas de 600 x 600 x 700 mm, equipado com controlador programável de tempo e temperatura.

O programa utilizado assemelhou-se ao de Lopes (2012), que utilizou a mesma espécie e um equipamento do mesmo modelo. O programa é dividido em três fases: i) aquecimento inicial de 20 °C (temperatura ambiente) até 100 °C, com uma taxa de aquecimento nominal de 0,50 °C/min.; ii) aquecimento de 100 °C até a temperatura de modificação térmica (185 °C ou 210 °C) com uma taxa de aquecimento nominal de 2,60 °C/min.; iii) manutenção da temperatura de modificação térmica por 3 horas. Encerrada a fase 3, desligou-se imediatamente o equipamento e retirou-se as peças do mesmo.

3.2 Propagação de ondas de excitação

As amostras foram caracterizadas com relação aos modos de vibração longitudinal, flexional e torcional. Para isso, utilizou-se um suporte ajustável para barras, um pulsador, um captador direcional e um software específico. A Figura 8 apresenta esta versão do equipamento.



Figura 8 - Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação.

Fonte: Arquivo pessoal.

Conforme a norma ASTM E1876 (2006) realizou-se a técnica de excitação por impulso. As frequências são excitadas por meio do pulsador, seguido da captação da resposta acústica por um sensor. Aplica-se um tratamento matemático ao sinal (transformado de Fourier), para a obtenção do espectro de frequências correspondentes (OTANI; PEREIRA, 2013). Em consequente, são calculados os módulos elásticos dinâmicos.

As amostras possuíam dimensões de 20 mm x 20 mm x 300 mm, para largura, espessura e comprimento, respectivamente. Ao todo foram confeccionados e ensaiados 64 corpos de prova, igualmente distribuídos por tratamentos (controle, modificado termicamente a 160 °C, 185 °C e 210 °C).

Nas Figuras 2, 4 e 6, apresentadas anteriormente, é possível observar os posicionamentos adequados dos corpos de prova para a obtenção dos modos

longitudinal, flexional e torcional respectivamente. Observa-se nas Figuras 9, 10 e 11 a realização dos ensaios, objetivando obter tais modos.



Figura 9 - Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação para a obtenção do modo de vibração longitudinal.

Fonte: Arquivo Pessoal.



Figura 10 - Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação para a obtenção do modo de vibração flexional.

Fonte: Arquivo pessoal.



Figura 11 - Ensaio utilizando o método de propagação de ondas de excitação para a obtenção do modo de vibração torcional.

Fonte: Arquivo pessoal.

Para a determinação dos módulos de elasticidade foi utilizada a estimativa apresentada na ASTM E,1876 (2006).

$$R = \left[\frac{1 + \left(\frac{b}{t}\right)^2}{4 - 2,521 \frac{t}{b} \left(1 - \frac{1,991}{e^{\frac{b}{\pi t} + 1}}\right)} \right] \left[1 + \frac{0,00851 n^2 b^2}{L^2} \right] - 0,060 \left(\frac{nb}{L}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{b}{t} - 1\right)^2 \quad (1)$$

$$T1 = 1 + 6,585 (1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2) - \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0,868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[\frac{8,34 (1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4}{1 + 6,338 (1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (2)$$

$$E = 0,9465 \left(\frac{mf_f^2}{w}\right) \left(\frac{l^3}{t^3}\right) T1 \quad (3)$$

$$G = \left(\frac{4lmf_t^2}{wt} \right) \cdot (R) (4)$$

$$v = \frac{E}{2G} - 1 (5)$$

Em que:

- E é o módulo de elasticidade dinâmico, em Pa;
- G é o módulo de elasticidade transversal dinâmico, em Pa;
- m é a massa do CP, em grama;
- b é a largura do CP, em milímetro;
- R é a constante, adimensional;
- L é o comprimento do CP, em milímetro;
- T: espessura do CP, em milímetro;
- f_f é a frequência de ressonância fundamental do CP em flexão, em Hertz;
- f_t : frequência de ressonância fundamental da barra de torção, em Hertz;
- T1: fator de correção para o modo de flexão fundamental para espessura finita.

3.3 Ensaio destrutivos

Os corpos de prova utilizados para o ensaio não destrutivo, após ensaiados, foram utilizados para determinar o teor de umidade, densidade aparente e ensaios de flexão estática. Os procedimentos de ensaio para determinação de características físicas e mecânicas foram realizados seguindo as prescrições da NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997).

Na Figura 12 é possível observar o ensaio de flexão estática realizado no Laboratório de Anatomia da Madeira do DCFM/UFES. Tal ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios com capacidade de 10 toneladas e sistema automático de aquisição de dados.



Figura 12 – Ensaio de flexão estática.

Fonte: Arquivo pessoal.

As determinações da densidade aparente e umidade foram realizadas no Laboratório de Anatomia da Madeira do DCFM/UFES. Desse modo, todos os aparelhos usados, dentre eles paquímetros, balanças e estufa foram calibrados por órgão competente, segundo as recomendações do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Os cálculos da densidade aparente foram determinados de acordo com a NBR 7190 da ABNT (1997), e suas correções serão realizadas utilizando a ASTM D 2395 (1998) e a ISSO 3130 (1975).

Realizou-se os ensaios de densidade aparente em todos os corpos de prova de flexão estática, antes do ensaio mecânico. Por sua vez, a determinação da umidade foi realizada após os ensaios de flexão estática. Retirou-se de cada corpo de prova de flexão estática duas amostras de 2x2x3 cm (largura, espessura, altura) para serem colocadas na estufa, e em seguida determinou-se o teor de umidade dos corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Número de corpos de prova ensaiados.

Tratamentos	D.ap	Flexão	Umidade
Controle	16	16	32
160° (industrial)	16	16	32
185° (laboratorial)	16	16	32
210° (laboratorial)	16	16	32

Fonte: Arquivo pessoal.

3.4 Estatística

Após as determinações das propriedades estudadas (frequência natural, módulos de elasticidade dinâmicos, módulos de deformação transversal dinâmicos, densidade aparente, umidade, força máxima, MOE e MOR) para as amostras submetidas a diferentes tratamentos térmicos, as mesmas foram comparadas entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância, utilizando o Software estatístico Minitab 16. Ainda com a utilização do mesmo Software estatístico foram realizadas correlações entre as variáveis E_d (módulo de elasticidade dinâmico) e MOE, assim como G_d (módulo de deformação transversal dinâmico) e MOR.

4. RESULTADOS DA PESQUISA

4.1 Propagação de ondas de excitação

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos a partir do ensaio mecânico dinâmico de propagação de ondas de excitação nos três modos de vibração (longitudinal, flexional e torcional), onde para os modos de vibração longitudinal e flexional notou-se através do teste Tukey, a um nível de 5% de significância, que os valores de frequência e módulo de elasticidade dinâmico (E) apresentaram valores estatisticamente semelhantes para os quatro tratamentos, demonstrando que os tratamentos térmicos em questão não alteraram de forma significativa tais propriedades da madeira de teca estudada. Já no modo de vibração torcional, observou-se que os valores de frequência apresentaram resultados estatisticamente semelhantes para os quatro tratamentos, porém os valores encontrados para o módulo de deformação transversal dinâmico (G), apresentaram diferença estatística, sendo que o tratamento controle se mostrou estatisticamente semelhante ao tratamento à 185 °C, que por sua vez, se mostrou estatisticamente semelhante aos tratamentos à 160 °C e 210 °C. Tais observações demonstram que ao contrário do módulo de elasticidade dinâmico (E), o módulo de deformação transversal dinâmico (G) sofreu influência do tratamento térmico, ocasionando na diminuição dos valores desta propriedade.

Carrasco *et al.* (2017) avaliaram em seu estudo as características mecânicas de 29 espécies de madeiras por meio de excitação por impulso, ao estudarem a madeira de teca encontraram para o módulo de elasticidade dinâmico e módulo de deformação transversal dinâmico, valores de 10930 MPa e 1920 MPa, respectivamente. No presente trabalho a média dos valores referentes ao E foi de 19396, tal diferença, segundo Carrasco *et al.* (2017), pode ser justificada devido ao fato de os poros, a superfície e a presença de trincas ou micro trincas nos corpos de prova poder modificar o percurso das ondas mecânicas. Em contrapartida, a média dos resultados referentes ao G do presente trabalho foi de 1935 MPa, estando próximo ao encontrado na literatura.

Outro fator observado em relação as frequências obtidas a partir do ensaio de propagação de ondas de excitação, foram que as frequências do modo de vibração longitudinal dos quatro tratamentos foram maiores que as frequências do modo de vibração torcional, que por sua vez, foram maiores que as frequências obtidas para o modo de vibração flexional, a Figura 13 demonstra tal afirmação.

Tabela 2– Resultados obtidos por meio do ensaio de propagação de ondas.

Tratamento	Longitudinal		Flexional		Torcional	
	Frequência [Hz]	E [MPa]	Frequência [Hz]	E [MPa]	Frequência [Hz]	G [MPa]
Controle	7703a*	18466a	1008a	22459a	2500a	2099a
160°C	7529a	16369a	999a	20938a	2551a	1830b
185°C	8021a	17294a	1055a	21702a	2682a	1922ab
210°C	7726a	16873a	1010a	21067a	2597a	1889b

E: módulo de elasticidade dinâmico;

G: módulo de deformação transversal dinâmico;

*: dentro da mesma coluna as médias que possuírem as mesmas letras não diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% pelo teste Tukey.

Fonte: Arquivo pessoal.

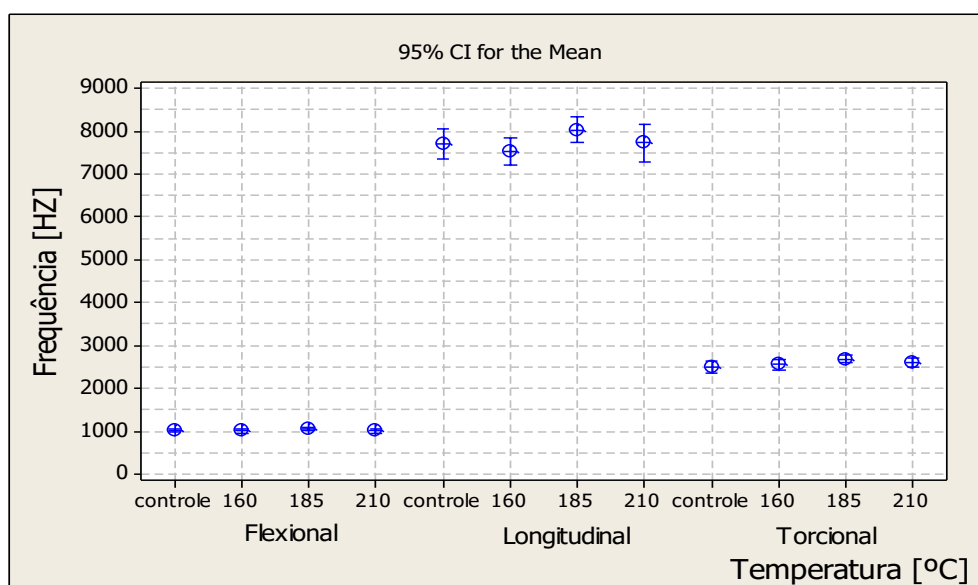


Figura 13 – Frequências dos quatro tratamentos para os três modos de vibração (flexional, longitudinal e torcional).

Fonte: Arquivo pessoal.

4.2 Ensaios Destrutivos

Na Tabela 3, é possível observar a média dos valores obtidos por meio dos ensaios destrutivos (densidade aparente, umidade e flexão estática). Encontrou-se no estudo as maiores médias de densidade aparente para o tratamento controle, com valor de $672,06 \text{ kg.m}^{-3}$, e $634,13 \text{ kg.m}^{-3}$ para o tratamento a 185°C , a menor densidade aparente encontrada. Destaca-se também que os tratamentos controle, a 160°C e a 210°C deram-se como estatisticamente semelhantes, o mesmo ocorreu para os tratamentos a 160°C e a 185°C . Os valores encontrados para a densidade aparente da madeira de teca no presente trabalho se aproximaram dos valores encontrados na literatura, onde Lopes (1986) e Rech (2009) apresentam valores médios de 650 kg.m^{-3} para a densidade da madeira de teca.

A médias das umidades das madeiras por tratamento, apresentados na tabela 3, apresentaram semelhança estatística entre os tratamentos a 185°C e a 210°C , ambos os tratamentos se diferenciaram estatisticamente do tratamento a 160°C , que por sua vez se diferenciou do tratamento controle. Ressalta-se que o tratamento controle obteve os maiores valores para a umidade, assim como se esperava, Esteves e Pereira (2009) citam que a umidade de equilíbrio higroscópico diminui com a termorreificação.

Analisando os resultados obtidos a partir do ensaio de flexão estática para a força máxima (F_m), apresentado na Tabela 3, analisou-se que não ocorreu diferença estatística significativa entre os tratamentos controle, à 185°C e à 210°C , de modo que o único tratamento que diferiu estatisticamente foi o tratamento à 160°C . Ao analisar individualmente os valores da força máxima, conforme apresentado na Figura 14, é possível observar que o tratamento à 185°C obteve os maiores valores, seguido pelos tratamentos controle e à 210°C , o tratamento a 160°C apresentou o menor valor para F_m .

Tratando-se do módulo de ruptura, o tratamento a 185°C apresentou o maior valor, antagonizando tal afirmação, o tratamento a 160°C apresentou o menor valor. O único tratamento que diferiu estatisticamente dos demais, foi o tratamento a 160°C . Se tratando do módulo de elasticidade, os tratamentos seguiram padrão similar ao MOR, tendo a mesma relação de maior para o menor valor. Porém, as médias de MOE apresentaram semelhança estatística à 5% de significância, pelo teste Tukey, entre os tratamentos controle, a 180°C e a 210°C , sendo que os tratamentos controle, a 160°C e 210°C também apresentaram semelhança estatística. Tais valores estudados, aproximaram com a literatura, Motta *et al.* (2013) encontrou para a madeira de teca valores de MOR entre 91,91 MPa e 107,12 MPa, para os diferentes tratamentos térmicos, e de MOE entre

9409,1 MPa e 10294,1 MPa. Já Benedetti (2018) ao estudar madeira de teca de diferentes regiões e idades, encontrou valores médios de 9321,9 MPa de MOR e 10722,24 MPa de MOE.

O tratamento que sofreu maior interferência em termos de propriedades mecânicas, foi o tratamento a 160 °C. Tal afirmação pode ser explicada a partir da observação de perda de massa, segundo Guirardi (2020), a perda de massa é um efeito comum da modificação térmica e pode acarretar na diminuição das propriedades mecânicas da madeira.

Em resumo, na Figura 15, tem-se os valores médios dos módulos de elasticidade encontrados, divididos pela média do módulo de elasticidade obtido para o tratamento controle. A partir dos resultados obtidos dessa relação e das médias descritas na Tabela 3, observou-se que para o tratamento realizado a temperatura de 160 °C ocorreram as perdas mais significativas de MOE, Thomson e Steven (1976) afirma que os principais fatores que afetam a degradação térmica da madeira, são tempo de exposição ao calor e o nível de temperatura, esses dois fatores acarretam na transição vítrea e na degradação dos polímeros da madeira. Tal afirmação corrobora com o encontrado no presente trabalho, visto que o tratamento a 160 °C, realizado em escala industrial, foi o que expos a madeira por mais tempo ao calor.

Observou-se no presente trabalho que a transição vítrea da madeira estudada ocorreu a partir da obtenção da temperatura de 160 °C, visto que a partir das temperaturas de 185 °C e 210 °C os módulos de elasticidade do material tenderam a aumentar. Tal afirmação contrapõe estudos encontrados na literatura, onde se encontram valores referentes a transição vítrea da lignina entre 180 °C e 200 °C (IRVINE, 1984; FIGUEROA, 2012). Sendo que tal mudança da transição vítrea do material pode ser justificada pela maior umidade da madeira sob o tratamento a 160 °C, Irvine (1984) e Figueroa (2012) afirmam também que o teor de umidade influencia a temperatura de transição vítrea, de modo que quanto maior o teor de umidade, menor será a temperatura de transição vítrea da lignina.

Tabela 3 – Resultados obtidos por meio dos ensaios destrutivos.

Tratamento	Dens. Ap. [kg.m ⁻³]	Umidade [%]	Fm [kg.f]	MOR [MPa]	MOE [MPa]
Controle	672,06a*	13,26a	243a	104,14a	10673ab
160°C	650,93ab	10,51b	180,33b	78,53b	9755b
185°C	634,13b	7,85c	253,16a	110,74a	11778a
210°C	668,66a	7,57c	239,17a	104,91a	10791ab

Dens. Ap.: densidade aparente;

Fm: força máxima;

MOE: módulo de elasticidade;

MOR: módulo de ruptura.

*: dentro da mesma coluna as médias que possuírem as mesmas letras não diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% pelo teste Tukey.

Fonte: Arquivo pessoal.

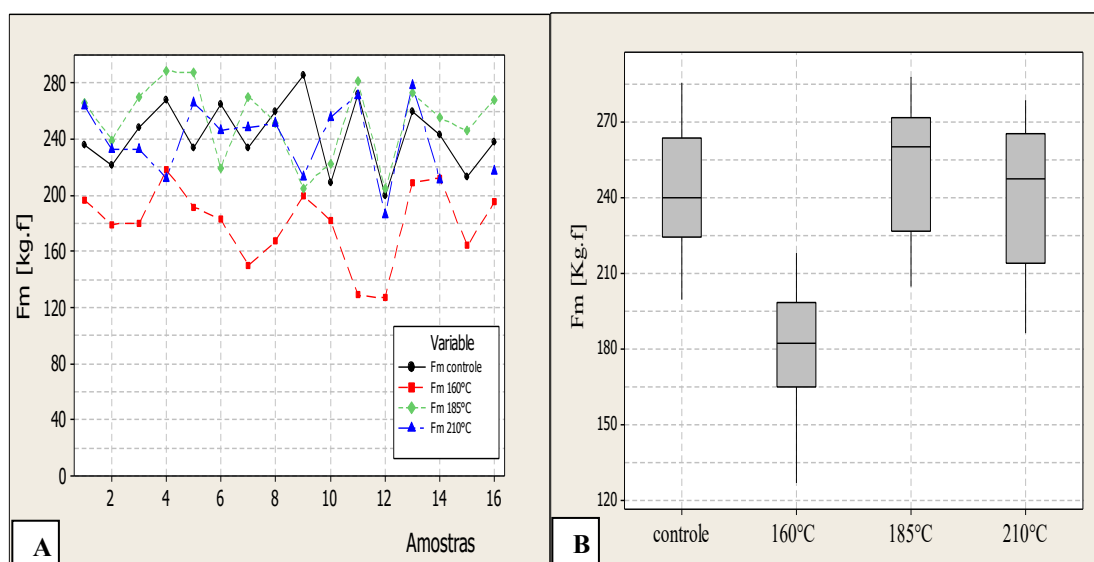


Figura 14 – Dispersão dos resultados de força máxima entre os corpos de prova de cada tratamento (A) e Força máxima (B).

Fonte: Arquivo pessoal.

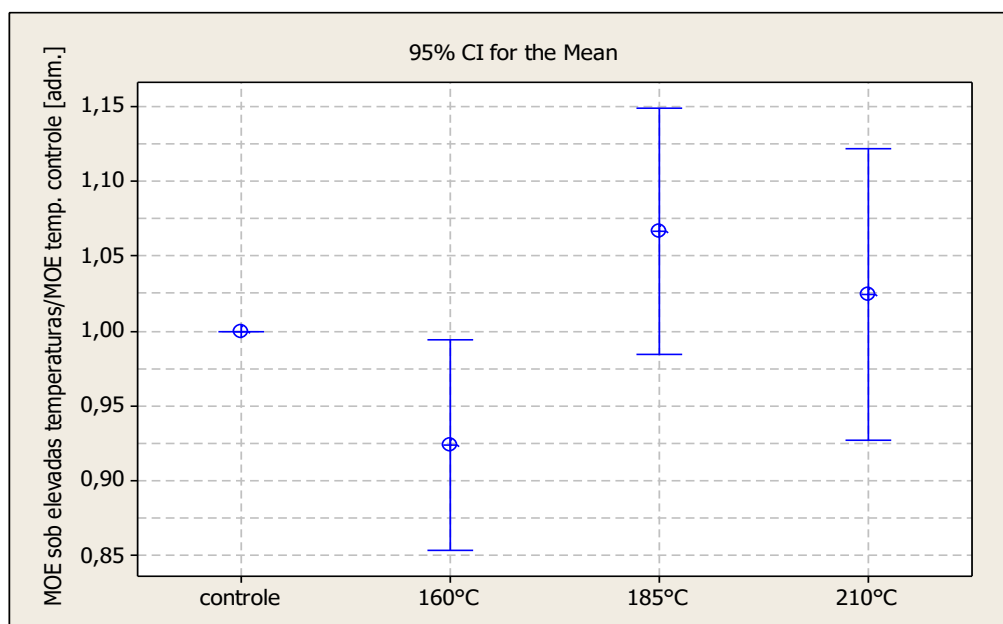


Figura 15 – Módulos de elasticidade sob elevadas temperaturas/ Módulo de elasticidade do tratamento controle.

Fonte: Arquivo pessoal.

Objetivando estimar a veracidade dos resultados obtidos por meio do ensaio de propagação de ondas de excitação, os resultados referentes aos ensaios destrutivos e não destrutivos foram submetidos a uma análise de regressão, na Tabela 4 são apresentados os resultados estatísticos referentes a análise, a equação gerada descreve a relação estatística entre os ensaios dinâmicos e o ensaio de flexão estática, de modo que ao aplicar na equação os valores encontrados nos ensaios não destrutivos, gera-se os valores do ensaio destrutivo. No R^2 (R-SQ), é descrito a confiabilidade do resultado gerado. De forma geral, os ensaios de propagação de ondas apresentaram resultados positivos, possuindo média de 90,30% de confiabilidade para o modo de vibração flexional e 91,98% para o modo de vibração longitudinal.

Lima Junior (2016) ao realizar estudo com madeira de *Eucalyptus grandis*, utilizando o *software* Sonelastic e em seguida, comparando os resultados por meio da regressão com resultados obtidos para flexão estática, encontrou R^2 de 0,85. Já Carrasco (2017), em ensaio similar, porém utilizando madeiras de 29 espécies diferentes, encontrou por meio da análise de regressão, R^2 de 0,98. Mostrando alta acurácia dos valores obtidos pelo ensaio de propagação de ondas de excitação e o ensaio de flexão estática.

Tabela 4 –Regressão dos ensaios dinâmicos para a obtenção do MOE.

E Flex x MOE		R-Sq [%]
Controle	MOE [MPa]= -262,4 + 0,492588 E Flex[MPa]	89,57
160°C	MOE [MPa]= 1921,85 + 0,364964 E Flex[MPa]	84,15
185°C	MOE [MPa]= 1519,15 + 0,40377 E Flex[MPa]	87,21
210°C	MOE [MPa]= 1242,91 + 0,410776 E Flex[MPa]	93,91
Todos	MOE [MPa]= 1122,08 + 0,417513 E Flex [MPa]	90,30
E Long x MOE		R-Sq [%]
Controle	MOE [MPa] = 735,93 + 0,549702 E Long [MPa]	92,16
160°C	MOE [MPa] = 2599,44 + 0,425352 E Long [MPa]	76,38
185°C	MOE [MPa] = 1880,29 + 0,488456 E Long [MPa]	85,87
210°C	MOE [MPa] = 1335,36 + 0,509636 E Long [MPa]	95,43
Todos	MOE [MPa] = 1474,79 + 0,504725 E Long [MPa]	91,98

Fonte: Arquivo pessoal.

Analisando os tratamentos da Tabela 4 de forma individual, destaca-se a porcentagem do R quadrado do tratamento à 210 °C, com 93,91% de confiabilidade para o modo de vibração flexional e 95,75% para o modo de vibração longitudinal.

Na Figura 16, os valores de regressão foram apresentados graficamente, possibilitando observar a acurácia dos dados para os ensaios de propagação de ondas de excitação no modo de vibração flexional e longitudinal para estimar o valor do módulo de elasticidade.

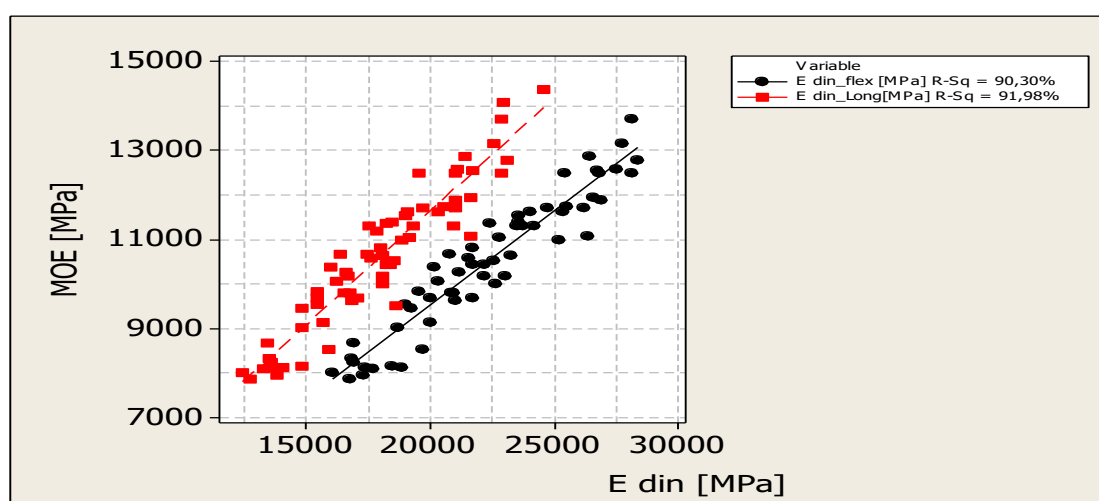


Figura 16 – Análise de regressão entre MOE e E din.

Fonte: Arquivo pessoal.

Na figura 16, análise de regressão foi realizada com intuito de estimar a partir do G din, do ensaio de propagação de ondas de excitação no modo de vibração torcional, os valores do módulo de ruptura. O valor encontrado para R^2 foi de 41,11%, portanto a análise de regressão indicou que os valores encontrados para o módulo de deformação transversal dinâmico, possuem baixo grau de confiabilidade ao se estimar os valores de módulo de ruptura. A equação (6) abaixo, foi gerada a partir desta análise.

$$\text{MOR} = 14,4698 + 0,0428445 \text{ G din [MPa]} \quad (6)$$

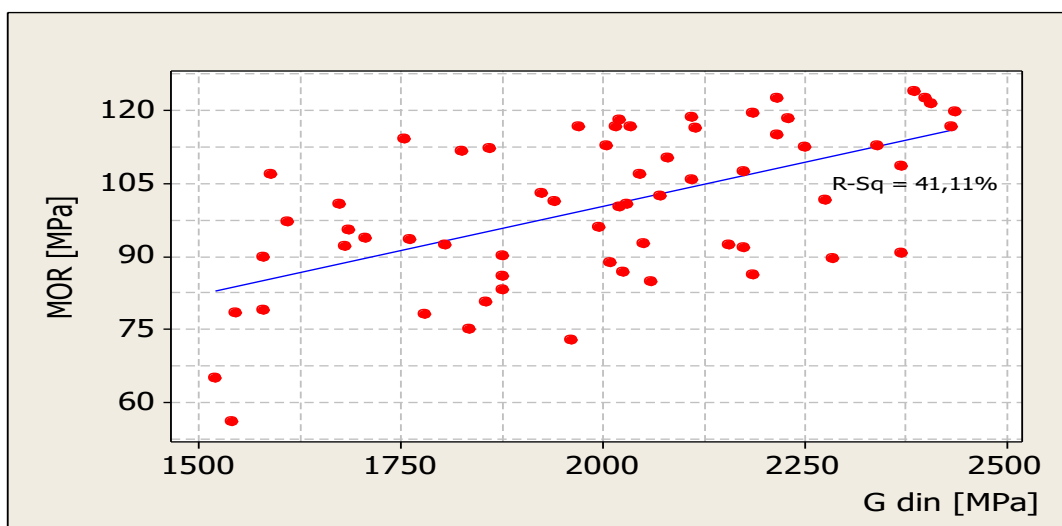


Figura 17 – Análise de regressão entre MOR e G din.

Fonte: Arquivo pessoal.

5. CONCLUSÃO

O valor de umidade das madeiras analisadas mostrou ter uma relação inversa ao aumento da temperatura, tendo os maiores valores de umidade para o tratamento controle e os menores para 210°C. Já a densidade aparente, não obteve uma relação direta, estando os valores semelhantes estatisticamente para os tratamentos controle, 160° e 210°C.

O tratamento térmico nas madeiras de teca não influenciou estatisticamente as propriedades de frequência natural e módulo de elasticidade dinâmico, nos modos de vibração flexional, longitudinal e torcional. No entanto, o módulo de elasticidade transversal dinâmico se mostrou sensível ao efeito dos tratamentos térmicos, diferenciando estatisticamente das amostras de controle com decréscimo do valor.

Em relação às propriedades estáticas foi possível concluir que, apenas as amostras submetidas ao tratamento em escala industrial (160°C) tiveram redução dos valores de F_m e MOR. Estando os demais tratamentos (controle, 185°C e 210°C) iguais estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Já o MOE se mostrou sensível a variação dos tratamentos térmicos, tendo o tratamento industrial (160°C) as maiores reduções.

Para estimar os módulos de elasticidade através dos métodos de propagação de ondas de excitação na longitudinal e flexional, em ordem de significância, os tratamentos que melhor responderam foram: 210°C, controle, 185°C e 160°C. Os coeficientes de correlação se mostraram superiores a 76,38%, mostrando ser boa ferramenta para determinar esta propriedade;

O método de propagação de ondas de excitação na torcional não se mostrou eficiente para estimar o valor de módulo de rigidez das madeiras estudadas, com $R^2 = 41,10\%$

6. REFERÊNCIAS

ALVES, R. C. **Determinação das constantes elásticas da madeira considerando a sua ortotropia**. 2017. Tese (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

BENEDETTI, V. **Caracterização da madeira de teca plantada em diferentes idades e regiões para produção de piso**. 2018. Dissertação (Programa recursos florestais), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. ASTM designation E1876 – 09, 2006.

ANDRADE JUNIOR, Jairo Ribas de. **CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DE PEÇAS DE MADEIRA DE PINUS ELLIOTTII UTILIZANDO O MÓDULO DE ELASTICIDADE OBTIDO PELO MÉTODO DE ONDAS LONGITUDINAIS DE TENSÃO**. 2016. 126 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

ARAÚJO, Solange de Oliveira. **Propriedades das madeiras termorretrificadas**. 2010. 94 f. Tese (Doutorado). Curso de Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

BALLARIN, Adriano Wagner; NOGUEIRA, Marcelo. Caracterização elástica da madeira de *eucalyptus citriodora*. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66-80, 2003.

BATISTA, D. C.; TOMASELLI, I.; KLITZKE, R. J. Efeito do tempo e temperatura de modificação térmica na redução do inchamento máximo da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 533-540, 2011. DOI: 10.5902/198050983810.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanic softwood and wood composites**, Malabar - EUA, Krieger Publishing Company, 1993.

BUCUR, V. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. **Ultrasonics**, v. 21, p. 116-126. 1983.

BRAZ R. L.; OLIVEIRA J. T. S.; RODRIGUES B.P.; ARANTES M. D. C.; Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Toona ciliata* em diferentes idades. **Floresta**, v.43, n.4, p. 663 – 670, 2013. DOI: 10.5380/rf.v43i4.30559.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 83-98, dez. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212009000400519>.

CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L. C.; MANTILLA, J. N. R. Influência da temperatura na resistência mecânica e no módulo de elasticidade em madeiras de híbridos de eucaliptos. **Ciências Florestais**, Santa Maria, v.26, n.2, p. 389-400, 2016. DOI: 10.5902/19805098.

CARRASCO, E. V. M.; VARGAS, C. B.; SOUZA, M. F.; MANTILLA, J. N. R. Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, 2017. DOI: 10.1590/S1517-707620170005.0272.

CHAGAS, S. F.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. de C.; CARVALHO, A. M. M. L. Propriedades da madeira de teca de diferentes idades e oriundas de desbaste. *Revista Ciência da Madeira*, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 138-150, 2014. DOI: 10.12953/2177-6830.v05n02a08.

COSSOLINO, L. C; PEREIRA, A.H.A. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização, **In: Informativo técnico-científico ITC-ME/ATCP**, São Paulo, 2010.

DIAS, A. C. C.; MARCHESAN, R.; ALMEIDA, V. C.; MONTEIRO, T., C; MORAES, C. B. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. **Revista Ciência da Madeira - Rcm**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 37-44, mar. 2018. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v9n1p37-44.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. CORRELAÇÕES ENTRE A DENSIDADE APARENTE E AS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA DA MADEIRA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Santa Catarina. **Anais**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos materiais. São Pedro, 2000. v. 14.

DOM TOTAL. Polícia Federal estima que 90% da madeira extraída da Amazônia tenha origem ilegal. 2021. Disponível em: <<https://domtotal.com/noticia/1521770/2021/06/policia-federal-estima-que-90-da-madeira-extraida-da-amazonia-tenha-origem-ilegal/>>. Acesso em: 22 ago. 2021.

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

FIGUEROA, M. J. M. Coeficientes de modificação térmica das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura. 2012. 212 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood® handbook**. Helsink: [s.n.], 2003

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. An ultrasonic method for measuring the elastic constant in beams of Eucalyptus citriodora, Pinus elliottii and Goupia glaba wood.. **In: Agricultural Engineering 2000 - AgENg2000**, 2000, Warwick - UK. CD rom. Warwick, 2000. v. 1.

GONÇALVES, R.; GARCIA, G. H. L. ; BRAZOLIN, S. ; BERTOLDO PEDROSO, C. ; RUY, M. . Methodology for characterization of elastic constants of wood tree branches. **BioResources**, v. 14, p. 8439-8454, 2019.

GUIRARDI, B. D. **Efeito da termorretificação nas propriedades da madeira de desbaste de *Tectona grandis* L.f.** 2020. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

HELLMEISTER, J.C. Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1983. São Carlos. **Anais**. São Carlos: USP, EESC, SET, LaMEM, 1983, v.1.

HEYLIGER, Paul; UGANDER, Pontus; LEDBETTER, Hassel. Anisotropic elastic constants: measurement by impact resonance. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. 5, p. 356-363, 2001.DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:5(356)

HILL, C. **Wood modification: chemical, termal and other processes**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2006.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual**. São Paulo: Iba, 2020.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. A taxa consolidada de desmatamento por corte raso para os nove estados da Amazônia Legal (AC, AM, AP, MA, MT, PA, RO, RR e TO) em 2019 é de 10.129 km². 2020. Disponível

em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5465>. Acesso em: 22 ago. 2021

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de Sp. **Informações sobre madeiras: Teca.** São Paulo. Disponível em: <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/78.htm> Acesso em: 24 ago. 2021.

IRVINE, G. The glass transitions of lignin and hemicellulose and their measurement by differential thermal analysis. **Journal Tappi**, v. 67, n. 5, p. 116–121, 1984.

JUNIOR, L. **Uso da técnica de excitação por impulso (TEI) para a caracterização da rigidez da madeira de *Eucalyptus grandis* de 10 anos da região de Itapeva/SP.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

KAW, A.K. **Mechanics of composite materials.** 2 ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.

LINCOLN, W. A. **World woods in colour.** Hertford: Stobart Davies; 1986.

LOBÃO, M.S.; LÚCIA, R.M.D.; MOREIRA, M.S.S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físicos-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.889-894, 2004. DOI: 10.1590/S0100-67622004000600014.

LOPES, J. de O. **Uniformidade e estabilidade da cor da madeira termorretrificada de *Tectona grandis* L.f.** 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) -Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

MANRÍQUEZ F, M. J.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente construído**, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009. DOI: 10.1590/s1678-86212009000400525

MARCOVITCH, J.; PINSKY, V. Bioma Amazônia: atos e fatos. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 34, n. 100, p. 83-106, dez. 2020. DOI: 10.1590/s0103-4014.2020.34100.007.

MATOS, J L. M. **Estudo Sobre a Produção de Painéis Estruturais de Lâminas Paralelas de *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1997. 117 f. Tese (Doutor em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1997.

MODES, K. S.; SANTINI, J. S.; VIVIAN, M. A.; HASELEINS, C. R. Efeito da termorreificação nas propriedades mecânicas das madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v.27, n.1, p.291-302, 2017.

DE MORAES NETO, S. P.; TELES, F. R.; RODRIGUES, T. O.; VALE, A. T.; SOUZA, M. R. Propriedades mecânicas da madeira de cinco procedências de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* implantadas no Cerrado do Distrito Federal. **Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2009.

MORESCHI, J.C. **Propriedades da madeira**, 4^a ed, Curitiba, 2012.

MOTTA, J. P.; ALVES, R. C.; PAES, J. B. Efeito do tratamento térmico na resistência à flexão estática da madeira de *Tectona grandis* L.f. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 5, n. 2, p. 1-4, jul. 2013.

MOURA, L. F. de; BRITO, J. O.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Efeitos da termorreificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *eucalyptus grandis* e *pinus caribaea* var. *Hondurensis*. **Floresta**, [S.L.], v. 42, n. 2, p. 305.maio, 2012. DOI: 10.5380/rf.v42i2.17635.

OLIVEIRA, J. T. da S.; SILVA, J. de C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 381-385, jun. 2003. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s0100-67622003000300015.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 429f. 1997.

OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. Guia de caracterização dos módulos elásticos e do amortecimento de madeiras e derivados utilizando as soluções SONELASTIC. Ribeirão Preto, **ATCP Engenharia Física**, 2013.

OTANI, L.B., SEGUNDINHO, P.G.A., MORALES, E. A. M., PEREIRA, A.H.A Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso, **In: Informativo técnico-científico ITC05 /ATCP**, São Paulo, 2017.

PINHEIRO, P. C. C.; SÈYE, O. Influência da temperatura da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 53, 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 1998.

PINTO, M. de L. **Propriedades e características da madeira de teca (*tectona grandis*) em função da idade**. 2007. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

RECH, C. Característica da teca. **Revista da madeira**, Bento Gonçalves, v. 118, p. 55-57, 2009.

RINNTECH. **User Manual** – Arbotom 3-D Tree Impulse Tomograph, version 1.59 or Microsoft Windows 98,2000, XP. Heidelberg: Microsoft Window.42 p.2005.

SANDOZ, J. L. Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. In: **international symposium on destructive testing of wood**, 10, 1996, Lausanne, Proceedings... Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology Chair of Timber Construction. p. 147.1996.

SANGUMBE, L. M. V.; PIRES, L. M. E.; DE ASCENÇÃO, J. A. Densidade básica e características anatómicas da madeira de 9 (nove) espécies da floresta do Maiombe, província de Cabinda Angola. **Ojeandola Agenda**, n. 57, p. 2, 2019.

SEGUNDINHO, P. G. A.; REGAZZI, A. J.; POLETTI, F. S.; PAULA, M. O.; MENDONÇA, A. R.; GONÇALVES, F. G. Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de cedro-australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1163-1178, 1 out. 2018. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509833392>.

SILVA, Marcio Rogério da. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de *eucalipto citriodora e pinus taeda***. 2012. 223 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

THOMSON, W.S.; STEVEN, R.R. Influence of thermal treatment on the mechanical and chemical properties of wood: A review of research at the Mississippi forest products laboratory. Proceedings of research conference on: High temperature drying effects on mechanical properties of softwood lumber, **Springfield**, USA, 1976.

TRAUTENMÜLLER, J.W.; BALBINOT, R.; BORELLA, J.; TREVISAN, R.; Balestrin, D.; VENDRUSCOLO, R.; SABADINI, A. M. Variação longitudinal da massa específica básica da madeira de *Cordia americana* e *Alchorneatriplinervia*. **Ciência Rural**, v.44, n.5, p.817-821, 2014. DOI: 10.1590/S0103-84782014000500009.

WANG, X.; ROSS, R.J.; CARTER, P. Acoustice valuation of wood quality in standing trees. Part I: acoustic wave behavior. **Wood and Fiber Science**, v. 39, n. 1, p. 28-38, 2007.

WENTZEL, M.; FLECKENSTEIN, M.; HOFMANN, T.; MILITZ, H. Relation of chemical and mechanical properties of Eucalyptus nitens wood thermally modified in open and closed systems. **Wood Material Science and Engineering**, 2018. DOI: 10.1080/17480272.2018.1450783.