



**EDUARDO HÉLIO DE NOVAIS MIRANDA
RAYNER PATHELE FERREIRA**

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA
UTILIZANDO A TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE
PARTÍCULAS (PIV)**

LAVRAS

2019

EDUARDO HÉLIO DE NOVAIS MIRANDA

RAYNER PATHELE FERREIRA

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA
UTILIZANDO A TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE
PARTÍCULAS (PIV)**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Dr. Rodrigo Allan Pereira

Orientador

Me. Taiane Oliveira Guedes

Coorientadora

LAVRAS

2019

EDUARDO HÉLIO DE NOVAIS MIRANDA
RAYNER PATHELE FERREIRA

**ANÁLISE DE PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA
UTILIZANDO A TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE
PARTÍCULAS (PIV)**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 04 de novembro de 2019.
Dr. Rodrigo Allan Pereira - UFLA
Me. Taiane Oliveira Guedes - UFLA
Dr. André Luiz Zangiácomo - UFLA

Dr. Rodrigo Allan Pereira

Orientador

Me. Taiane Oliveira Guedes

Coorientadora

LAVRAS

2019

RESUMO GERAL

A madeira é um material importante no âmbito da construção civil, utilizada para diversos fins como esquadrias, fôrmas, estruturas, dentre outros; alguns dos benefícios proporcionados pela madeira são: alta resistência mecânica e de compressão, bom isolamento térmico e acústico, sustentabilidade em seu uso. Para caracterização das madeiras podem ser utilizados ensaios não destrutivos, os quais são identificados, de maneira geral, pela facilidade de ensaio, baixo custo, e por não causarem danos permanentes na superfície dos materiais. O objetivo neste trabalho foi a determinação de propriedades da madeira (retratibilidade e módulo de elasticidade) usando como métodos de mensuração de deslocamentos as técnicas não destrutivas de Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) e o ultrassom, comparando os resultados obtidos com metodologia convencional. Para determinação destas propriedades pela técnica PIV utiliza-se um software específico, que através da captura de imagens sucessivas em intervalos de tempo pré-definidos são obtidas as informações necessárias para caracterização das propriedades do material. Utilizando-se o equipamento de ultrassom, estas propriedades são determinadas a partir da propagação de ondas ultrassonoras através de transdutores (transmissores e receptores destas ondas). A partir dos resultados obtidos pode-se observar que os valores encontrados para a técnica PIV foram estatisticamente iguais aos valores encontrados pelo ultrassom e pelo uso do método convencional. Concluiu-se que a técnica PIV pode ser aplicada para mensurar deslocamentos e deformações em madeira, mostrando-se ser uma ferramenta eficaz para o controle da qualidade das propriedades da madeira, com potencial para aplicação em campo ou em peças em uso.

PALAVRAS-CHAVE: Técnicas não destrutivas; Retratibilidade; Módulo de Elasticidade.

GENERAL ABSTRACT

Wood is an important material in the field of construction, used for various purposes such as frames, moldings, structures, among others. Some of the benefits provided by wood are: high mechanical and compressive strength, good thermal and acoustic insulation, sustainability in its use. Non-destructive tests can be used for wood characterization, which are generally identified by ease of testing, low cost, and not causing permanent damage to the surface of materials. The objective of this work was to determine the wood properties (retractability and elastic modulus) using non-destructive Particle Image Velocimetry (PIV) and ultrasound as displacement measurement methods, comparing the results obtained with conventional methodology. To determine these properties by the PIV technique, specific software is used, which captures successive images at predefined time intervals and provides the information necessary to characterize the material properties. Using ultrasound equipment, these properties are determined from the propagation of ultrasound waves through transducers (transmitters and receivers of these waves). From the results obtained it can be observed that the values found for the PIV technique were statistically equal to the values found by ultrasound and the use of the conventional method. It was concluded that the PIV technique can be applied to measure displacements and deformations in wood, proving to be an effective tool for the quality control of wood properties, with potential for application in the field or in pieces in use.

KEYWORDS: Non destructive Techniques; Retractability; Modulus of Elasticity.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	2
2.1	Madeira como material de construção	2
2.2	Propriedades da madeira	3
2.2.1	Propriedades físicas da madeira	4
2.2.1.1	Umidade.....	4
2.2.1.2	Variação dimensional.....	5
2.2.2	Propriedades mecânicas da madeira	6
2.3	Técnicas de avaliação de materiais	7
2.3.1	Técnicas convencionais	8
2.3.2	Ensaio Não Destrutivo (END's).....	8
2.4	Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV).....	9
2.5	Ultrassom.....	12
3	CONSIDERAÇÕES	13
	REFERÊNCIAS	15

SEGUNDA PARTE

	TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS PARA VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA RETRATIBILIDADE EM MADEIRAS DE <i>Pinus elliottii</i>	20
	TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) E MÉTODO DO ULTRASSOM PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE MADEIRA DE <i>Bertholletia excelsa</i>	37

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

A utilização de diferentes tipos de materiais na construção civil tem crescido nos últimos anos. A demanda por materiais com diferentes propriedades físicas e mecânicas aumenta a necessidade de melhor avaliação e conhecimento de suas características (PAIVA, 2012).

A diversificação do uso da madeira tem importância crescente no cenário mundial por substituir os produtos oriundos de fontes de recursos não renováveis, principalmente os derivados do petróleo, como combustíveis e plásticos (LONGUE; COLODETTE, 2013).

Segundo Silva (2017), a madeira é um material de grande abundância e um dos elementos mais antigos utilizados na construção civil, devido sua disponibilidade, facilidade de manuseio e sua relação resistência/peso. Além disso, seu uso possui vantagens em relação às obras de alvenaria tradicional no âmbito técnico construtivo, por ser um polímero natural cuja função é estrutural, além de propiciar características arquitetônicas como cor e textura (MANFRINATO, 2015). O material possui elevada resistência mecânica à tração e compressão, bom isolamento térmico, elétrico e acústico (MORAES, 2012).

Diante de sua importância no cenário da construção, torna-se necessário o conhecimento acerca das propriedades da madeira. As técnicas convencionais de ensaio, preconizadas na NBR 7190, utilizadas atualmente para análise de propriedades físicas e mecânicas da madeira, entretanto, geralmente, demandam alto tempo de processamento e necessitam de equipamentos específicos para realização dos ensaios.

Os ensaios não destrutivos (END's), neste contexto, são opções de substituição dos métodos convencionais por serem técnicas que possuem, na maioria das vezes, uma maior facilidade de ensaio, baixo custo e, que, o material ensaiado não sofre danos que inviabilizam seu uso posterior.

Dentre os END's, têm-se a Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV), uma técnica ótica que, inicialmente, foi desenvolvida para mensuração de propriedades de fluxo em materiais fluidos e gasosos (Raffel et al, 2007).

Nos materiais sólidos a técnica PIV é utilizada através de uma captura de imagens em intervalos de tempo pré-determinados durante uma fase de carregamento. Estas

imagens são processadas em um algoritmo computacional que calcula os deslocamentos ocorridos na superfície do objeto estudado (PEREIRA et al., 2017).

Outro importante método não destrutivo é o ultrassom, uma técnica realizada por meio do uso de propagação de ondas ultrassônicas para caracterização das propriedades da madeira. Destaca-se pela facilidade de operação e aquisição de resultados. Na madeira, conhecendo-se a velocidade e propagação das ondas e a densidade do material é possível calcular sua constante elástica.

O objetivo deste trabalho foi determinar propriedades da madeira (retratibilidade e módulo de elasticidade) com a utilização das técnicas não destrutivas de Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) e o ultrassom.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Madeira como material de construção

Na construção civil, a madeira é utilizada de diversas formas em usos temporários, como: fôrmas para concreto, andaimes e escoramentos. De forma definitiva, é utilizada nas estruturas de cobertura, nas esquadrias (portas e janelas), nos forros e nos pisos (ZENID, 2009).

A madeira além de versátil é um material de obtenção sustentável. No entanto, sua aplicação como material principal em sistemas construtivos enfrenta muitos obstáculos, especialmente no Brasil, o que se tornou até um aspecto cultural, podendo-se assim dizer. Isto se deve ao fato de que ainda há um pensamento difundido de que a madeira, por ser um material combustível e suscetível ao ataque de agentes biológicos e conseqüente apodrecimento, é menos resistente e durável que os outros sistemas construtivos mais comuns (AFLALO, 2017).

A realização de pesquisas, como de Aflalo (2017) e Pereira et al. (2017) ao longo dos últimos anos a respeito das propriedades das espécies de madeira, evolução dos métodos construtivos e descobertas de novos meios de proteger e aumentar a durabilidade do material, demonstram o quanto o senso comum está equivocado. Diante de tais avanços, a madeira perante os sistemas construtivos em aço e concreto, vem sofrendo crescente evolução em seu uso.

Na construção civil, o uso da madeira pode ser agrupado de acordo com suas propriedades, como se segue: construção civil pesada, externa, que engloba as peças de madeira serrada usadas para estacas marítimas, trapiches, pontes; construção civil leve externa e leve interna estrutural, que são madeiras que reúne as peças serradas na

forma de tábuas e pontaletes empregados em usos temporários; construção civil leve interna decorativa que abrange as peças de madeira serrada e beneficiada, como forros, painéis, lambris e guarnições; construção civil leve em esquadrias, no qual abrange as peças de madeira serrada e beneficiada, como portas, venezianas, caixilhos; e por fim, construção civil assoalhos domésticos, que compreende os diversos tipos de peças de madeira serrada e beneficiada (ZENID,2009).

Tendo em vista a evolução no uso desse material na indústria da construção civil, ascendem-se muitos exemplos na literatura, como Soriano e Mascia (2009) que estudaram o uso de estruturas mistas em madeira concreto para construção de estradas vicinais, que, apresentaram desempenho satisfatório.

Já Manfrinato (2015) em seus estudos sobre o uso da madeira visando fins arquitetônicos e estruturais, chegou às conclusões que o uso de tal material, além de ter procedência natural (sustentável), leva a diminuição dos rejeitos do canteiro de obras, agiliza o processo da construção e confere melhor qualidade à obra pronta.

Martins (2017), na qual descreveu o uso da madeira no século V, desde escoras em poços e galerias, até escadas: esse estudo comprova a eficiência do uso da madeira desde a antiguidade.

Diante da evolução da madeira no ramo da construção civil, tem-se a necessidade de melhor avaliação das características de tal material, tanto quanto às propriedades físicas (como a retratibilidade), quanto à propriedades mecânicas (tais como o módulo de elasticidade), justificando a realização deste trabalho.

2.2 Propriedades da madeira

A madeira é um material biológico, cujas características intrínsecas de higroscopicidade, anisotropia e heterogeneidade a tornam bastante complexa. Assim, é importante compreender suas propriedades e como estas se relacionam com seu uso.

A determinação das propriedades físico-mecânicas da madeira é de grande relevância, pois a partir destes estudos é possível obter as informações necessárias para descrever seu comportamento nos diversos usos possíveis (OLIVEIRA, 1998).

As características da madeira são influenciadas por fatores ambientais, como clima, composição e umidade do solo no lugar de crescimento da árvore, densidade do povoamento e tipo de manejo, posição da árvore no terreno de cultura (talhão) e incidência de chuvas (CALIL JÚNIOR et al., 2003).

Segundo Araújo (2007), as propriedades físicas e mecânicas da madeira são elementos importantes para sua aplicação, de maneira a fornecer peças estruturais confiáveis em ambientes externos e internos de habitações, tais como, painéis, embalagens, caixotes e mobílias.

2.2.1 Propriedades físicas da madeira

2.2.1.1 Umidade

A umidade da madeira é a quantidade de água presente na mesma. Seu valor é obtido com a relação entre a massa de água contida na matéria lenhosa e sua massa, sendo seu valor expresso em porcentagem. Esta relação pode ser feita levando em consideração a massa inicial da madeira, ou seja, base úmida, ou a massa da madeira totalmente seca, denominada de base seca.

Na madeira, a água pode ser encontrada em diferentes locais: nos espaços celulares e intracelulares (água livre), impregnada na parede das células (água de impregnação) e presente na constituição química da madeira (água de adsorção química).

A água move-se no interior da madeira sob a forma líquida ou de vapor, e sua velocidade de movimentação depende da diferença entre a temperatura interna e externa da madeira. A água movimenta-se através de vários tipos de passagens, como: as cavidades das fibras e vasos, as células radiais, as aberturas, os dutos de resina, dentre outros (STEIN, 2003).

A água pode deslocar-se praticamente em qualquer direção, tanto radial quanto longitudinalmente. Entretanto a sua difusão no sentido longitudinal é de 10 a 15 vezes mais rápida que no sentido transversal, assim como a difusão no sentido radial é mais rápida que no sentido tangencial (MELLADO, 2007).

As dimensões da madeira se alteram com a variação da umidade no intervalo de 0% até o ponto de saturação das fibras (PSF) (LOGSDON, 2000). Neste intervalo conhecido como intervalo higroscópico, ao aumentar o teor de umidade as dimensões da madeira aumentam (inchamento), o que está associado principalmente à inserção de água nos espaços submicroscópicos da parede celular, entre as micelas (feixes formados por moléculas de celulose) e nas suas regiões amorfas, este fenômeno resulta em afastamento destas, e consequente mudança das dimensões da madeira (LOGSDON, 2002; MORESCHI, 2012).

2.2.1.2 Variação dimensional

A madeira por ser um material higroscópico, ou seja, que possui grande afinidade com a água, pode sofrer alterações em suas dimensões. Isso ocorre devido a adsorção ou a dessorção da água para atingir equilíbrio higroscópico com o meio em que se encontra. Praticamente toda a alteração dimensional da madeira ocorre entre a umidade de saturação ao ar e 0% de umidade (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A variação dimensional se refere às contrações e inchamento do material, e começam a ocorrer quando há a perda ou ganho de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, normalmente situado entre 28% e 30% de umidade.

A retratibilidade e o inchamento são fenômenos que ocorrem na madeira conforme a mesma é exposta a ambientes com diferentes umidades. Compreender tais fenômenos é de grande importância para uso estrutural da madeira, uma vez que as peças devem estar dimensionadas de acordo com as propriedades físicas e mecânicas do material. Define-se retratibilidade como o fenômeno em que a madeira diminui de volume devido à perda de água para o ambiente no qual se encontra para entrar em equilíbrio. O fenômeno de inchamento é o contrário do fenômeno de retratibilidade, isto é, a madeira aumenta de dimensões ao absorver água do meio envolvente, água esta que vai infiltrar-se nas paredes celulares e posteriormente nos espaços vazios celulares da madeira provocando um aumento de volume da madeira.

Galvão e Jankowisk (1985) afirmaram que o aumento do volume é proporcional à variação de umidade (0% até o PSF), como também, diretamente relacionada à densidade da madeira. No entanto, espécies que contenham grandes quantidades de resinas, de extrativos e de lignina são menos susceptíveis a estas alterações volumétricas.

A madeira sofre retratibilidade e inchamento com a variação da umidade entre 0% e o PSF. O fenômeno é mais evidente na direção tangencial, onde a contração tangencial varia de 5 a 10%, seguida da contração na direção radial que é cerca da metade da contração tangencial e da contração longitudinal que é menos pronunciada, variando apenas entre 0,1 a 0,3% (Panshin e Zeew, 1970). Fato comprovado por Pfiel e Pfiel (2003), que ensaiando três espécies brasileiras de madeira, Carvalho, Eucalipto e Pinho, encontraram sempre maiores valores de inchamento tangencial, seguidos pelo inchamento radial e longitudinal.

Segundo Panshin e Zeew (1970), a causa das diferenças entre propriedades observadas em diferentes direções da madeira é o comportamento anisotrópico de tal

material. Uma das formas de mensuração de tal parâmetro é pelo fator anisotrópico, ou relação entre a retratibilidade na direção tangencial e na radial. Esse parâmetro é usado para indicar qualidade da madeira pós secagem e demonstrar a propensão das peças de madeira apresentarem defeitos, como o fendilhamento.

Os intervalos de valores obtidos pelo fator anisotrópico variam de 1,3 a 1,4 para madeiras muito estáveis, e apresenta ser superior à 3 para espécies extremamente instáveis dimensionalmente.

A intensidade da retração na direção tangencial situa-se em torno de duas vezes o valor encontrado para a direção radial. Para o caso de madeiras do gênero *Eucalyptos*, este valor pode triplicar. Já em relação à direção axial, a intensidade nesta se apresenta em torno de vinte vezes menor que o valor tangencial.

O motivo desta diferença nas direções se deve inexistência de estruturas da madeira resistentes nos planos radiais e tangenciais da madeira, em contrapartida ao plano longitudinal, que possui uma maior resistência a deformações, pela presença das fibras.

2.2.2 Propriedades mecânicas da madeira

As propriedades mecânicas da madeira são de grande importância para seu uso estrutural, permitindo conhecer o comportamento do material quando em uso e dimensionar as peças de acordo com as condições necessárias.

As propriedades mecânicas da madeira podem ser influenciadas por diversos fatores inerentes a madeira e ao meio. Pfeil e Pfeil (2003) consideram os mais importantes: a posição da peça a ser avaliada em relação ao tronco da árvore, a umidade, o tempo de duração da carga e a estrutura da madeira.

Lobão (2004) afirma que as propriedades mecânicas da madeira são dependentes, principalmente, da densidade básica, da porcentagem de madeira juvenil, da intensidade do ataque de insetos e da presença de nós. As propriedades mecânicas são afetadas, ainda, pelas mudanças no teor de água abaixo do ponto de saturação das fibras, diminuindo com o aumento desse teor (GRENN; WINANDY; KRETSCHMANN, 1999).

Para avaliar a qualidade da madeira sólida e definir sua melhor utilização, o conhecimento das propriedades mecânicas se faz necessário, uma vez que a boa correlação entre a resistência mecânica e a rigidez tem sido usada como critério para a classificação estrutural das peças de madeira (TRAMONTINA et al., 2013).

Segundo Panshin e Zeew (1970), a resistência da madeira difere entre os três eixos principais: longitudinal, radial e tangencial. A resistência da madeira na direção paralela às fibras é grande, devido à densidade e a continuidade da fibra na direção longitudinal.

Uma das propriedades mecânicas importantes para as engenharias é o módulo de elasticidade, uma propriedade que caracteriza o material a partir da curva tensão por deformação específica, na fase de comportamento elástico linear (BENJAMIN, 2006). Segundo Silva (2002), o módulo de elasticidade (MOE) é de grande importância na caracterização das propriedades da madeira, uma vez que seu valor pode ser relacionado às classes de resistência do material.

O módulo de elasticidade expressa a carga necessária para distender um corpo de 1cm^2 de seção transversal, a uma distância igual ao seu próprio comprimento. Quanto mais alto o módulo de elasticidade, mais alta é a resistência da madeira e mais baixa será a sua deformação. É determinado através da relação entre a deformação elástica total (obtida no limite proporcional) e a carga aplicada por meio de ensaios de flexão estática, de tração ou de compressão. Os valores a serem utilizados em cálculos podem ser diretamente obtidos nos gráficos baseados na relação carga/ deformação (MORESCHI, 2012).

Tal propriedade mecânica representa, portanto, a rigidez de um material sólido, e está associada com a descrição de várias outras propriedades mecânicas importantes correlacionadas com a engenharia.

2.3 Técnicas de avaliação de materiais

Diante de uma gama de propriedades físicas e mecânicas e da complexidade de materiais de construção, aumenta-se a necessidade de melhor conhecimento das características dos elementos estruturais. (PAIVA, 2012).

As técnicas convencionais de ensaios, já normatizadas, possuem, em sua maioria, algumas características passíveis de evolução. As técnicas não destrutivas de ensaio são opções para a complementação destes métodos, pois se destacam por apresentar características como o baixo custo e tempo, execução mais simples, além de, em sua maioria, permitir a reutilização dos corpos de prova em ensaios posteriores. (PEREIRA et al., 2017)

As técnicas atuais de ensaio, avaliação dos materiais da construção civil, e de toda indústria em geral são divididas em dois grandes grupos: técnicas convencionais de

ensaio, ainda muito utilizadas, e as técnicas chamadas de não destrutivas (PEREIRA et al., 2017).

2.3.1 Técnicas convencionais

Os métodos mais usados para caracterização de materiais são nomeados de métodos convencionais, técnicas difundidas na literatura, e já normatizadas pelas associações internacionais.

Um exemplo deste método é a utilização, normatizada, através da máquina universal para, através de incrementos controlados de carga, realizar ensaios de tração, compressão, cisalhamento, dentre outros, em corpos de prova de diferentes materiais de maneira precisa, ágil e fácil (BIOPDI, 2019).

Outro exemplo das técnicas convencionais é a metodologia de mensuração normativa de deslocamentos na superfície de corpos de prova através de relógios comparadores, que, com precisão, medem deslocamentos ocorridos na superfície de corpos de prova, levando ao cálculo de propriedades mecânicas, como, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Apesar da precisão dos resultados destes métodos de ensaio, tais técnicas convencionais, em geral, apresentam algumas características passíveis de evolução, como, a demanda por alto tempo de processamento, a necessidade de equipamentos específicos, grande número de amostras; fatores que criam uma busca por procedimentos de ensaio mais simples, ágeis, com menor custo agregado e preferencialmente, não destrutivo (STANGERLIN et al., 2008).

2.3.2 Ensaios Não Destrutivos (END's)

Diante das características passíveis de evolução associadas aos métodos convencionais, têm-se os métodos de análise não destrutivos, os quais são caracterizados pela facilidade de ensaio, baixo custo, e por não causarem danos permanentes na superfície dos materiais (PEREIRA et al., 2017).

As primeiras utilizações dos END's foram na década de 1950 nos Estados Unidos. Posteriormente, outros países, como, Suíça, Alemanha e Japão, ganharam grande importância quanto ao desenvolvimento de novas técnicas não destrutivas. (TARGA; BALLARIN; BIAGGIONI, 2005).

A principal tese para concepção não destrutiva para utilização na madeira foi criada por Jayne (1959), o qual argumenta que, a armazenagem de energia e as

propriedades de dissipação de energia da madeira são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento estático desse material. Dessa forma, essas propriedades poderiam ser mensuradas por técnicas não destrutivas.

A classificação destes ensaios não destrutivos se dá por diversos critérios, seja em função de sua forma de aplicação, princípio físico explorado ou sua capacidade de detecção (ENGETELES, 2017).

Os END's são usados, primordialmente, na detecção de propriedades físicas e mecânicas de materiais, mensuração de dimensões dos corpos de prova ou comportamento de peças ou equipamentos (ENGETELES, 2017).

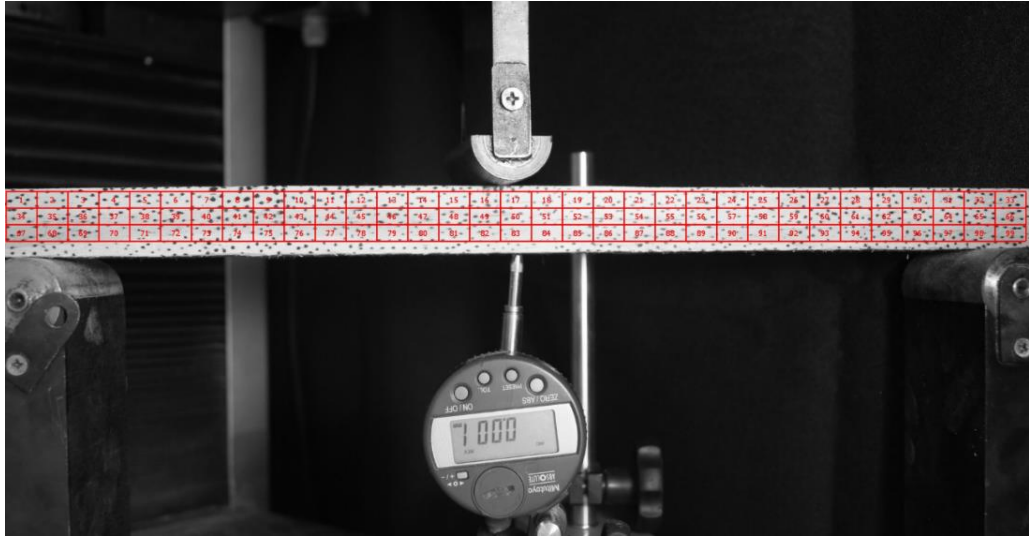
Dentre os END's mais utilizados na realização de ensaios, tem-se o método do ultrassom, e as técnicas óticas, no qual, dentre elas, tem-se a Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) (PEREIRA et al., 2017).

2.4 Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV)

As primeiras aplicações comerciais da técnica Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) foram em 1977, conforme argumenta Raffel et al. (2007). A técnica era, exclusivamente, desenvolvida para o campo de materiais fluidos e gases, no qual se ilumina uma região do escoamento de interesse por meio de um laser, posicionado paralelamente à superfície do material, e durante um intervalo de tempo obtém-se das propriedades do fluxo. Essa técnica também vem sendo utilizada para análises de materiais sólidos.

A técnica PIV nos materiais sólidos é utilizada por meio da captura de imagens em intervalos de tempo pré-definidos em um ensaio físico ou mecânico. A partir dos descolamentos de janelas de interrogação, regiões aleatórias pré-definidas na superfície dos corpos de prova previamente marcados com carimbo ou materiais correlatos, calculam-se os deslocamentos que ocorrem em toda superfície do material ensaiado (Figura 1) (PEREIRA et al., 2017).

Figura 1: Vista geral da Máquina Universal de Ensaios com as janelas de interrogação escolhidas para avaliação dos deslocamentos do material.



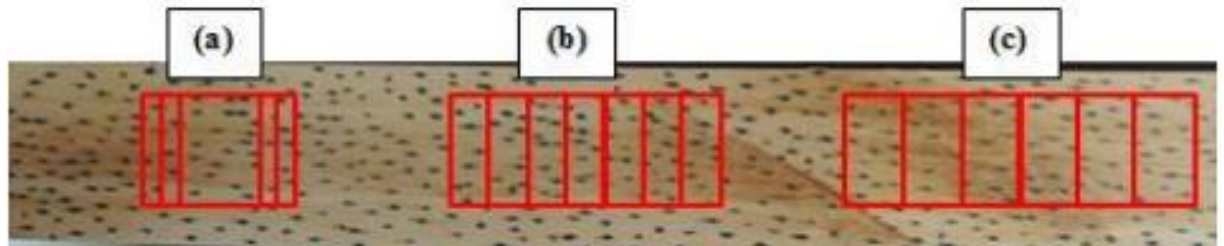
Fonte: Dos autores.

As janelas de interrogação é um parâmetro importante da qualidade e precisão dos resultados da técnica PIV. Janelas menores representam pontos de análise mais representativos para análise, pois quanto menores o número de marcadores dentro de uma janela de interesse, menores são as chances da ocorrência de janelas parecidas em lugares indesejados (PEREIRA et al., 2017).

Os deslocamentos das janelas de interrogação são determinados no algoritmo através do passo de busca, parâmetro que determina a partir de um ponto fixo base que o software irá buscar a posição de uma janela de interrogação, de acordo com um determinado número de pixels.

Menores pixels para o Passo de Busca (mínimo 1 pixel) representam melhores resultados gerados pela técnica PIV, entretanto, maior custo computacional, novamente relacionado ao tempo de processamento. A representação deste parâmetro é mostrada na Figura 2.

Figura 2: Algumas configurações de Passos de Busca.



Legenda: Passo de Busca de: (a) 1 pixel; (b) 2 pixels; (c) 3 pixels.

Fonte: PEREIRA et al. (2017).

Já o Espaço de Busca de uma região de interesse de uma janela de interrogação é uma referência que delimita onde tais janelas serão procuradas durante o processamento das figuras. Na maioria das situações, não há necessidade de uma grande região de busca, desde que conhecido o comportamento do material ensaiado frente ao carregamento, e suas deformações resultantes (Figura 3).

Figura 3: Delimitação de Espaço de Busca de uma região de interesse a partir de uma janela de interrogação.



Fonte: PEREIRA et al. (2017).

O último parâmetro relacionado às janelas de interrogação, necessário à aplicação da técnica PIV é a Limiar de Semelhança, no qual delimita um padrão de semelhança, de uma mesma região de interesse a partir de uma pré-determinada sequência de imagens. Este limiar é de suma importância, já que tais regiões de interesse de janelas de interrogação jamais serão idênticas após a execução do ensaio. Dessa forma, um Limiar de Semelhança igual a um, mostra ao algoritmo PIV que só deverá reconhecer uma região de interesse em uma sequência de figuras totalmente idêntica à região inicial.

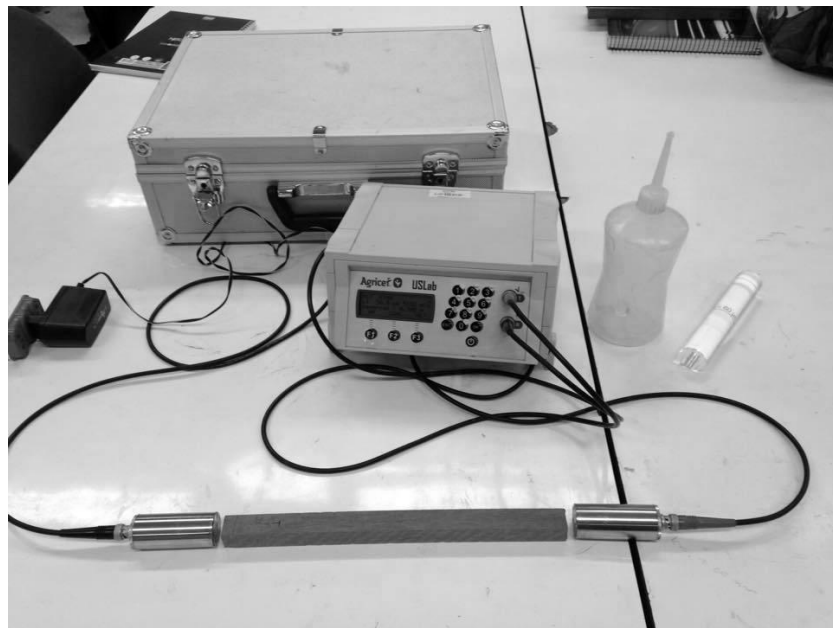
Conhecido todo processo envolvendo a técnica PIV, as principais desvantagens apresentadas por tal técnica se devem, primordialmente, ao fato da medição feita por ela ser apenas em duas dimensões. Além disso, apresenta limitações quanto às ao

tamanho do corpo de prova utilizado, já que, se a amostra for muito grande, o custo computacional, ou seja, de processamento das imagens, iria ser inviável. (PEREIRA et al., 2017).

2.5 Método do Ultrassom

Embasado nos princípios da propagação de ondas mecânicas, a avaliação não destrutiva de madeiras por meio da técnica de emissão de ondas de ultrassom surge como um dos métodos mais aplicados e promissores, em função da facilidade de operação e operacionalização do equipamento, quando comparado aos equipamentos utilizados em ensaios destrutivos (STANGERLIN et al., 2010) (Figura 4).

Figura 4: Equipamento de ultrassom.



Fonte: PAULA et al. (2016).

Esse método consiste na análise da razão entre o tempo (t) que a onda de som leva para atravessar o comprimento (L) do corpo de prova e esse comprimento. (BARTHOLOMEU, 2010).

Calegari (2006) cita em sua pesquisa alguns fatores que influenciam na propagação de ondas, como: propriedades anatômicas, físicas (massa específica, umidade), presença de defeitos (nós e rachaduras), tamanho das amostras ensaiadas, condições de temperatura, umidade relativa e as técnicas de medição.

Os processos envolvidos na propagação de ondas de ultrassom são relativamente simples. Um circuito eletrônico emite pulsos elétricos conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoelétrico, localizado nos transdutores. As vibrações mecânicas se deslocam pelo material, que atenua o sinal emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado por outro cristal piezoelétrico, sendo então amplificadas e transformadas em pulsos elétricos novamente, permitindo a medição do tempo de propagação. A partir da distância e do tempo de percurso da onda sonora se calcula a velocidade da mesma (CALEGARI, 2006).

O ultrassom é uma técnica baseada no princípio de ondas em frequência não perceptível ao homem em madeiras para determinar constantes elásticas. Deste modo, a onda emitida pelo aparelho é lançada e retorna após ter encontrado uma barreira. Conhecendo-se a velocidade e propagação e a densidade do material é possível calcular sua constante elástica (DEL MENEZZI; SILVEIRA; SOUZA, 2010).

A qualidade das propriedades mecânicas da madeira está diretamente correlacionada com a velocidade e o tempo de propagação da onda. Quanto maior a velocidade, menor o tempo, verificando-se menor presença de descontinuidades e em melhor estado a sua peça de madeira se apresenta (RIBEIRO, 2009).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da demanda atual por técnicas mais simples e baratas, aplica-se a caracterização de propriedades através da Técnica PIV, uma técnica simples e rápida, que relaciona as fotografias capturadas em intervalos de tempo pré-estipulados em ensaio, com os deslocamentos sofridos nas superfícies de corpos de prova, sendo uma técnica com amplo poder de aplicabilidade, principalmente na utilização para caracterização das propriedades no campo (“in loco”), ou seja, fazer a análise no local em que o material se encontra sem precisar levar para laboratório e sem ter que destruir ou descartar o material.

A técnica PIV será avaliada, para este contexto, como uma ferramenta para obtenção das propriedades física de retratibilidade e mecânica do módulo de elasticidade em duas espécies de madeiras, sendo comparada com um método convencional.

Já o método do ultrassom, outro método não destrutivo, será usado afim da obtenção de valores de módulo de elasticidade para uma espécie de madeira, sendo discutida a eficiência de seus resultados com um método convencional e com a própria técnica PIV, outro método não destrutivo.

A partir de tais resultados, visa-se confirmar tais técnicas não destrutivas como boas opções para caracterização das propriedades da madeira e de diversos outros materiais sólidos, como aço e concreto, que possuem complexidade inferior à madeira.

REFERÊNCIAS

AFLALO, M. **“A madeira vem sendo usada de forma pouco nobre.”** Publicado em: 10 de março, 2017. Madeira e Construção. Entrevista concedida à Maureen Bertol. Disponível em: <<https://madeiraeconstrucao.com.br/novo/noticias/a-madeira-ven-sendo-usada-de-formapouco-nobre/>>. Acesso em: 27 de agosto de 2019.

ARAUJO, P. B. Growth curve of *Balloniscus glaber* Araujo & Zardo (Crustacea, Isopoda, Oniscidea) from Parque Estadual de Itapuã, Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Zoologia**, Curitiba, v. 24, n. 4, p. 1108-1112, Dec. 2007. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-81752007000400030&lng=en&nrm=iso>. access on 18 Oct. 2019.

BARTHOLOMEU, A. **Revista da madeira**, 2010. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1470&subject=Ultrassom&title=Ultrassom,%20uma%20ferramenta%20para%20a%20classifica%20E7%E3o%20de%20madeira%20estrutural>. Acesso em: 28 de agosto de 2019.

BENJAMIN, C.A. **Comparação entre três critérios de amostragem para a avaliação da densidade básica da madeira de florestas implantadas de eucaliptos.** p. 131. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

BIOPDI. **Máquina Universal de Ensaios**, 2019. Disponível em : <<https://biopdi.com/ensaios-mecanicos/maquina-universal-de-ensaios/>> . Acesso em: 06 set. 2019.

CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira.** 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Centro de Ciências Rurais – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2006.

CALIL JUNIOR, C. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira.** Barueri: Manole, 2003.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SOUZA M. R. de. **Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão**. Universidade de Brasília – UNB. Serviço Florestal Brasileiro – SFB. Acta Amazonica, 2010.

ENGETELES. **Ensaio Não Destrutivo**, 2017. Disponível em:
<<https://engeteles.com.br/ensaios-nao-destrutivos/>>. Acesso em: 06 set. 2019.

GALVAO, A P M; JANKOWSKY, I P. **Secagem racional da madeira**. [S.l: s.n.], 1985.

GREEN, D.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: Wood handbook – **Wood as an engineering material**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1999. Chapter 4.

JAYNE, B. A. “Vibrational properties of wood as indices of quality.” **Forest Products Journal**, Madison, v. 9, n. 11, p. 413-416, 1959.

LOBÃO, M. S. et al. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, v.28, n.6, p.889-894, 2004.

LONGUE, D. J.; COLODETTE, J. L. **Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Pesquisa Florestal Brasileira, 2013.

LOGSDON, N. B. **Estabilidade dimensional: Propostas para revisão da NBR 7190/97**. In.: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2002, Uberlândia. Anais. Uberlândia: UFU, 2002. 1 CD-ROM.

LOGSDON, N. B. **Sobre os ensaios de retrações e inchamentos**. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, vol. 1, n. 2, p. 19-24, 2000.

MANFRINATO, Maria Eduarda. **Estudo Sobre o Uso da Madeira para Fins Estruturais e Arquitetônicos**. Monografia (Graduação) - Departamento de Construção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

MARTINS, C. M. B. O uso da madeira na mineração e metalurgia do ouro durante a época romana em Portugal. **Estudo do Quaternário**. América do Norte, 2017. Disponível em: <<http://www.apeq.pt/ojs/index.php/apeq/article/view/242>>. Acesso em: 13 Out. 2019.

MEIRELLES, C. R.; PALA, A. **Apostila Processo Construtivo em Madeira**. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2010.

MELLADO, E. C. E. R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de *Pinus***. 2007. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2007.

MORAES, P. D. Aderência à Madeira de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono sob Temperaturas Elevadas. **Floresta e Ambiente**. Santa Catarina, 19 (2), 236-242, abr./jun. 2012.

MORESCHI, J.C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Setor de Ciências Agrárias/UFPR, 2010. 176 p.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1998. 429 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PAIVA, J.C. **Madeiras (2012)**. Disponível em:<<http://ww1.jcpaiva.net/files/ensino/alunos/20022003/teses/020370017/madeiras/madeiras.htm>>. Consultado em 18 de maio de 2019.

PANSHIN, A.J.; ZEEUW, C. **Textbook of woodtechnology**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1970. v.1 705p.

PAULA, M.H. et al. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada de madeira cumaru (*Dipteryx odorata*). **Biodiversidade**, v.15, n.2, p.149, 2016.

PEREIRA, R. A. et al. **Velocimetria por imagens de partículas aplicadas ao estudo de deformações em madeira serrada e painéis de madeira**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

PFIEL, W.; PFIEL, M. **Estruturas de madeira**. Sexta edição, 224 p., 2003.

RAFFEL, M. et al. **Physical and technical background**. Berlim, Springer, 2007.77, p.

RIBEIRO, P. G. **Utilização de Técnicas Não Destrutivas para Caracterização de Madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis***. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 160 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais / Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, Marcos Roberto R. da. **Construções Sustentáveis: Método Construtivo em Wood Frame para Unidades Residenciais**. 72 f. Monografia (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil – Universidade do Sul de Santa Catarina de Palhoça, 2017.

SORIANO, J.; MASCIA, N. T. Estruturas mistas em madeira-concreto: uma técnica racional para pontes de estradas vicinais. **Ciência Rural**, v. 39, nº 4. Santa Maria, 2009.

STANGERLIN, D. M. et al. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 44-53, 2010.

STANGERLIN, D. M. et al. Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não-destrutivo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 2, p. 145-150, 2008.

STEIN, F. R. **Avaliação técnica do tempo de estocagem da madeira**. 2003. 36p. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 291-299, 2005.

TRAMONTINA, J et al. Propriedades de flexão estática da madeira úmida a 12% de umidade da espécie *Ateleia glazioviana* BAILL. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.9, n.16, p. 1833-1839, 2013.

ZENID, José Geraldo. Madeira: uso sustentável na construção civil. 2 ed. São Paulo, SP: **Instituto de Pesquisa Tecnológica**: SVMA, 2009.

SEGUNDA PARTE – 1º ARTIGO

**TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS PARA
VERIFICAÇÃO DO EFEITO DA RETRATIBILIDADE EM MADEIRAS DE *Pinus
elliottii***

RESUMO

A madeira é um material muito utilizado na construção civil, por possuir propriedades físico-mecânicas de relevância frente a outros tipos de materiais. Para a caracterização destas propriedades da madeira, há diferentes metodologias, porém, a maioria apresenta limitações tais como o custo dos equipamentos e dos ensaios, além de causarem danos permanentes aos corpos de prova. As técnicas não destrutivas de ensaio são alternativas para caracterização das propriedades da madeira, pois são técnicas mais rápidas, de custo normalmente inferior ao de técnicas destrutivas, e principalmente não destroem o material para análise. Neste contexto, utilizou-se neste trabalho a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV), que é uma técnica inovadora com grande poder de aplicabilidade nos mais diversos campos da ciência. O objetivo neste trabalho foi analisar o efeito da retratibilidade em madeira de *Pinus elliottii* utilizando a técnica PIV, como ferramenta de medição. A técnica PIV mede variações de posição de uma região de análise em um objeto a partir de imagens, capturadas em instantes de tempo pré-definidos, de uma sessão de ensaio físico ou mecânico. Os valores médios de deslocamento obtidos na superfície dos corpos de prova a partir da técnica PIV, foram, de 2,28% para a direção radial e de 0,20% para a direção longitudinal das fibras, para o paquímetro estes valores foram de 2,18% para a direção radial e 0,21% para a longitudinal. Já a redução de área média dos corpos de prova foi de 3,85% para a Técnica PIV e 3,77% para a metodologia convencional. Concluiu-se que a técnica PIV foi capaz de medir com precisão os deslocamentos sofridos na superfície dos corpos de prova de *Pinus elliottii*, resultando em valores iguais, estatisticamente, aos alcançados através da utilização do método de medição convencional, demonstrando a sua confiabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Técnicas não Destrutivas; Propriedades Físicas; Secagem.

ABSTRACT

Wood is a material widely used in construction, as it has relevant physical and mechanical properties compared to other types of materials. For the characterization of these wood properties, there are different methodologies, however, most have limitations such as the cost of equipment and testing, besides causing permanent damage to the specimens. Non-destructive testing techniques are alternatives for characterizing wood properties, as they are faster techniques, usually cost less than destructive techniques, and mainly do not destroy the material for analysis. In this context, we used the particle image velocimetry (PIV) technique, which is an innovative technique with great applicability in the most diverse fields of science. The objective of this work was to analyze the effect of *Pinus elliottii* wood retractability using the PIV technique as a measuring tool. The PIV technique measures position variations of an analysis region on an object from images captured at predefined time points from a physical or mechanical test session. The mean displacement values obtained on the surface of the specimens using the PIV technique were 2.28% for the radial direction and 0.20% for the longitudinal direction of the fibers. For the caliper these values were 2.18% for the radial direction and 0.21% for the longitudinal. The mean area reduction of the specimens was 3.85% for the PIV technique and 3.77% for the conventional methodology. It was concluded that the PIV technique was able to accurately measure the displacements suffered on the surface of *Pinus elliottii* specimens, resulting in statistically equal values to those achieved using the conventional measurement method, demonstrating its reliability.

KEYWORDS: Non-destructive techniques; Physical properties; Drying.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material tradicional na construção civil, estando presente em diferentes etapas da construção, desde a fundação até o acabamento. Por ser um material natural e renovável, a madeira torna-se interessante em relação às preocupações ambientais e economia de energia, visto que para seu processamento e obtenção exige baixo consumo energético quando comparada a outros materiais como aço e concreto.

O avanço tecnológico no campo da ciência dos materiais proporciona um embasamento teórico e legal qualificando a duração, o comportamento e principalmente a segurança associada às estruturas de madeira.

Uma das propriedades mais importantes para caracterização da madeira é a retratibilidade. Uma propriedade inerente à madeira pelo fato desse material ser higroscópico, ou seja, por possuir grande afinidade com a água e sofrer alterações em suas dimensões a partir da variação de sua umidade. Esse fenômeno ocorre devido à adsorção ou a dessorção da água para atingir equilíbrio higroscópico com o meio em que se encontra. Praticamente toda a alteração dimensional da madeira ocorre entre a umidade de saturação do ar e 0% de umidade (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Para mensuração das propriedades dos materiais sólidos, as técnicas de ensaio preconizadas pela normatização vigente são mais utilizadas, entretanto, tais métodos possuem algumas características passíveis de evolução como, a alta demanda de tempo para o processamento e equipamentos específicos e, geralmente, caros.

As técnicas não destrutivas de ensaio (END's) são, neste contexto, alternativas para caracterização dos materiais, pois, na maioria das vezes, não causam danos permanentes aos corpos de prova, nem demandam equipamentos de alto custo para serem implementados. Os END's mais utilizados atualmente são, dentre outros, o ultrassom, a análise de vibrações, micro-ondas, emissão acústica e técnicas óticas, destacando-se neste contexto, a Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) (PEREIRA et al., 2017).

A técnica PIV mede campos vetoriais de velocidades instantâneas através da captura de imagens. Estas imagens são processadas em um algoritmo computacional que calcula os deslocamentos ocorridos na superfície do objeto estudado. Esta técnica foi originalmente desenvolvida no campo dos fluidos e gases, mas, alguns autores têm estudado sua aplicação para materiais sólidos (BRAGA JÚNIOR et al., 2015; MAGALHÃES; BRAGA; BARBOSA, 2015; PEREIRA et al., 2017; SOUZA et al.,

2014), por ser uma técnica capaz de mensurar deformações em situações em que ocorre variação entre a posição final e inicial do objeto, e para obtenção das propriedades mecânicas.

Objetivou-se neste trabalho, avaliar o efeito da retratibilidade em madeira de *Pinus elliottii*, utilizando como forma de medição dos deslocamentos, a técnica PIV.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Secagem e monitoramento

Para a realização deste trabalho, foram utilizados 3 corpos de prova de *Pinus elliottii* com dimensões de 10cmx10cmx1,85cm (comprimento x altura x espessura). Os corpos de prova foram submersos em água até a sua completa saturação, e após isso, foram determinadas suas massas, e conferidas suas dimensões.

Em seguida os corpos de prova foram submetidos à secagem natural. Durante a secagem foi realizado o monitoramento da dimensão dos corpos de prova por meio de fotografias, retiradas em câmera profissional posicionada de forma fixa em um gabarito e foram medidas as dimensões com o auxílio do paquímetro digital. Aferiu-se a massa dos corpos de prova em cada etapa da secagem para controle da umidade.

As imagens e as medidas foram tomadas até o momento em que a massa dos corpos de prova se manteve constante, significando que a madeira atingiu o ponto de equilíbrio de umidade com o ambiente (umidade aproximada de 12%).

Após atingir o equilíbrio, os corpos de prova foram colocados em uma estufa durante 24 horas para atingir a umidade de 0%. Em seguida foi capturada a última imagem, e aferiram-se os valores das massas secas (valor com o qual foi possível a obtenção da umidade dos corpos de prova) e suas dimensões.

2.2 Estimativa das dimensões com a técnica PIV e o paquímetro

Para a execução da técnica PIV, os corpos de prova tiveram sua superfície marcada com pontos distribuídos aleatoriamente. Para obtenção das imagens foi utilizada uma câmera profissional, alocada perpendicularmente à superfície da amostra, em um aparato previamente montado (Figura 1).

Figura 1: Vista geral da do aparato montado para realização do ensaio, da câmera profissional utilizada, e de um dos corpos de prova utilizado.



Fonte: Dos autores.

Para aferir as dimensões dos corpos de prova foram feitas, com o auxílio de uma régua, 20 retas verticais e 20 retas horizontais nos corpos de prova, com distância de 1cm entre elas (Figura 2). As medições com o paquímetro digital foram feitas sempre nas bordas dos corpos de prova, aferindo-se o valor da dimensão a cada metade do intervalo entre estas retas, totalizando 40 medidas em cada direção. Com isso, obteve-se aquisição de mais dados e melhor acompanhamento das deformações em toda superfície dos corpos de prova. Cada etapa teve um intervalo de 24 horas, sendo um total de 5 etapas.

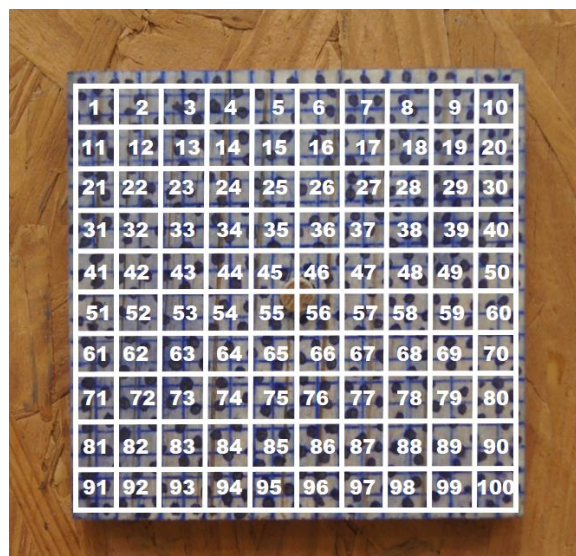
Figura 2: Traçado das retas horizontais e verticais nos corpos de prova.



Fonte: Dos autores.

A cada etapa, após a captura, as imagens foram processadas para redução de seu tamanho de armazenamento no *software Image J*, o que auxilia para um menor tempo de processamento das imagens no algoritmo PIV. Posteriormente as fotografias foram processadas no algoritmo computacional “PIV-Make”, no qual calculou-se os deslocamentos, em *pixels* (posteriormente convertido para centímetros), das janelas de interrogação previamente definidas em toda superfície do corpo de prova (Figura 3).

Figura 3: Representação das janelas de interrogação escolhidas na superfície dos corpos de prova ensaiados, em ordem crescente de numeração.



Fonte: Dos autores.

2.3 Software computacional de desenho

Com os valores de deslocamentos aferidos, fez-se uma representação gráfica utilizando-se um *software* computacional de desenho, de todas as etapas do processo. Fez-se a representação separadamente (PIV e paquímetro). Calculou-se o valor das áreas correspondentes a cada corpo de prova e de posse de tais valores realizou-se o cálculo da redução de área a cada dia de ensaio (Equação 1). Foram representadas imagens que englobassem todas as etapas e sua respectiva perda de área, tanto para a técnica PIV, quanto para o método preconizado pela norma NBR7190.

$$RA = \frac{Ai - Ad}{Ai} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

RA = Redução de Área (%).

Ad = Área do corpo de prova no dia analisado (cm²);

Ai = Área do corpo de prova no primeiro dia de ensaio (cm²).

2.4 Análise dos dados

Os dados obtidos foram processados e analisados com a utilização dos testes estatísticos “T de *Student*” e regressão linear, para comparação dos valores médios de retratibilidade obtidos pela técnica PIV e medição com paquímetro. Com o auxílio da ferramenta computacional de desenho, os corpos de prova foram representados com suas dimensões médias após cada dia de secagem. Foi possível também obter a redução da área das madeiras em cada período de análise.

Essa redução da área, obtida pelas duas técnicas, foi correlacionada com a umidade (obtida pelas medidas de massa dos corpos de prova a cada dia de ensaio) da madeira, por meio de uma regressão linear.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de umidade dos corpos de prova nas etapas de secagem, bem como as dimensões no sentido longitudinal e radial, obtidas por medição (paquímetro) e estimadas pelo PIV, encontram-se na Tabela 1. Observa-se que todos os corpos de prova se encontravam acima do ponto de saturação das fibras ($\cong 30\%$) no dia 1 e que

entre os dias 3 e 4 estabilizaram a umidade com a umidade relativa do ar ($\cong 12\%$). Na última etapa os corpos de prova chegaram a 0% de umidade após a secagem em estufa.

Observa-se também que a variação dimensional é menor no sentido longitudinal das fibras e maior no sentido radial. Isso ocorre porque as fibras no sentido longitudinal possuem uma resistência maior à esta variação dimensional quando comparada ao sentido radial.

As direções de retratibilidade medidas foram apenas no sentido longitudinal e radial da peça, pela limitação das fotografias para o processamento no algoritmo PIV serem em duas dimensões.

Tabela1: Medidas de comprimento diários da direção radial e longitudinal das peças obtidas juntamente com a umidade correspondente, para cada técnica utilizada.

	CP	A	B	C
	UMIDADE (%)	89.44	61.21	61.16
DIA 1	PAQUÍMETRO DR (mm)	101.66	101.99	102.42
	PAQUÍMETRO DL (mm)	100.22	100.11	100.17
	UMIDADE (%)	50.85	35.25	32.80
DIA 2	PAQUÍMETRO DR (mm)	101.43	101.63	102.03
	PAQUÍMETRO DL (mm)	100.20	100.08	100.14
	PIV DR (mm)	100.60	101.03	101.60
	PIV DL (mm)	100.17	101.00	100.11
	UMIDADE (%)	12.45	12.81	12.98
DIA 3	PAQUÍMETRO DR (mm)	100.18	99.67	100.12
	PAQUÍMETRO DL (mm)	100.13	100.06	100.12
	PIV DR (mm)	100.17	99.51	100.13
	PIV DL (mm)	100.02	99.97	100.08
	UMIDADE (%)	11.60	11.91	11.99
DIA 4	PAQUÍMETRO DR (mm)	99.87	99.54	99.78
	PAQUÍMETRO DL (mm)	99.84	99.85	99.79
	PIV DR (mm)	99.92	99.14	99.54
	PIV DL (mm)	98.25	99.74	99.85
	UMIDADE (%)	0.00	0.00	0.00
DIA 5	PAQUÍMETRO DR (mm)	99.63	96.93	97.01
	PAQUÍMETRO DL (mm)	98.26	99.66	99.68
	PIV DR (mm)	99.08	97.30	98.10
	PIV DL (mm)	98.14	99.57	99.54

CP = corpo de prova; DR = direção radial; DL = direção longitudinal.

Fonte: Dos autores.

Podem ser observados a partir da Tabela 2 os resultados da análise estatística descritiva para os valores de deslocamento médio total dos três corpos de prova obtidos, individualmente nas duas direções analisadas com o auxílio das linhas horizontais e verticais de referência, realizadas a partir do paquímetro e técnica PIV, em todos os corpos de prova ensaiados, e em todos os dias de realização de tal ensaio.

Tabela 2: Estatística descritiva dos valores medidos (paquímetro e técnica PIV) de reatibilidade para os corpos de prova durante a secagem, em cada direção analisada.

Variável	Média	Desvio Padrão	Variância	CV%	Mín	Máx
Paquímetro DR	2,1793	1,0821	1,1710	49,65	0,2530	5,4000
PIV DR	2,2774	1,0782	1,1626	47,34	0,3000	4,9000
Paquímetro DL	0,2064	0,1804	0,0326	87,41	0,0000	0,6400
PIV DL	0,2039	0,2045	0,0418	100,31	0,0017	0,8804

DR= direção radial; DL = direção longitudinal.

Nível de Significância – 95%.

CV = coeficiente de variação

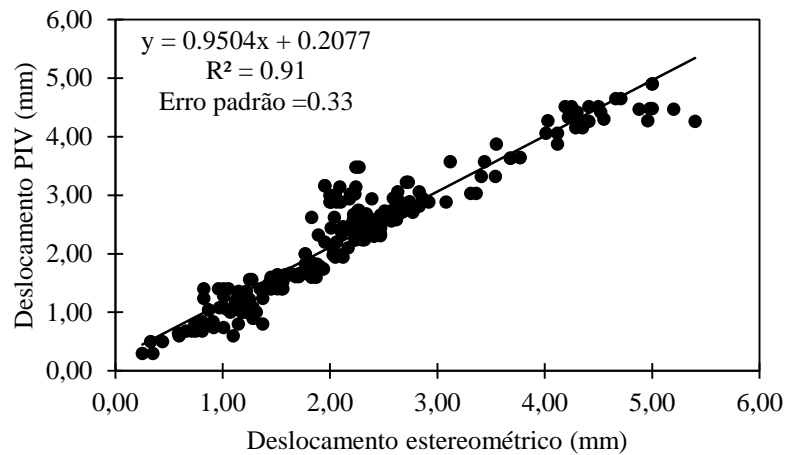
Fonte: Dos autores.

Foi realizada análise de variância (ANOVA) e teste F , constatou-se que não existe diferença estatística entre os métodos nos dois sentidos analisados, a 95% de confiança.

3.1 Análise de regressão dos métodos

A Figura 4 mostra o comportamento dos valores estimados durante a reatibilidade da madeira de Pinus em função dos valores medidos com paquímetro de todos os valores referências de todos corpos de prova.

Figura 4: Comportamento dos valores de deslocamento obtidos pela técnica PIV em função dos valores medidos com paquímetro (esteriométrico).



Fonte: Dos autores.

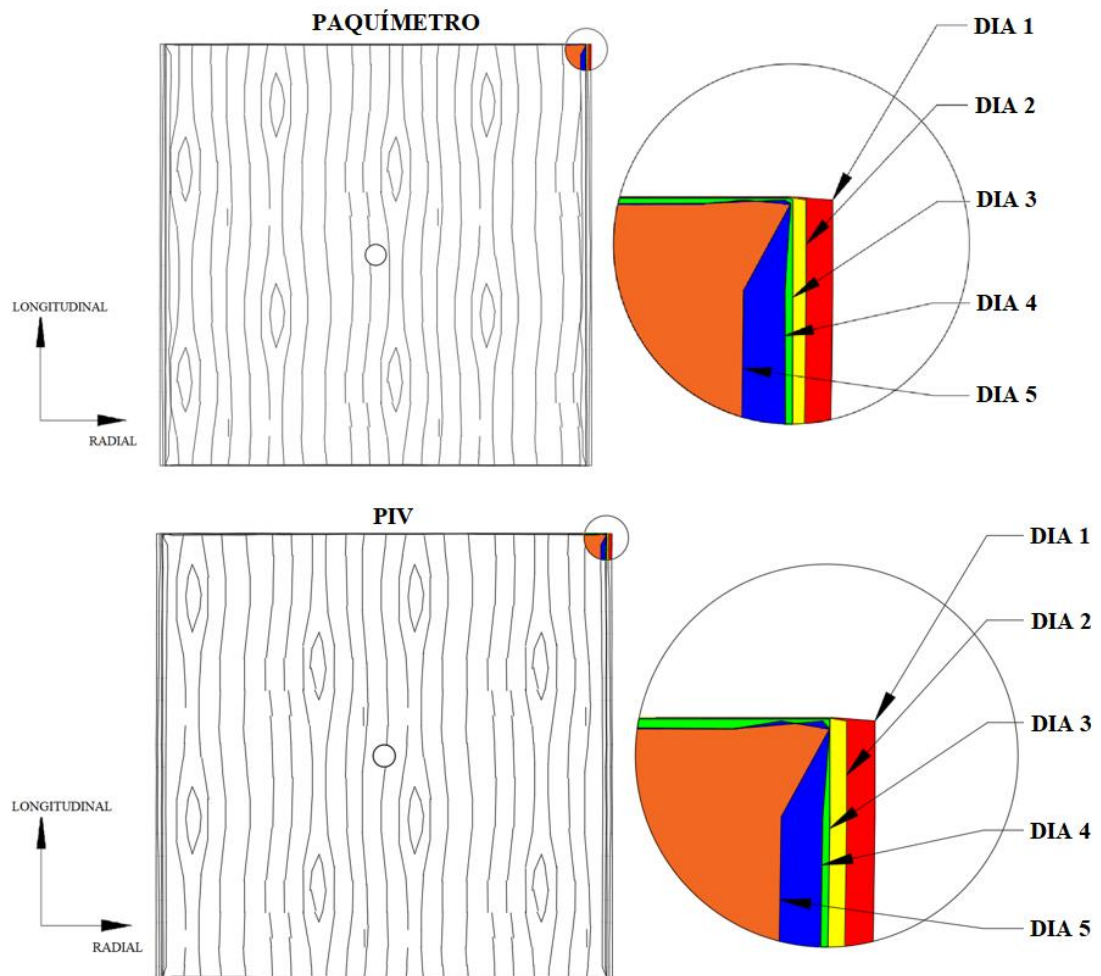
Pode ser observado o grande volume de dados, pelas diversas referências traçadas nos corpos de prova, e pelo alto número de dias do ensaio.

De acordo com o coeficiente de determinação da regressão ($R^2 = 0.91$), o modelo linear ajustado é capaz de explicar em 91% a variação total dos valores estimados pelo PIV a partir da variação medida, indicando alta associação entre os métodos, associada a um baixo erro padrão associado (33%).

3.2 Demonstração gráfica do efeito da reprodutibilidade

Além do teste entre a média dos valores, os valores de deslocamento resultantes das duas técnicas foram desenhados em um *software* gráfico, afim de se alcançar a porcentagem de redução de área por dia de ensaio. Na Figura 5 tem-se a representação da redução de área sofrida a cada dia pelo corpo de prova C por meio de medições realizadas com o paquímetro e com a técnica PIV.

Figura 5: Demonstração gráfica da redução de área sofrida pelo corpo de prova C.



Fonte: Dos autores.

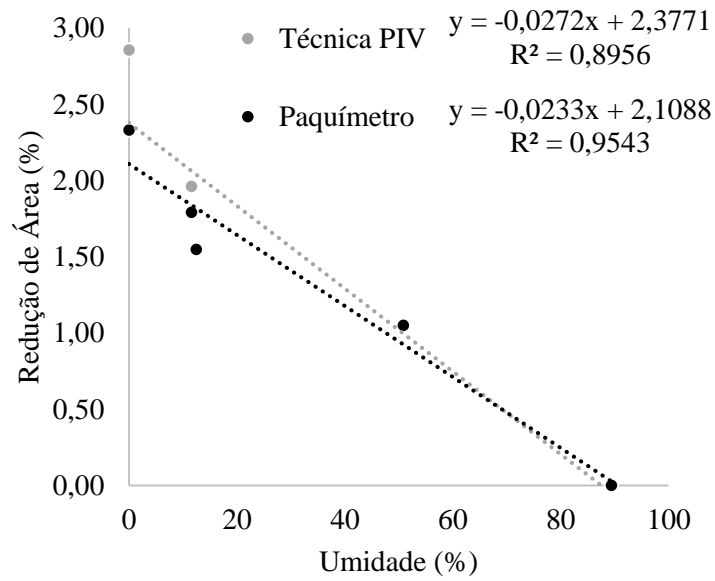
Pode ser observado que as menores reduções de área foram no sentido paralelo às fibras (sentido longitudinal da madeira), pois nestas regiões, há maiores forças contra os deslocamentos, criada pela presença das fibras da madeira.

A média das reduções de área, em porcentagem, nos três corpos de prova ensaiados, foram de: 3,85% para a técnica PIV e 3,77% para o paquímetro. Observam-se valores muito semelhantes entre um método convencional preconizado pela NBR7190 (paquímetro) e a técnica PIV.

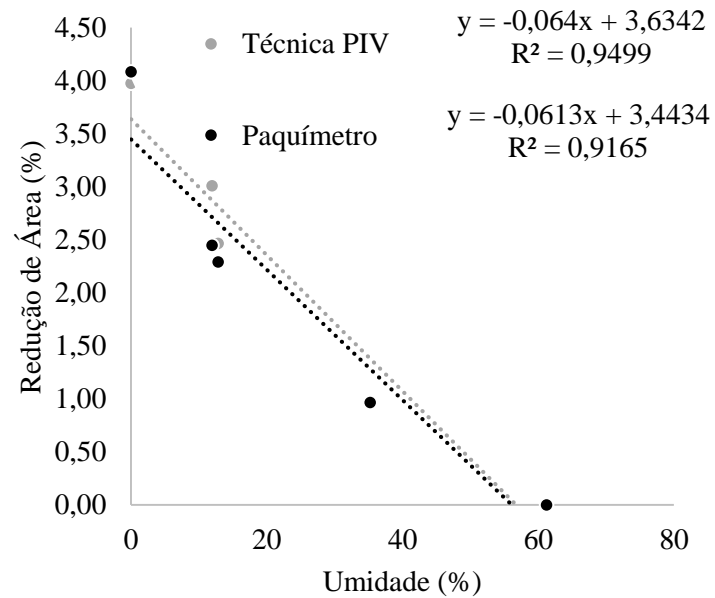
3.3 Correlação entre a umidade e redução de área durante a secagem

A partir dos valores de redução de área e de massa, e de posse da massa seca (pós estufa) dos corpos de prova, foi possível a confecção de gráficos correlacionando por meio de uma regressão linear, valores de umidade com a redução de área correspondente através das duas técnicas (Figura 6).

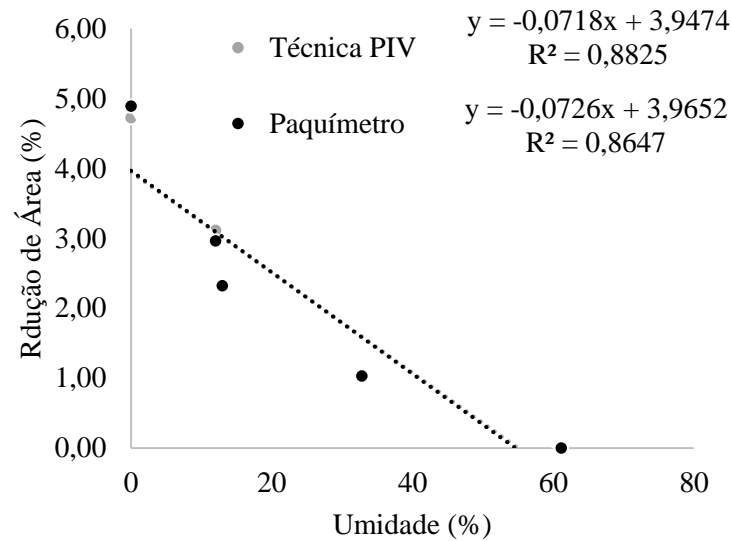
Figura 6: Correlação entre as perdas de área e a umidade correspondente, do corpo de prova A, B e C, respectivamente.



5a



5b



5c

Fonte: Dos autores.

Em todos os corpos de prova, os gráficos de correlação entre as reduções de área entre as técnicas e a umidade obtiveram comportamentos semelhantes, com altos valores de correlação linear; além disso, em dois corpos de prova, os valores de R^2 da técnica PIV correlacionada com a umidade foram superiores aos respectivos valores de R^2 obtidos pela correlação dos valores aferidos pelo paquímetro frente à umidade, demonstrando, novamente, a confiabilidade da técnica PIV frente a um método convencional.

A equação média de correlação entre redução de área e umidade, portanto, foi de: $y = -0,0543x + 3,3196$, para a técnica PIV e $y = -0,0524x + 3,1724$ para o paquímetro, sendo a variável y a redução de área, e a variável x a umidade. Portanto, pode ser estimada a partir de uma certa umidade da madeira de *Pinus elliottii*, a redução de área associada a essa propriedade.

Outros pesquisadores já comprovaram a eficiência da técnica PIV frente a métodos convencionais, com relação a parâmetros físicos ou mecânicos, como, por exemplo, Guedes et al. (2019), Pereira et al. (2019) e Braga Júnior et al. (2015).

Com relação à contração da madeira de *Pinus elliottii*, alguns pesquisadores já fizeram pesquisas semelhantes às deste trabalho, como Acosta et al. (2019) e Belezia (2015) encontraram para a contração radial da madeira valores de, 3,85% e 3,57%,

pelo processo de secagem natural, utilizando como ferramenta de medição o paquímetro.

Já Fonseca (2016) e Juizo et al. (2015), que também utilizaram o mesmo método convencional de medidas, e um processo de secagem natural da madeira, encontraram valores de, respectivamente, 3,10% e 3,44%, para a direção radial da contração em madeira de *Pinus elliottii*.

Os valores médios obtidos por tais autores foram distantes dos valores médios encontrados nesta pesquisa. Tal fato se deve, principalmente, por esses autores não terem obtido medidas de contração na última etapa feita neste projeto, no qual após a secagem natural, os corpos de prova foram submetidos à secagem forçada, em estufa, até atingirem a umidade de 0%. Os autores fizeram suas últimas medidas no ponto de equilíbrio com o meio ambiente, o que pode justificar os diferentes resultados obtidos nesta pesquisa.

4. CONCLUSÃO

Os valores médios obtidos para reprodutibilidade entre a técnica PIV e para o método convencional foram, de 2,28% e 2,18% para a direção radial e de 0,20% e 0,21%, para a direção longitudinal das fibras. Tais resultados são iguais, estatisticamente, segundo o Teste F e pela análise de variância (ANOVA), a 95% de confiança, e obtiveram um coeficiente de determinação linear superior à 90%.

Além disso, na correlação entre os valores de perda percentual de área e os valores de umidade, as equações de regressão linear resultantes obtiveram valores semelhantes para as duas técnicas, com a correlação entre os valores obtidos pela técnica PIV e a umidade tendo inclusive superado o valor do coeficiente de determinação da correlação entre os números do paquímetro frente à umidade em dois, dos três corpos de prova ensaiados. A equação de correlação média foi de: “ $y = -0,0543x + 3,3196$ ”, para a técnica PIV e “ $y = -0,0524x + 3,1724$ ” para o método normativo.

A técnica PIV mostrou-se capaz de caracterizar os materiais presente neste estudo com precisão, demonstrando que tal técnica tem resultados compatíveis frente à métodos convencionalmente utilizados.

REFERÊNCIAS

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

ACOSTA, A. P. et al. Compósitos polímero-madeira preparados por polimerização in situ com mma em propriedades físicas de *Pinus elliottii*. **Biofix Scientific Journal**, v.5, n.1, 2019.

BELEZIA, C. M. **Efeito da retificação térmica nas características e propriedades físicas de madeira Pinus elliottii**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Itapeva, 2015.

BRAGA JÚNIOR, R. A. et al. Maps of deformations in a cantilever beam using particle image velocimetry (PIV) and speckle patterns. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 68, n. 3, p. 273-278, 2015.

FONSECA, M. N. **Análise do processo de lixamento na madeira de pinus elliottii e eucaliptus saligna**. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Itapeva, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/144593>>.

GALVAO, A P M; JANKOWSKY, I P. **Secagem racional da madeira**. [S.l.: s.n.], 1985.

GUEDES, T. A. et al. Particle image velocimetry for obtaining the young's modulus in woods. **CERNE**, [S.l.], v. 25, n. 2, p. 240-245, Julho 2019. ISSN 2317-6342. Disponível em: <<http://www.cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/2115>>. Acessado em: 02 oct. 2019.

JUIZO, C. et al. (2015). Variação radial das propriedades físicas da madeira de Pinus patula plantados em Moçambique. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n.83, 2015.

MAGALHAES, R. R.; BRAGA, R. A.; BARBOSA, B. H. G. Young ' s Modulus evaluation using Particle Image Velocimetry and Finite Element Inverse Analysis. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 70, p. 33-37, 2015.

PEREIRA, R. A. et al. **Velocimetria por imagens de partículas aplicadas ao estudo de deformações em madeira serrada e painéis de madeira**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

PEREIRA, R. A. et al. Displacement measurement in sawn wood and wood panels beams using the particle image velocimetry. **CERNE**, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 110-118, abr. 2019. ISSN 2317-6342. Disponível em: <<http://www.cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/2032>>. Acessado em: 02 oct. 2019.

SOUZA, T. M. et al. Non-destructive technology associating PIV and Sunset laser to create wood deformation maps and predict failure. **Biosystems Engineering**, London, v. 126, p. 109-116, 2014.

SEGUNDA PARTE – 2º ARTIGO

**TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) E
MÉTODO DO ULTRASSOM PARA OBTENÇÃO DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE DE MADEIRA DE *Bertholletia excelsa***

RESUMO

A madeira é um material que apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas vantajosas frente a outros materiais utilizados na construção civil. Uma das formas mais usuais de caracterização da madeira é pela propriedade mecânica do módulo de elasticidade, um valor que mensura a rigidez dos materiais sólidos. Diversas metodologias convencionais são capazes de mensurar as propriedades dos materiais, como o módulo de elasticidade, no entanto, a maioria destas técnicas apresenta limitações tais como o custo dos equipamentos e dos ensaios, além de causarem danos permanentes aos corpos de prova. As técnicas não destrutivas de ensaio são alternativas quanto a tais restrições, destacando-se, neste contexto, a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) e o método do ultrassom. O objetivo neste trabalho foi determinar o módulo de elasticidade da madeira de *Bertholletia excelsa* utilizando a técnica PIV e o método do ultrassom e comparar os resultados com a metodologia convencional. A técnica PIV é um ensaio não-destrutivo, utilizada nesta pesquisa através da medição variações de posição de uma região de análise em um objeto a partir de imagens, capturadas no intervalo de 30 segundos, antes e depois de uma sessão de carregamento de ensaio mecânico. Já o método do ultrassom é embasado nos princípios da propagação de ondas sonoras para o cálculo do módulo de elasticidade. Os valores médios de módulo de elasticidade encontrados foram de 17.403MPa para o ultrassom, 15.589MPa para a técnica PIV e 15.333MPa para a máquina universal de ensaios. A técnica PIV obteve resultados iguais, estatisticamente, aos encontrados pela metodologia convencional e com o método do ultrassom. Obteve-se um coeficiente de determinação linear médio de 60% em relação ao conjunto de dados obtido pelo método convencional de ensaios e pela técnica PIV. Já o método de ultrassom diferiu das outras duas metodologias por apresentar uma forma mais complexa de aquisição de dados. Concluiu-se que a técnica PIV e o método do ultrassom são ferramentas de caracterização do módulo de elasticidade confiáveis e precisas.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedade mecânica; Método convencional; Técnicas Não Destrutivas.

ABSTRACT

Wood is a material that has some advantageous physical and mechanical properties over other materials used in construction. One of the most common forms of wood characterization is the mechanical property of the modulus of elasticity, a value that measures the stiffness of solid materials. Several conventional methodologies are able to measure the properties of materials, such as the modulus of elasticity, however, most of these techniques have limitations such as the cost of equipment and testing, and cause permanent damage to specimens. Non-destructive testing techniques are alternatives to such restrictions, in particular, the particle image velocimetry (PIV) technique and the ultrasound method. The objective of this work was to determine the modulus of elasticity of *Bertholletia excelsa* wood using the PIV technique and the ultrasound method and to compare the results with the conventional methodology. The PIV technique is a non-destructive assay, used in this research by measuring position variations of an analysis region on an object from images captured within 30 seconds before and after a mechanical test loading session. The ultrasound method is based on the principles of sound wave propagation to calculate the modulus of elasticity. The average modulus of elasticity found were 17,403MPa for ultrasound, 15,589MPa for the PIV technique and 15,333MPa for the universal testing machine. The PIV technique obtained statistically the same results as those found by the conventional methodology and the ultrasound method. An average linear coefficient of determination of 60% was obtained in relation to the data set obtained by the conventional test method and the PIV technique. The ultrasound method differed from the other two methodologies in that it presents a more complex form of data acquisition. It was concluded that the PIV technique and the ultrasound method are reliable and accurate elasticity modulus characterization tools.

KEYWORDS: Mechanical property; Conventional method; Non Destructive Techniques.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material produzido a partir do tecido formado pelas plantas lenhosas com funções de sustentação mecânica. É um material orgânico, sólido, de composição complexa, com predominância química de fibras de celulose e hemicelulose. É um material de alta resistência e relativamente leve, comumente utilizado na construção (PAIVA, 2012).

Uma das formas de caracterização das propriedades deste material é através da determinação do módulo de elasticidade, uma medida da rigidez de um material sólido. Tal parâmetro é fundamental para a engenharia, pois está associado com a descrição de várias outras propriedades mecânicas (PAIVA, 2012).

As técnicas convencionais de ensaio utilizadas atualmente para análise das propriedades físicas e mecânicas dos materiais, como módulo de elasticidade, geralmente demandam alto tempo de processamento, necessitam de equipamentos específicos, grande número de amostras, e causam danos permanentes ao material ensaiado, tornando-os inutilizáveis.

As técnicas não destrutivas de ensaio (END's) são uma opção para a determinação das propriedades dos materiais, pois são técnicas que não destroem o material, e normalmente possuem menor tempo de aplicação e custo quando comparado à ensaios destrutivos. Dentro das técnicas não destrutivas de ensaio, destacam-se as técnicas de Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) e o método convencional com utilização do ultrassom, por serem ensaios relativamente simples, rápidos e de baixo custo.

A técnica PIV funciona por meio da análise de imagens capturadas em corpos de prova marcados com pontos aleatórios, com carimbo ou lápis, em intervalos de tempo pré-definidos, através de aparatos pré-montados e fixos. Estas imagens são processadas em um algoritmo computacional que calcula os deslocamentos ocorridos na superfície do objeto estudado, através das deformações de janelas de interrogação (regiões pré-definidas para cálculo dos deslocamentos superficiais nos corpos de prova).

Já o ultrassom consiste na utilização do eco criado por ondas de alta frequência para detecção interna de defeitos em materiais ou para a medição de espessura de paredes, detecção de corrosão, e, atualmente, também é utilizado para correlacionar parâmetros mecânicos. As variações na velocidade de propagação das ondas emitidas

pelo ultrassom ocorrem pela presença de anomalias, tais como decomposição, vazios e umidade no interior das peças. (SANTOS, 2017).

O objetivo neste trabalho foi a determinação do módulo de elasticidade de *Bertholletia excelsa*, utilizando-se, como ferramenta de medição as técnicas não destrutivas - técnica PIV e método do ultrassom – e um método convencional.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Preparo do material

Foi utilizada a madeira de *Bertholletia excelsa* obtida de plantio experimental na Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foram confeccionados corpos de prova para ensaio de compressão paralela às fibras segundo a norma NBR 7190 (15 cm x 5 cm x 5 cm).

2.2 Ensaio de ultrassom

O ensaio foi realizado com o equipamento ultrassom que mede a velocidade de propagação da onda sonora no sentido longitudinal do corpo de prova. Com essa informação é calculado o módulo de elasticidade (Equação 1).

$$E_i = V^2 \times \rho \quad (1)$$

Em que:

E_i = módulo de elasticidade;

V = velocidade de propagação da onda ($m.s^{-1}$);

ρ = densidade aparente ($g.cm^3$)

Os corpos de prova foram conectados aos transdutores e foi feita a aferição da velocidade (Figura 1).

Figura 1: Ensaio com o Equipamento de Ultrassom (Ultrasonic-Teste BP-7).



Fonte: Dos autores.

2.3 Compressão paralela às fibras na máquina universal

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão estática, em Máquina Universal de Ensaio com capacidade de 30 toneladas-força. Obteve-se os valores de módulo de elasticidade através da captura de fotos em intervalos de 30 segundos, com velocidade de 1 mm/min (ensaio adaptado NBR 7190) até que os corpos de prova atingissem o ponto de ruptura, finalizando-se o ensaio.

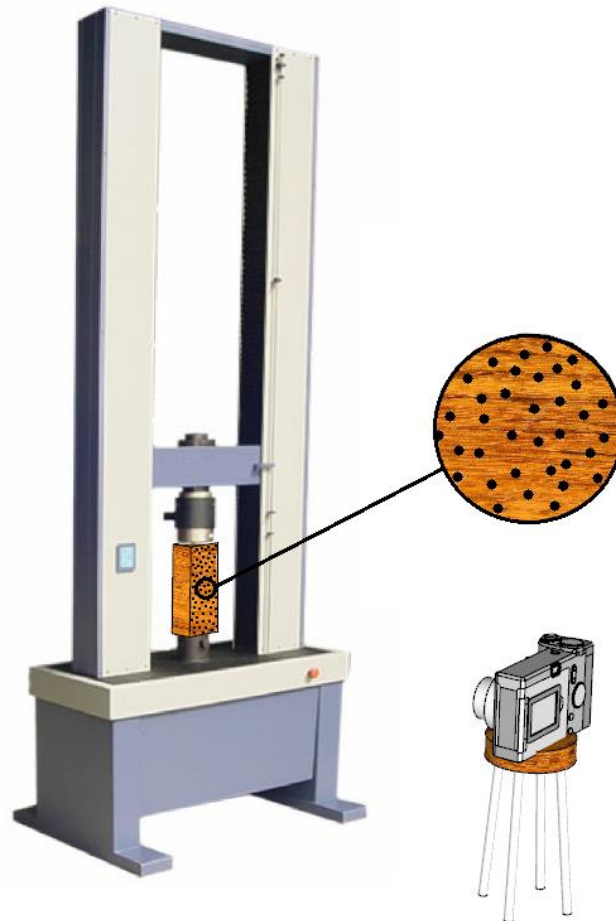
2.4 Estimativa do módulo de elasticidade pela técnica PIV

Aplicou-se a técnica PIV para medição da deformação ocorrida nos corpos de prova durante os ensaios de compressão. Com os valores de deformação, carga aplicada e características geométricas da seção transversal foi possível a obtenção do módulo de elasticidade dos corpos de prova ensaiados. Para a execução da técnica PIV, os corpos de prova foram marcados com tinta, sendo os pontos de marcação distribuídos aleatoriamente por toda sua superfície.

A aplicação da técnica PIV consiste em capturar imagens consecutivas durante a sessão de carregamento. Para obtenção das imagens foi utilizada uma câmera profissional, alocada perpendicularmente à superfície da amostra à, aproximadamente, 25 cm de distância (Figura 2). Iniciou-se o procedimento com a captura da imagem no instante 0 segundos, e, posteriormente, fez-se a captura em intervalos de 30 segundos,

após o acionamento da Máquina Universal de Ensaios, até a ruptura dos corpos de prova.

Figura 2: Ensaio preconizado pela NBR7190 (Máquina Universal de Ensaios) e técnica PIV.



Fonte: Dos autores.

Após a captura, as imagens foram processadas para redução de seu tamanho de armazenamento, que auxilia no tempo de processamento das imagens no algoritmo PIV.

2.5 Análise dos dados

Mensurados os valores obtidos pelas técnicas analisadas (PIV, Máquina Universal e Ultrassom), plotou-se gráficos “Carga x Deformação” para cada corpo de prova, possibilitando assim a determinação do módulo de elasticidade pela técnica PIV e pela

máquina universal, através da equação da NBR 7190 (Equação 2). Os valores de força foram obtidos de 30 em 30 segundos. Fez-se a comparação dos resultados obtidos.

$$MOE = \frac{(\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%})}{(\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%})} \quad (2)$$

Em que:

MOE = Módulo de Elasticidade;

σ = Tensão;

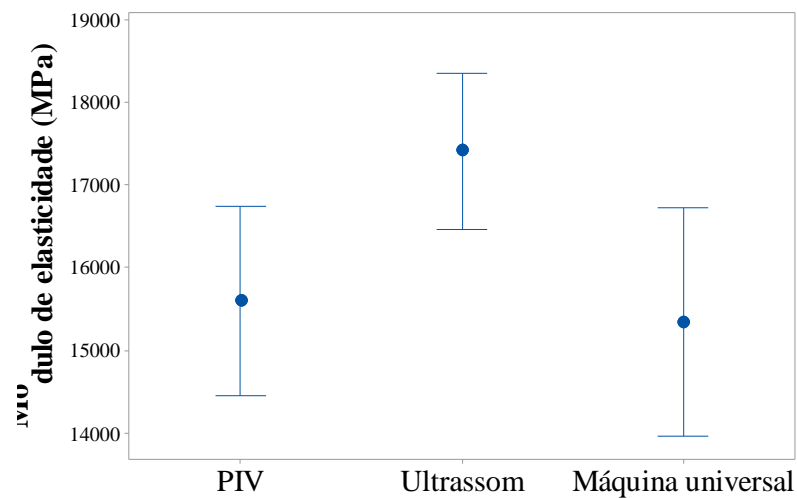
ε = Deformação.

Aplicou-se uma análise estatística por meio do teste Tukey para um nível de significância de 95% ($\alpha = 0,05$), para comparação das médias dos módulos de elasticidade obtidos pela técnica PIV, pela técnica convencional e pelo método do ultrassom.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos ensaios, obteve-se os resultados de módulo de elasticidade por meio de cada técnica utilizada (PIV, ultrassom e método normativo). Os valores encontrados para o módulo de elasticidade podem ser observados na Figura 3.

Figura 3: Intervalos de valores de módulo de elasticidade de *Bertholletia excelsa* para cada uma das três técnicas utilizadas.



Fonte: Dos autores.

Pode ser observado que as três técnicas obtiveram variações de amplitude de resultados semelhantes, sendo o intervalo encontrado entre a técnica PIV e a máquina universal de ensaios mais próximo. Os valores médios de módulo de elasticidade encontrados foram de 17403MPa para o ultrassom, 15589MPa para a técnica PIV e 15333MPa para a máquina universal de ensaios.

Com os valores de módulo de elasticidade, foi possível a realização de um teste estatístico (Teste de Tukey com $\alpha=0,05$) entre os valores médios de módulo de elasticidade encontrados pelas três técnicas (Tabela 1).

Tabela 1: Estatísticas descritiva Módulo de elasticidade (MPa) madeira de *Bertholletia excelsa*.

Métodos	Média	Desvio Padrão	CV%	Mínimo	Máximo
Ultrassom	17403 a	1910	10,97	15002	21675
PIV	15589 ab	2297	14,73	12479	20864
Máquina universal	15333 b	2783	18,15	11229	20853

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

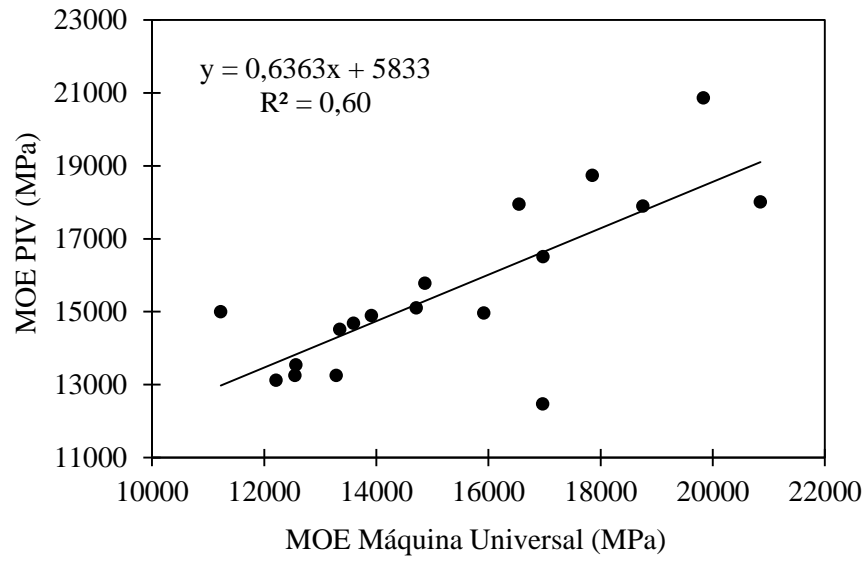
CV – Coeficiente de Variação.

Fonte: Dos autores.

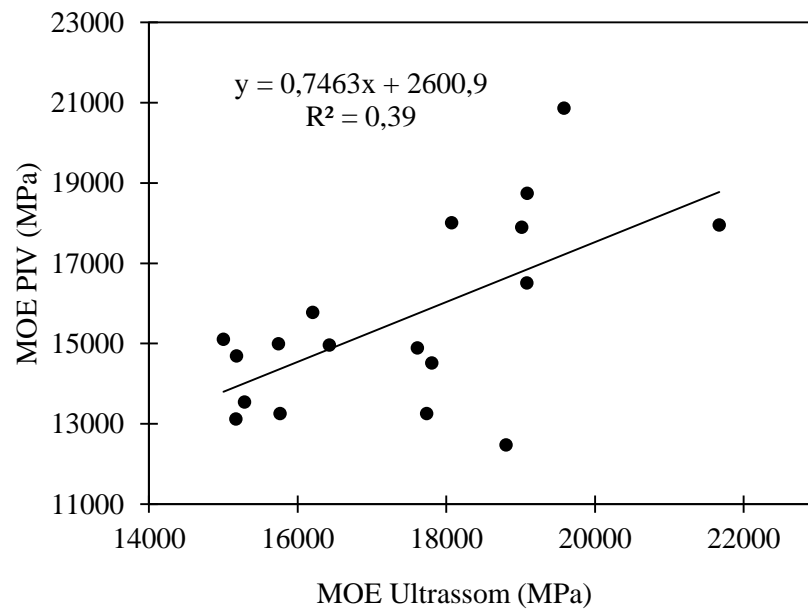
Sabendo-se que a representação resultante de duas letras semelhantes tem o significado da igualdade entre médias, conclui-se que a técnica PIV, pelo teste de Tukey, teve resultados médios iguais aos métodos do ultrassom e ao método convencional através do uso da máquina universal (sendo a comparação entre a médias destes dois últimos métodos diferentes), demonstrando a eficácia da técnica PIV frente à um método convencional e um método, semelhantemente, não destrutivo.

Outro teste estatístico realizado para comparação dos valores entre as técnicas, foi a regressão linear (Figura 4).

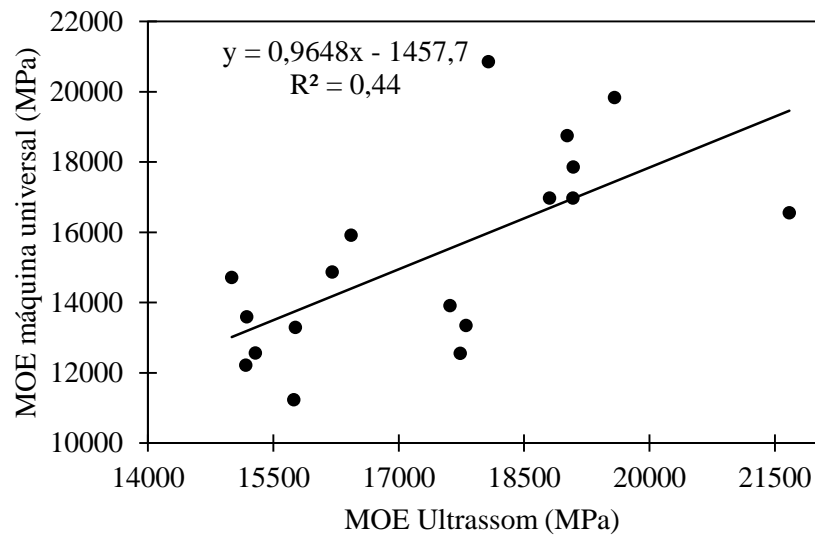
Figura 4: Regressão linear entre os valores de Módulo de elasticidade (MOE) madeira de *Bertholletia excelsa* obtidos pelas três técnicas de ensaio.



4a



4b



4c

MOE = Módulo de Elasticidade

Fonte: Dos autores.

O coeficiente de determinação entre a técnica PIV e a máquina universal foi de 0,60, valor mediano, visto que, a anisotropia da madeira leva a uma grande variação de resultados. Já o coeficiente de determinação entre a técnica PIV e o ultrassom, e entre a máquina universal e o ultrassom, foram de, respectivamente, 0,39 e 0,44, valores baixos, o qual podem ser justificados, principalmente, pelo fato do ultrassom apresentar o método de obtenção de dados por ondas por alta frequência, demonstrando ser uma técnica mais suscetível à erros do que as outras duas técnicas utilizadas (Alves, 2017).

Outros pesquisadores já comprovaram a eficiência da técnica PIV com relação a parâmetros físicos ou mecânicos, como, por exemplo, Guedes et al. (2019), que determinaram o módulo de elasticidade de corpos de prova de madeira de *Cedrela spp.* e *Eucalyptus cloeziana* submetidos à flexão estática a partir da técnica PIV e obtiveram valores semelhantes aos obtidos com a aplicação da máquina universal.

Pereira et al. (2019), também avaliaram o uso da técnica PIV para aferição de deformações de corpos sólidos em painéis de madeira de *Pinus oocarpa*, *Eucalyptus grandis*, compensado, madeira laminada de lâminas paralelas (LVL) e de painéis de tiras de madeira orientada (OSB) submetidos à flexão estática, e obtiveram valores iguais, estatisticamente, aos métodos convencionais.

Com relação à espécie *Bertholletia excelsa*, alguns autores obtiveram resultados semelhantes ao deste trabalho, tais como Petrechen e Ambrósio (2016) que obtiveram

valores de 18.220,36 MPa, para o módulo de elasticidade de compressão paralelo às fibras da madeira utilizando a máquina universal de ensaios, valor muito próximo ao encontrado pelo ultrassom neste trabalho.

Jesus, Longsdon e Finger (2015), porém, obtiveram números de 14.881 MPa para as propriedades de rigidez de madeira de *Bertholletia excelsa*, utilizando como método de ensaio a máquina de ensaios universal, resultado próximo ao encontrado pela Técnica PIV nesta pesquisa.

Já Alves (2017), utilizou como ferramenta de determinação do módulo de elasticidade o método ultrassônico, e obteve valores desta propriedade mecânica na direção paralela às fibras para *Bertholletia excelsa* de 16.996 MPa, valor semelhante ao encontrado por esse mesmo método neste estudo. O autor justifica em sua pesquisa, que o método do ultrassom sempre apresenta resultados superiores às das outras técnicas, pela forma mais complexa de aquisição de dados.

Outra pesquisa encontrada na literatura foi de Oliveira Filho (2015), que em seus estudos de diferentes espécies de madeira amazônicas, obteve para o módulo de elasticidade de compressão paralelo as fibras de *Bertholletia excelsa* de 15.783 MPa, valor semelhante ao encontrado pela técnica PIV.

Os valores encontrados na literatura são muito próximos aos encontrados nesta pesquisa, mostrando eficácia da técnica PIV, a qual além de ter seus valores médios iguais, estatisticamente, com o método do ultrassom e o método convencional, teve valores condizentes com a literatura já existente.

4. CONCLUSÃO

Os valores médios de módulo de elasticidade obtidos pelas três técnicas, método do ultrassom, técnica PIV e pela máquina universal, 17.403 MPa, 15.589 MPa e 15.333 MPa, respectivamente, são, estatisticamente, iguais, segundo o Teste de Tukey com $\alpha=0,05$.

Além disso, o coeficiente de determinação linear entre a técnica PIV e a metodologia convencional de ensaios foi mediano, considerando a variabilidade das propriedades mecânicas do material devido à sua anisotropia; e os valores encontrados também foram condizentes com a literatura existente.

Já os resultados obtidos pelo método do ultrassom diferiram das outras duas técnicas; tal fato é justificado pela diferença na aquisição de dados; entretanto, tais valores foram próximos à literatura, o que demonstra, também, ser um método eficaz.

Pode ser concluído que os dois métodos não destrutivos demonstraram possuir confiabilidade nos resultados, e o potencial em substituir os métodos convencionais.

REFERÊNCIAS

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

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

GUEDES, T. A. et al. Particle image velocimetry for obtaining the young's modulus in woods. **CERNE**, [S.l.], v. 25, n. 2, p. 240-245, Julho 2019. ISSN 2317-6342. Disponível em: <<http://www.cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/2115>>. Acessado em: 02 oct. 2019.

JESUS, J. M. H; LONGSDON, N. B.; FINGER, Z. Classes de Resistência de Algumas Madeiras de Mato Grosso. **Engineering and Science**, Mato Grosso, 2015.

OLIVEIRA FILHO, C. L. **Madeiras amazônicas para produção de tacos de beisebol**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.

PAIVA, J.C. **Madeiras (2012)**. Disponível em: <<http://ww1.jcpaiva.net/files/ensino/alunos/20022003/teses/020370017/madeiras/madeiras.htm>>. Consultado em 18 de maio de 2019.

PEREIRA, R. A. et al. Displacement measurement in sawn wood and wood panels beams using the particle image velocimetry. **CERNE**, [S.l.], v. 25, n. 1, p. 110-118, abr. 2019. ISSN 2317-6342. Disponível em: <<http://www.cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/2032>>. Acessado em: 02 oct. 2019.

PETRECHEN, G. P.; AMBRÓSIO J. D. **Preparação e caracterização mecânica de compósitos de polipropileno com resíduos lignocelulósicos da castanha do brasil**

(Bertholletia excelsa). In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, 2016.

SANTOS, L. Ikeda. **Ensaio não destrutivo aplicado à estrutura de madeira no museu da língua portuguesa**. Revista de Iniciação Científica, Criciúma, v. 15, n. 1, 2017 | ISSN 1678-7706.

ZENID, Geraldo José. **Madeira na construção civil**. IPT. 2010.