



RODRIGO ALLAN PEREIRA

**ANÁLISE DE ESFORÇOS DE FLEXÃO
ESTÁTICA PELO MÉTODO DE
VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE
PARTÍCULAS EM MADEIRAS DE *Pinus taeda***

LAVRAS - MG

2014

RODRIGO ALLAN PEREIRA

**ANÁLISE DE ESFORÇOS DE FLEXÃO ESTÁTICA PELO MÉTODO
DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS EM
MADEIRAS DE *Pinus taeda***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Francisco Carlos Gomes

Coorientadores

Dr. Roberto Alves Braga Júnior

Dra. Ellem Walleska Nascimento da Fonseca

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Pereira, Rodrigo Allan.

Análise de esforços de flexão estática em madeira (*Pinus Taeda*)
pelo método de velocimetria por imagem de partículas / Rodrigo
Allan Pereira. – Lavras : UFLA, 2014.

74 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Francisco Carlos Gomes.

Bibliografia.

1. Madeira. 2. Flexão estática. 3. Ensaio não-destrutivo. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.0287

RODRIGO ALLAN PEREIRA

**ANÁLISE DE ESFORÇOS DE FLEXÃO ESTÁTICA PELO MÉTODO
DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS EM
MADEIRAS DE *Pinus taeda***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 21 de julho de 2014.

Dr. Roberto Alves Braga Júnior UFLA

Dr. Holmer Savastano Junior USP

Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

Dra. Ellem Walleska Nascimento da Fonseca
Coorientadora

LAVRAS - MG

2014

A DEUS.

*Por todas as oportunidades proporcionadas e, acima
de tudo, por ter colocado em meu caminho,
meus pais José Ailton e Cleonice.*

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia (DEG), pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao professor e orientador, Francisco Carlos Gomes, pela confiança, incentivo, apoio e acima de tudo, pela amizade.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia (DEG/UFLA).

À minha irmã Stela, pelo apoio e incentivo de sempre.

À minha namorada Larissa, pelo amor, incentivo, compreensão e confiança em todos os momentos.

Aos meus tios e tias, primos e primas pela torcida, amizade e apoio.

Ao professor e coorientador Roberto Braga, pelas correções e contribuições que muito engrandeceram este trabalho.

À Ellem por toda colaboração e boa vontade em ajudar durante todo trabalho.

Às secretárias Helem e Fernanda, pela dedicação e carinho no seu trabalho.

Às amigas Evelize e Ludmila pela ajuda na coleta e processamento dos dados.

Aos amigos da pós-graduação, Dian, Ebersson, Kléber, Lucas, Mariana e Mikemiler pela constante troca de experiências que muito me engrandece como pessoa.

Aos amigos Alan, Adelino, Bruno, Danilo, Felipe, Gleison, João Marcos e Victor pelas horas de descontração e pelo apoio nos momentos difíceis.

Agradeço enfim, a Deus, por sempre estar ao meu lado, iluminando meus caminhos e me proporcionando oportunidades de crescimento pessoal e profissional.

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro dado ao projeto.

“É justo que custe muito, o que muito vale.”

Santa Tereza D’Ávila.

AUTOBIOGRAFIA

Rodrigo Allan Pereira, nascido em Lavras, Minas Gerais, no dia 29 de setembro de 1989, filho de José Ailton Pereira e Cleonice Aparecida Godinho Pereira. Estudou na Escola Municipal Padre Dehon, Escola Municipal Álvaro Botelho e no Colégio Cenecista Juventino Dias. Gradou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), MG, em junho de 2013. Ingressou no programa de mestrado em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, no mês de maio de 2013, com trabalhos desenvolvidos na área de análise dos materiais e ensaios não destrutivos.

RESUMO GERAL

A madeira é de fundamental importância no setor construtivo, devido ao seu uso para fins estruturais. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de aperfeiçoar a sua aplicabilidade considerando a isenção de defeitos. Dentre as diversas imperfeições, a presença de nós tem sido objeto de estudos e aplicação pelas normas, tornando a madeira apta ao uso estrutural. Para a caracterização das madeiras, são utilizados ensaios não destrutivos, que são ferramentas importantes na caracterização dos materiais. Dentre eles, podemos citar o ultrassom, a radiografia, análise de vibrações e acústica. Neste trabalho, a aplicação da técnica óptica e não destrutiva PIV é proposta para a compreensão do comportamento da madeira *Pinus taeda*, quando submetida a ensaios de flexão. Foram utilizados a Máquina Universal de Ensaio (ensaio convencional) e o método de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), (ensaio não convencional). A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que a técnica PIV pode ser aplicada para mensurar deslocamentos e deformações em madeiras. Esta técnica mostrou-se também ser uma ferramenta eficaz na predição de rupturas. Com a técnica proposta, foi possível observar seu potencial de aplicação em diversos campos da engenharia estrutural.

Palavras-chave: Madeira. Nós. Flexão estática. PIV.

GENERAL ABSTRACT

Wood is of fundamental importance in the construction sector due to its use for structural purposes. Several works have been developed in order to improve its applicability considering the exemption of defects. Among the various imperfections, the presence of knots has been studied and standards applied, making them apt for structural use. For wood characterization, non-destructive tests are used, which are important tools in the characterization of materials. Among them are ultrasound, radiography, acoustic and vibration analysis. In this study, the application of an optical and non-destructive technique called PIV is proposed to understand the behavior of *Pinus taeda* wood when subjected to loads in static bending tests. A Universal Testing Machine (conventional assay) and the Particle Image Velocimetry (PIV) method (conventional assay) were used. From the results it was observed that the PIV technique can be applied to measure displacements and deformations in woods. This technique proved to be an effective tool in predicting ruptures. Using the proposed technique it was possible to observe its potential application in various structural engineering fields.

Keywords: Wood. Knots. Static bending. PIV.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1	Aspecto de nó vivo e morto	19
Figura 2	Diferentes posições dos nós	20
Figura 3	Diferentes formas de nós	20
Figura 4	Esquema de aplicação do método PIV.....	27
Figura 5	Deslocamento das partículas.....	31

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1

FIGURA 1	Ensaio de flexão estática. a) Método convencional. b) Adaptação do ensaio para o método PIV. Fonte: Acervo próprio.....	52
FIGURA 2	Esquema de aplicação do método PIV. Fonte: Acervo próprio.	53
FIGURA 3	Corpo de prova de madeira de <i>Pinus Taeda</i> pigmentado com tinta preta. Fonte: Acervo pessoal.	54
FIGURA 4	Aplicação do PIV na configuração do <i>sunset laser</i> . Fonte: Acervo pessoal.	54
FIGURA 5	Gráfico do corpo de prova número 5 com partículas geradas pelo <i>laser</i>	55
FIGURA 6	Gráfico do corpo de prova número 7 com partículas geradas pela pigmentação com tinta.	55
FIGURA 7	Vetores em seus respectivos lugares na superfície do corpo de prova número 5 utilizando <i>laser</i>	56
FIGURA 8	Vetores em seus respectivos lugares na superfície do corpo de prova número 7 utilizando a pigmentação com tinta.....	57

ARTIGO 2

FIGURA 1	Ensaio de flexão estática. a) Método convencional. b) Adaptação do ensaio para o método PIV	64
FIGURA 2	Esquema de aplicação do método PIV	65
FIGURA 3	Níveis de deformação ao longo do corpo de prova 5 sem nó. (a) Tempo de ensaio de 60s e carga de 424,8 N. (b) Tempo de ensaio de 100s e carga de 714,2 N. (c) Tempo de ensaio de 120s e carga de 843,7 N. (d) Tempo de ensaio de 140s e carga de 968,2 N	66
FIGURA 4	Níveis de deformação ao longo do corpo de prova 9 com nó. (a) Tempo de ensaio de 40s e carga de 162 N. (b) Tempo de ensaio de 80s e carga de 356,1 N. (c) Tempo de ensaio de 120s e carga de 535,2 N. (d) Tempo de ensaio de 140s e carga de 617,2 N. (e) Tempo de ensaio de 180s carga de 754,2 N. (f) Tempo de ensaio de 240s. e carga de 880 N	68
FIGURA 5	Comparação entre deformações pelo método PIV e método convencional de ensaio para o corpo de prova 4 sem nó	69
FIGURA 6	Comparação entre deformações pelo método PIV e MUE para o corpo de prova 8 com nó	70

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AS	American Standard
END's	Ensaio Não Destrutivo
PIV	Particle Image Velocimetry
KAR	Knot Area Ratio
PTV	Particle Tracking Velocimetry
LSV	Laser Speckle Velocimetry
NASA	National Aeronautics and Space Administration
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEDIA	Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária
DEG	Departamento de Engenharia
UFLA	Universidade Federal de Lavras
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
RGB	Red, Green, Blue
DIC	Digital Image Correlation

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	
1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Madeira	18
2.2	Nós em madeiras	19
2.3	Propriedades da madeira	23
2.4	Madeiras de reflorestamento	25
2.4.1	<i>Pinus taeda</i>	25
2.5	Ensaio não destrutivo (END's)	26
2.6	Velocimetria por imagens de partículas (PIV)	27
2.6.1	Janelas de interrogação	30
3	CONSIDERAÇÕES	32
	REFERÊNCIAS	33
	SEGUNDA PARTE– ARTIGOS	37
	ARTIGO 1 Análise de flexão estática em madeira a partir do método da Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)	37
	ARTIGO 2 Comportamento de madeira com presença e ausência de nós em ensaio de flexão estática pela técnica da velocimetria por imagens de partículas	58

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A madeira sempre foi um dos materiais mais utilizados pelo homem, a fim de satisfazer às suas mais diversas necessidades. Com a industrialização, sua utilização passou a contar com desenvolvimento tecnológico em todas as fases da produção e processamento.

Sabe-se que a população mundial está em uma crescente, dessa forma, a utilização da madeira como matéria-prima certamente aumentará. Assim, a produção e manuseio desse material devem ser feitos da melhor maneira possível, já que seu uso tem sido muito importante para o desenvolvimento da sociedade moderna.

A madeira é um material descrito como anisotrópico, cilíndrico, altamente heterogêneo com uma estrutura muito complexa.

A utilização da madeira está condicionada na alta variedade que essa matéria-prima possui, ou seja, a madeira pode apresentar variação entre diferentes espécies, dentro de uma mesma espécie ou até em um mesmo indivíduo. Devido a esse fato, o emprego da madeira em estrutura está condicionado à classificação das espécies.

Outro fator que pode interferir no emprego do material madeira é a presença de imperfeições, que podem ocorrer como variações de densidade, furos ocasionados por insetos, rachaduras ou a presença de nós.

Sendo assim, deve-se utilizar adequadamente a madeira nas indústrias, aumentando rendimentos e produção, reduzindo os desperdícios e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos.

Na busca de um melhor aproveitamento da madeira, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1997), no projeto de revisão da NBR

7190, trata da presença, posição e tamanho de nós na amostra, com o intuito de aplicá-la em projetos estruturais.

A presença de nós é uma característica natural da madeira, que ocorre devido ao embebedimento dos galhos pelo tronco, sua intensidade de ocorrência varia de acordo com a espécie. Os nós são reconhecidos pela redução da resistência da madeira e consequente depreciação por parte dos consumidores.

Para que madeiras com nós sejam utilizadas em maior escala, mais estudos nessa área estão sendo desenvolvidos com o intuito de verificar seu comportamento, quando submetidas a diversos tipos de esforços, em diferentes tipos de peças e espécies. Desse modo, assumem papel relevante a identificação e o conhecimento das características da madeira utilizada e a avaliação da qualidade dos elementos presentes, em termos de nós e de outros defeitos que exibam avaliação da seção residual resistente. Impõe-se, ainda, um especial cuidado no dimensionamento estrutural, em que se deve prestar particular atenção às diferentes propriedades físicas e mecânicas da madeira nas três direções principais: longitudinal, tangencial e radial.

Sabendo que as propriedades mecânicas da madeira são fortemente afetadas pela presença de defeitos, torna-se essencial a descrição detalhada desse material, em situações de carregamento.

Para a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira, têm-se os métodos de ensaios denominados convencionais. Tais métodos de ensaio são aqueles já consagrados e normatizados, cujo objeto de estudo é destruído e descartado, sua execução é geralmente mais demorada e com custo elevado.

Existem, ainda, os Ensaios Não Destrutivos (END's), que agregam outros valores aos ensaios, como a ausência de contato com o material ensaiado, menor custo e rapidez.

Os END's são aqueles realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Os END's mais utilizados recentemente utilizam o ultrassom, a radiografia, a análise de vibrações e a emissão acústica, dentre outros.

Apesar de já existirem alguns métodos de análise não destrutiva, ainda se faz necessária a busca por técnicas que permitam a compreensão do comportamento de um corpo submetido a esforços mecânicos nas diversas seções que compõem este material.

Com o avanço das técnicas ópticas e das metodologias de análise das imagens, é possível a construção de metodologias cada vez mais específicas para atender às diversas demandas de análises de materiais complexos, como a madeira.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo o estudo e a aplicação do PIV (Particle Image Velocimetry) associado à metodologia *sunset laser* para quantificar e mapear os deslocamentos pontuais que ocorrem em madeira de *Pinus*, quando solicitado a esforços de flexão estática.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Madeira

A madeira é um material de origem biológica, formado por uma matéria heterogênea e anisotrópica elaborada por um organismo vivo, que é a árvore.

O homem sempre utilizou a madeira para suprir suas necessidades de abrigo, fabricação de armas, fogo para cozimento de alimentos, aquecimento no frio e transporte flutuante (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

O lenho ou madeira é consequentemente constituído por pequenos elementos celulares, com direção predominantemente longitudinal, diferenciados segundo as funções que desempenham. O seu conjunto e arranjo (estrutura anatômica) são característicos de cada espécie florestal, embora variem também, em certa medida, com a idade e as condições de crescimento (solo, clima, altitude, exploração florestal, queimadas, etc.) (CRUZ; NUNES, 2012).

A madeira possui diversas propriedades que a torna muito atraente frente a outros materiais. Dentre essas, são comumente citados o baixo consumo de energia para seu processamento, a alta resistência específica, as boas características de isolamento térmico e elétrico, além de ser um material muito fácil de ser trabalhado manualmente ou por máquinas.

Segundo Gomes (2003), as principais propriedades a serem consideradas em elementos estruturais de madeira são a resistência, a rigidez ou módulo de elasticidade, a densidade e a umidade.

Por ser um material orgânico, a madeira apresenta inúmeras propriedades intrínsecas que podem auxiliar ou prejudicar seu emprego, principalmente na construção civil.

2.2 Nós em madeiras

A madeira é um material heterogêneo com estrutura complexa, que usualmente é descrita como um compósito ortotrópico cilíndrico. As propriedades mecânicas da madeira são fortemente afetadas pela presença de defeitos com variações de densidade e qualquer outra heterogeneidade (GUINDOS; ORTIZ, 2013).

Nó é a porção basal de um ramo que se encontra embebido no tronco ou peças de madeira, provocando na sua vizinhança desvios ou a descontinuidade dos tecidos lenhosos (BURGER; RICHTER, 1991).

Se o ramo estava morto quando foi embebido, trata-se de um nó morto e se o ramo estava vivo, trata-se de um nó vivo. A ligação entre o lenho do nó e o do tronco principal é fraca, principalmente se tratando de um nó morto. A Figura 1 demonstra nós vivos e mortos em uma peça de madeira.

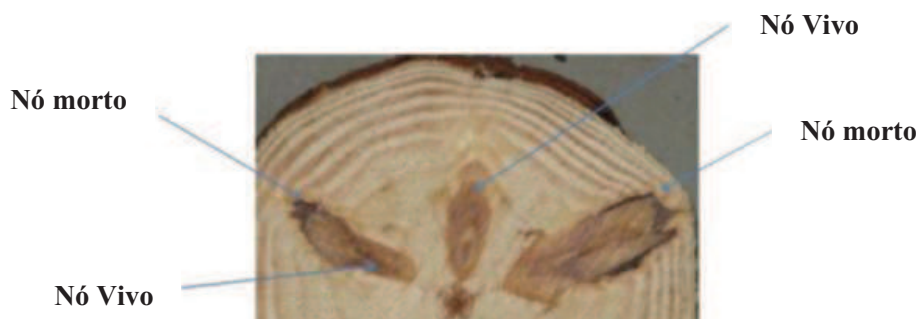


Figura 1 Aspecto de nó vivo e morto

Fonte: Leal (2009).

Os nós podem ser classificados quanto à sua posição na seção transversal, como é apresentado na Figura 2.

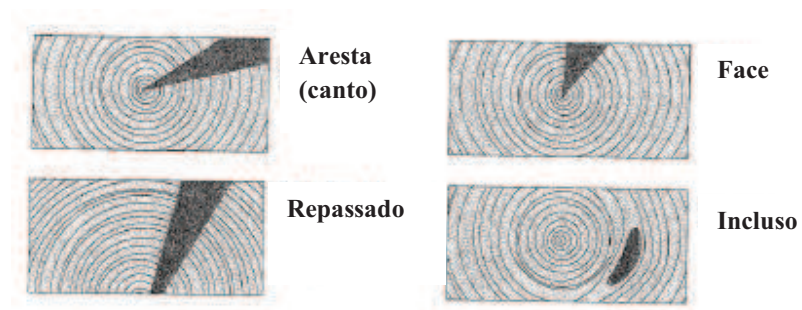


Figura 2 Diferentes posições dos nós

Fonte: Negrão (2005).

A classificação dos nós em peças de madeira pode ser feita ainda em função da sua forma, como é demonstrado na Figura 3.



Figura 3 Diferentes formas de nós

Fonte: Negrão (2005).

Em elementos com dimensões estruturais, o efeito dos nós na resistência das peças é dependente do tamanho do nó em relação à seção transversal da peça, sendo mais desejável se ter nós pequenos e frequentes ao invés de nós grandes e menos frequentes (BAMBER; BURLEY, 1983; CHIES, 2005; KLOCK, 1989, 2000). Nós de grandes dimensões, principalmente em espécies de rápido crescimento, classificam a madeira como de menor qualidade (LARSON; NICHOLS; DADSWELL, 2001).

Em vigas, longarinas, caibros ou pranchas, a presença de nós influencia diretamente na resistência à flexão. A magnitude desta influência está relacionada ao tamanho do nó (FOREST PRODUCTS LABORATORY - FPL, 1955). A Tabela 1 apresenta o percentual da resistência (%) de acordo com o tamanho do nó e da largura da peça, quando comparada com uma peça isenta de defeitos.

Tabela 1 Relação entre o tamanho do nó, largura da peça e resistência (%)

Tamanho do nó (mm)	Largura da peça (mm)						
	50,8 (2")	101,6 (4")	152,4 (6")	203,2 (8")	254,0 (10")	304,8 (12")	406,4 (16")
0	100	100	100	100	100	100	100
9,5	83	92	94	95	96	96	97
12,7	77	88	92	93	94	95	95
15,9	71	85	90	92	92	93	94
22,2	58	79	86	88	89	90	91
31,8	26	70	80	83	84	86	88
41,3		60	74	77	80	81	84
50,8		51	67	72	75	77	80
76,2			51	57	62	65	70
87,7				50	55	59	65
98,4					50	55	61
108,0						50	57
123,8							21

Fonte: FPL (1995) adaptado.

Trianoski (2012) e Tsoumis (1991) afirmam que a presença de nós além de reduzir consideravelmente a resistência, afeta o processamento mecânico, a secagem e a colagem da madeira. Em relação à resistência mecânica, a redução

ocorre devido à interrupção da continuidade e mudança na direção das fibras em torno do mesmo (IWAKIRI, 1982).

Segundo Leal (2009), o caráter depreciativo dos nós depende do tipo de utilização estrutural ou não estrutural. Para utilizações não estruturais, o aspecto é importante, portanto deseja-se que os nós estejam distribuídos de modo uniforme e tenham pouca expressão nas faces da peça (pequenos diâmetros). A influência dos nós na resistência mecânica da madeira se deve ao fato de eles corresponderem a um material inserido numa peça, cujas fibras são aproximadamente perpendiculares à direção geral das fibras da peça. Dada a forte anisotropia da madeira, traduzida por uma resistência à tração na direção perpendicular às fibras, cerca de 30 vezes inferior à direção paralela. Com isso, entende-se que a região com nós é realmente mais vulnerável aos esforços solicitantes. Por essa razão, para utilizações estruturais, os limites impostos aos nós ou grupos de nós, são estabelecidos em termos de percentagem de seção transversal da peça que eles ocupam, designada vulgarmente por KAR (*knot area ratio*).

Segundo Tsoumis (1991), madeira livre de nós é encontrada somente na porção mais baixa do tronco da árvore, onde ocorre desrama natural ou a floresta passa por práticas silviculturais de poda. As espécies de *Pinus* introduzidas no Brasil apresentam desrama natural pobre, tornando necessária a utilização da desrama artificial como meio de produzir rapidamente árvores de maiores diâmetros, com madeira de melhor qualidade (SCHILLING et al., 1998).

Carreira e Dias (2005) relatam que para a utilização da madeira proveniente destas florestas, é imprescindível a realização de uma classificação antes de ser aplicada como componente estrutural.

2.3 Propriedades da madeira

No caso da madeira, as deformações elásticas ocorrem devido às deformações reversíveis das células, fortemente influenciadas pelas taxas de umidade. Como no caso do concreto, também nas madeiras é difícil separar os mecanismos de deformação permanente dos de ruptura, porque as deformações permanentes macroscópicas resultam de microrrupturas e ainda porque muitas vezes, a ruptura macroscópica aparece antes que deformações apreciáveis sejam produzidas (LEMAITRE, 1992; LEMAITRE; CHABOCHE, 1990; MOFFATT; PEARSALL; WULFF, 1969).

O mecanismo principal de deformação plástica da madeira é o escorregamento entre as células, sendo que a ruptura se dá nas cadeias de celulose, nas fibras e por perda da coesão entre fibras, ocasionada por solicitação em direção perpendicular a elas (LEMAITRE, 1992; LEMAITRE; CHABOCHE, 1990; MOFFATT; PEARSALL; WULFF, 1969).

Segundo Panshin e De Zeeuw (1980), devem ser considerados como propriedades da madeira:

- a) Caule predominante vertical;
- b) Estrutura celular, carboidratos e lignina;
- c) Anisotropia – propriedades mecânicas diferentes, segundo três eixos direcionais principais. Esta anisotropia ocorre devido a:
 - estrutura da parede celular;
 - forma alongada das células;
 - arranjo longitudinal e radial das células conforme os mesmos eixos do caule;
- d) Higroscopia: a madeira perde e absorve água em função da umidade e da temperatura do meio ambiente, causando, por isso, variações

dimensionais diferentes, segundo os três eixos principais (longitudinal, radial e tangencial).

Estas características conferem à madeira:

- a) Resistência à oxidação.
- b) Possibilidade de ser montada e moldada.
- c) Boas propriedades acústicas e isolamento elétrico.

Além desses fatores, a madeira é também um material rígido e altamente resistente a choque e à vibração. Apresenta alto momento de inércia, devido às suas características físicas e anatômicas. Em caso de incêndio, oferece maior segurança do que o concreto e o aço.

No entanto, tais propriedades podem ser desfavoráveis à utilização da madeira, como:

- a) Higroscopia, que acarreta alterações dimensionais desiguais;
- b) Variações da resistência entre peças de madeiras diferentes e ao longo de uma mesma peça;
- c) Susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos.

Para a determinação das propriedades mecânicas, a realização de testes de classificação e de outros testes em que são necessários ensaios destrutivos, caracterizam as principais variáveis dos materiais em apenas alguns pontos em uma dada amostra. Portanto, um grande número de amostras deve compensar a incerteza causada pela heterogeneidade. Esse grande número de amostras pode incorrer em custos econômicos e ambientais, além de grandes investimentos de tempo (GUINDOS; ORTIZ, 2013).

2.4 Madeiras de reflorestamento

O Brasil é um país de vocação florestal e as espécies florestais exóticas, como as do *Pinus* e *Eucaliptus*, se adaptaram tão bem, graças à avançada tecnologia silvicultural brasileira (VALVERDE et al., 2005). O setor florestal brasileiro também contribui com uma parcela importante para a economia nacional, gerando produtos para consumo direto ou para exportação, impostos e empregos para a população e, ainda, atuando na conservação e preservação dos recursos naturais.

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2006), no mundo, as florestas plantadas para o uso industrial, ocupam aproximadamente 187,5 milhões de hectares. No Brasil, encontra-se 5,6 milhões de hectares, ou 2,9 % do total de florestas plantadas. Esses plantios correspondem a apenas 1 % do total florestal nacional.

Com relação às espécies plantadas, o *Eucaliptus* e o *Pinus* representam 93% das áreas cultivadas. A região Sudeste tem aproximadamente 2.083.058 ha em florestas plantadas de *Eucaliptus*, sendo que os dois maiores estados produtores são, respectivamente, Minas Gerais e São Paulo. A região Sul tem aproximadamente 1.392.472 ha de florestas de *Pinus*, o que equivale a 80% das áreas plantadas no Brasil. Esta floresta encontra-se principalmente nos estados do Paraná (677.772ha) e Santa Catarina (527.079 ha) (ABRAF, 2006).

2.4.1 *Pinus taeda*

A espécie *Pinus taeda* é oriunda das planícies adjacentes ao Golfo do México e à costa atlântica do sudeste dos Estados Unidos. Cresce, em geral, em altitudes de até 800 m, embora, coincidente com a área original do *Pinus*

elliottii, apresente uma distribuição mais ampla, alcançando os estados do Texas, do Arkansas, do Tennessee e da Virgínia (MARCHIORI, 1996).

É atualmente uma das espécies mais importantes nos Estados Unidos e no Brasil, o *Pinus taeda* é cultivado principalmente na região sul, sobretudo, nas terras mais altas das serras gaúcha e catarinense. As árvores alcançam cerca de 20 m de altura e 100 cm de DAP (Diâmetro à Altura do Peito), produzindo copa densa, casca gretada e ramos acinzentados. As folhas aciculares e verde-escuras reúnem-se em grupos de três por fascículo e medem de 15 a 20 cm de comprimento. Apresentam, com frequência, 2 canais resiníferos, raramente 3 a 4, dispostos no meio do colênquima.

Ainda segundo Marchiori (1996), a espécie assemelha-se ao *Pinus elliottii*, diferindo, entretanto, em vários aspectos de fácil reconhecimento. As acículas de *Pinus taeda*, mais curtas e de cor mais escura, têm seção transversal triangular e cones praticamente sésseis, tendentes à cor acinzentada.

O *Pinus taeda* apresenta tensão de ruptura à flexão média de 66685,23 kPa. A madeira é indicada para construções, móveis e caixotaria; as fibras são longas e adequadas à fabricação de papel e produzem bastante resina. Nos Estados Unidos da América o *Pinus taeda* está entre as espécies de madeira mais utilizada na construção civil.

2.5 Ensaaios não destrutivos (END's)

O desenvolvimento de métodos de ensaio capazes de analisar detalhadamente as características dos materiais submetidos a esforços se tornam indispensáveis para a otimização do uso desses recursos.

Os END's são aqueles realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, dentre muitas outras características, por

meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior.

Os ensaios não destrutivos (END's) mais utilizados recentemente utilizam dentre outros, o ultrassom, a radiografia, a análise de vibrações, micro-ondas, emissão acústica e as técnicas óticas, onde se destaca a Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV).

2.6 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)

As primeiras aplicações comerciais de sistema de medições baseados na PIV datam de 1997, conforme Raffel et al. (2007). O método PIV consiste na iluminação do objeto em estudo por meio da emissão laser, sendo que o mesmo deve estar posicionado paralelamente à superfície do material. É necessária ainda, a utilização de uma máquina digital de alta resolução para a captura das imagens no decorrer do ensaio, conforme a Figura 4.

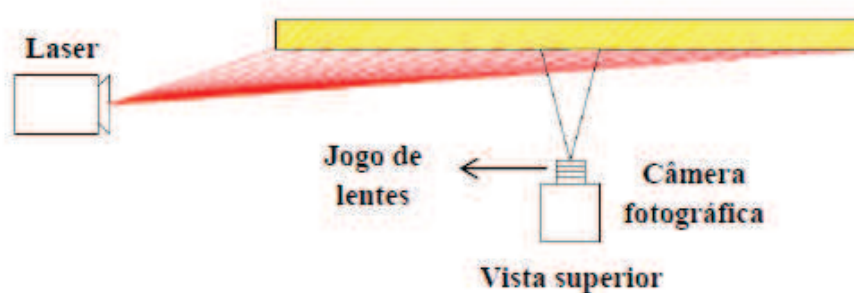


Figura 4 Esquema de aplicação do método PIV

Fonte: Acervo próprio.

O intervalo de tempo de exposição na aquisição da imagem deve ser pequeno o suficiente para congelar o movimento das partículas. A técnica conhecida como velocimetria por imagem de partículas, também amplamente referida por sua terminologia em inglês *particle image velocimetry*, ou mesmo pela sigla que representa essa terminologia, PIV, é muito empregada em áreas como a da medição de fluxo de partículas, em particular utilizando o *laser* para iluminar as partículas injetadas no fluxo em estudo. Yeh e Cummins (1964), utilizaram técnica do *laser Doppler velocimetry* (LDV) ou *laser Doppler anemometry* (LDA), que consistia em um feixe simples, dividido em outros dois de igual intensidade, os quais são focados em um mesmo ponto no campo do fluxo. Uma interferência padrão é formada no ponto onde os feixes se cruzam, definindo uma região cujo volume é conhecido. Partículas em movimento pelo volume espalham a luz que é coletada por um fotodetector, sendo que a frequência resultante da saída do fotodetector está diretamente relacionada à velocidade da partícula. Foi uma das primeiras utilizações do *laser* para a medição de propriedades do fluxo, particularmente a velocidade (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

Dyke (1982) utilizou outra técnica, conhecida como *particle tracking velocimetry* (PTV), que consiste em uma maior exposição da imagem, gerando a captura do rastro das partículas semeadas. O tamanho do rastro, o tempo de abertura da câmera e a resolução da imagem fornecem os dados para o cálculo da velocidade (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

Adrian e Yao (1985), utilizaram as técnicas de PIV e *laser speckle velocimetry* (LSV). Assentaram as bases do espalhamento de vários tipos de partículas em dois modos de velocimetria por *laser* pulsado: imagem de partícula (PIV) e *speckle* (LSV – no caso, com grande concentração de partículas semeadas no fluxo). A técnica LSV foi, à época, deixada de lado, pela

grande exigência de processamento que extrapolava os equipamentos disponíveis (RODRIGUES, 2003).

A análise de qualquer estrutura sólida somente é possível conhecendo-se os esforços que o material suporta. Para isso, são feitos testes com máquina universal de ensaios mecânicos, que possibilitam observar quando o material começa a se deformar. Porém, por meio desses testes não é possível avaliar com clareza quais partes do material começam a sofrer as primeiras deformações, como no caso de materiais heterogêneos. Entre as tecnologias não destrutivas para análises de materiais, em especial de materiais biológicos, existem ou estão disponíveis as ferramentas de iluminação e captura de imagens, entre elas a *Particle Image Velocimetry* (PIV), que utiliza um *speckle laser*.

Vários estudos experimentais utilizando fluxos como túnel de vento ou fluxo em tubos têm sido desenvolvidos para tentar avaliar em uma configuração real, a capacidade que a técnica PIV tem de extrair informações de um mapa vetorial PIV (LECORDIER; TRINITÉ, 2003).

Outros estudos tentam comparar e ajustar os testes experimentais e simulações numéricas, inclusive fenômenos como a influência da direção anel de crescimento anual em madeiras e da introdução de coeficientes de correção, com o objetivo de representar a complexidade do campo de tensão-deformação, obtendo-se resultados mais precisos (PEREIRA; XAVIER; MORAIS, 2003).

O PIV teve grande desenvolvimento, sendo altamente utilizado em diversos campos, como a aeronáutica. A técnica é de grande interesse de entidades como a Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA), principalmente pela sua propriedade de ser uma técnica de medição de fluxo que não interfere no mesmo (KROTHAPALLI, 1991).

Petersson (2010), concluiu que as técnicas de *scanner laser* são muito úteis no que se refere à caracterização da superfície de madeiras com nós e ângulo das fibras.

Souza (2013), utilizou o *laser* associado à técnica *sunset laser* para iluminar a superfície de corpos de prova de madeira de *Pinus*, em ensaio de flexão estática.

Miranda (2004), utiliza pequenas partículas que são adicionadas a um fluxo, e seus movimentos são medidos pela comparação de duas imagens capturadas, com um curto intervalo de tempo, de um campo do fluxo, utilizando correlação cruzada. A segunda imagem é parecida com a primeira, mas com o deslocamento das partículas introduzidas. Com esse deslocamento e conhecendo-se o intervalo de tempo entre as duas imagens, pode-se calcular a velocidade das partículas envolvidas.

2.6.1 Janelas de interrogação

As chamadas janelas de interrogação são as áreas da imagem que são utilizadas para a medição do deslocamento das partículas. Elas devem ser pequenas o bastante para que o gradiente de velocidade não tenha influência significativa nos resultados, pois é nos pequenos quadrados considerados na imagem, que será definido o vetor velocidade, que pode variar de 16 x 16 pixels até 64 x 64 pixels, de acordo com o problema.

A técnica PIV usa a correlação cruzada de duas imagens sequenciais capturadas. Partículas externas são inseridas para criar as referências para a correlação cruzada. A segunda imagem é parecida com a primeira, mas com o deslocamento das partículas introduzidas e conhecendo o intervalo de tempo entre as duas imagens, é possível calcular a velocidade das partículas envolvidas.

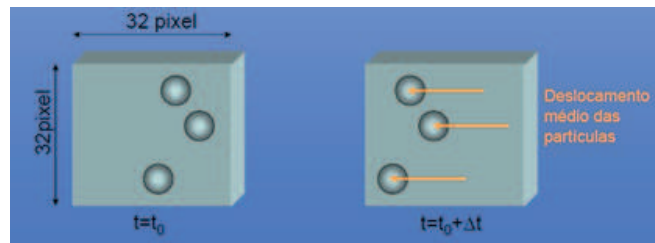


Figura 5 Deslocamento das partículas

Fonte: Souza (2013).

3 CONSIDERAÇÕES

Sabendo da importância que a madeira tem no contexto social, torna-se necessário cada vez mais utilizar essa matéria prima de maneira racional. Madeiras com imperfeições, principalmente nós, devem ser estudadas para que sua utilização na construção civil, por exemplo, não seja desconsiderada.

Desta forma, este trabalho foi desenvolvido em dois artigos. No primeiro, analisou-se a viabilidade de uma nova metodologia de aplicação da técnica PIV que possa ser aplicada em locais que inviabilizem o uso do *sunset laser*.

O segundo artigo trata da caracterização e comportamento da madeira submetida a ensaio de flexão estática, demonstrando assim o potencial da técnica PIV identificar deslocamentos e deformações em materiais submetidos a esforços.

É indispensável a utilização de técnicas e métodos de ensaio que visem a descrição detalhada do objeto em estudo, o que geralmente não ocorre por meio das técnicas convencionais de ensaio.

Neste sentido a utilização da velocimetria por imagens de partículas (PIV), durante ensaio de flexão estática em madeira de *Pinus taeda* com presença e ausência de nós, fornecerá informações indispensáveis sobre este material.

REFERÊNCIAS

- ADRIAN, R. J.; YAO, C. S. Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed. **Applied Optics**, New York, v. 24, p. 44-52, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.107 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2005. Brasília, 2006.86p.
- BAMBER, R.K.; BURLEY, J. **The wood properties of Radiata pine**. Totnes: Commonwealth Agricultural Bureau, 1983.84 p.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composite**. New York: V. N. Reinhold, 1982.712 p.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.
- CARREIRA, M.R.; DIAS, A.A. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de *Pinus* sp.plantadas no Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.67, p. 78-87, 2005.
- CHIES, D. **Influência dos espaçamentos sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- CRUZ, H.; NUNES, L. **A madeira como material de construção**. Lisboa: LNEC, 2005. 27 p.
- DYKE, M. van. **An album of fluid motion**. Stanford: Parabolic, 1982. 176p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: basic information on wood as a material of construction with data for its use in design and specification. Washington: USDA, 1955. 528 p.
- GOMES, F.C. **Inovações tecnológicas em estruturas de madeira**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2003. 118 p.

GUINDOS, P.; ORTIZ, J. The utility of low-cost photogrammetry for stiffness analysis and finite-element validation of wood with knots in bending. **Biosystems Engineering**, London, v. 114, n. 2, p. 86-96, 2013.

IWAKIRI, S. **Classificação de madeiras tropicais através do método mecânico não destrutivo**. 1982. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1982.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. 2000. 291 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr e Golf**. 1989. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

KROTHAPALLI, A. **The development of *Laser speckle velocimetry for the study of vortical flows*: instrumentation and photography**. Tallahassee: Florida State University, 1991. 105 p. (NASA Contractor Report, 177589).

LARSON, P.R.; NICHOLS, J.W.P.; DADSWELL, H.E. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis**. Madison: USDA, 2001. 42 p.

LEAL, S. **Avaliação do comportamento mecânico de madeira antiga de carvalho proveniente de incêndio**. 2009. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2009.

LECORDIER, B.; TRINITÉ, M. Advanced PIV algorithms with image distortion for velocity measurements in turbulent flows. In: EUROPIV WORKSHOP HELD IN ZARAGOZA, 2., 2003, Madrid. **Proceedings...** Madrid: EUROPIV, 2003. 1 CD-ROM.

LEMAITRE, J. **A course on damage mechanics**. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 228 p.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mechanics of solid materials**. Cambridge: Cambridge University, 1990. 584 p.

MARCHIORI, J. N. C. **Dentologia da gimnosperma**. Santa Maria: UFSM, 1996. 158 p.

MIRANDA, M. A. C. **Utilização da velocimetria por imagem de partículas na visualização e caracterização de escoamento bifásico**. 2004. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOFFATT, W. G.; PEARSALL, G. W.; WULFF, J. **Structure and properties of materials**. Chichester: J. Wiley, 1964.59 p.

NEGRÃO, J. H. **Estruturas em madeira**: textos de apoio, cursos de formação d.e.c-f.c.t.u.c. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2005.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1980.722 p.

PEREIRA, J. L.; XAVIER, J.; MORAIS, J. Estudo por elementos finitos dum novo método para a determinação das propriedades mecânicas da madeira de *Pinus Pinaster* AIT. nas direções perpendiculares ao grão. In: CONGRESSO NACIONAL DE MECÂNICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 7.,2003, Évora. **Actas...**Évora: Universidade de Évora,2003. 1 CD-ROM.

PETERSSON, H. Use of optical and laser scanning techniques as tools for obtaining improved fe-input data for strength and shape stability analysis of wood and timber. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTATIONAL MECHANICS, 5.,2010, Paris. **Anais...**Paris: ECCM, 2010. 1 CD-ROM.

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

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry: a practical guide**. Berlin: Springer Verlag, 1998.253 p.

RODRIGUES, R. E. S. **Arrastamento de partículas submetidas a variações de velocidade**. 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHILLING, A. C. et al. Influência de diferentes intensidades de desrama sobre a porcentagem de lenho tardio e quantidade de nós da madeira de primeiro desbaste de *Pinus elliottii* Engelm. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 115-127, 1998.

SOUZA, T. M. de. **Análise do mecanismo de ruptura em flexão estática em madeira por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas.** 2013. 85 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

TRIANOSKI, R. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de Pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos.** 2012. 553 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

TSOUMIS, G. T. **Science and technology of wood:** structure, properties, utilization. New York: Chapman & Hall, 1991. 479 p.

VALVERDE, S. R. et al. Mercado da madeira de reflorestamento. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 87, p. 60-66, 2005.

YEH, Y.; CUMMINS, H. Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer. **Applied Physics Letters**, Amsterdam, v. 4, n. 10, p. 176-178, 1964.

SEGUNDA PARTE– ARTIGOS

**ARTIGO 1 Análise de flexão estática em madeira a partir do método da
Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)**

Artigo formatado de acordo com as normas para submissão do periódico

Scientia Florestalis.

RESUMO

O emprego de qualquer material só é eficaz e seguro quando todas suas propriedades são conhecidas e mensuradas. O estudo do comportamento dos materiais quando solicitados a esforços é um pouco mais simples em materiais isotrópicos e homogêneos como o aço, e mais complexo em materiais anisotrópicos e heterogêneos como a madeira. As técnicas convencionais de ensaio, geralmente, não são capazes de detectar tal comportamento anisotrópico, com isso faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas de ensaio, em especial as técnicas não-destrutivas. Uma potencial ferramenta de ensaio não-destrutivo para a análise das características da madeira é a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV), em particular no monitoramento de deslocamentos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso do PIV em ensaio de flexão estática em madeiras, associado ao *sunset laser* e à pigmentação artificial da superfície. Concluiu-se que o uso do PIV tanto associado ao *sunset laser* quanto a pigmentação artificial foi capaz de monitorar o deslocamento da madeira sob ensaio de flexão estática.

Palavras-chave: Flexão estática, Marcadores, PIV.

STATIC BENDING ANALYSIS IN WOOD FROM THE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV) METHOD

ABSTRACT

The use of any material is only effective and safe when all its properties are known and measured. The study of the behavior of materials when efforts are required is slightly simpler in isotropic and homogeneous materials such as steel and more complex in heterogeneous and anisotropic materials like wood. Conventional testing techniques are not usually able to detect such anisotropic behavior, and thus the development of testing tools becomes necessary, especially the non-destructive techniques. A potential non-destructive testing tool for the analysis of wood characteristics is the Particle Image Velocimetry (PIV) technique, particularly for monitoring displacements. This study aimed to evaluate the use of PIV in static bending test in woods associated with the sunset laser and associated with artificial pigmentation of the wood surface. It was concluded that both the sunset laser and artificial pigmentation, associated with PIV, was able to monitor the displacements in wood under the static bending test.

KEYWORDS: Static bending. Markers. PIV.

1 INTRODUÇÃO

A madeira sempre foi um dos materiais mais utilizados pelo homem, a fim de satisfazer às suas mais diversas necessidades e seu uso baseado em informações empíricas. Com a industrialização, a sua utilização passou a contar com desenvolvimento tecnológico em todas as fases da produção e processamento.

Com o crescente aumento do uso da madeira, cada vez mais se torna necessário o conhecimento de suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Tais propriedades devem ser estudadas a fundo utilizando os mais diversos recursos tecnológicos existentes.

Para usos estruturais as propriedades mais importantes são as físicas e mecânicas. De acordo com Gesualdo (2003), do ponto de vista estrutural, deve-se conhecer propriedades da madeira relativas às propriedades físicas da madeira (umidade, densidade, retratibilidade e resistência ao fogo); às propriedades mecânicas (compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento); módulo de elasticidade; solitação inclinada e embutimento.

A determinação de tais propriedades geralmente ocorre a partir de ensaio de flexão estática. No ensaio de flexão com a máquina de ensaio universal, segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM–D143-94, 1995), o corpo de prova fica apoiado nas extremidades e então é exercida uma carga no centro do corpo de prova para provocar a flexão no mesmo.

O desenvolvimento de métodos de ensaio capazes de analisar detalhadamente as características dos materiais submetidos a esforços se tornam indispensáveis para a otimização do uso destes recursos.

Neste contexto, tomam espaço os Ensaio Não Destrutivos (END's), agregando outros valores aos ensaios, como a ausência de contato com o material ensaiado, menor custo e rapidez.

Os Ensaio não destrutivos (END's) mais utilizados recentemente utilizam entre outros, o ultrassom, a radiografia, a análise de vibrações, micro-ondas, emissão acústica e as técnicas óticas, onde se destaca a velocimetria por imagens de partículas (PIV).

As primeiras aplicações comerciais de sistemas de medições baseados na PIV datam 1997 conforme Raffael et al. (2007). Esta técnica consiste em capturar imagens sequenciais em intervalos de tempo capaz

de identificar instantaneamente o que ocorre com a amostra durante determinado ensaio. A iluminação da amostra é feita por meio de emissão de laser e os registros de imagens através de câmeras digitais. O intervalo de tempo de exposição na aquisição da imagem deve ser pequeno o suficiente para congelar o movimento das partículas. A técnica conhecida como velocimetria por imagem de partículas, PIV, é muito empregada em áreas como a da medição de fluxo de partículas, em particular utilizando o *laser* para iluminar as partículas injetadas no fluxo em estudo.

Levando em consideração as vantagens que o método de velocimetria por imagens de partículas (PIV) oferece, como por exemplo, baixo custo dos equipamentos, facilidade de execução, possibilidade de monitoramento de estruturas ao longo do tempo, método não intrusivo (sem contato com o objeto em estudo), rapidez nos resultados, entre outros, o mesmo será utilizado como forma de caracterização do material madeira da espécie *Pinus taeda* a partir do ensaio de flexão estática na máquina universal de ensaios.

A técnica conhecida como velocimetria por imagem de partículas, também amplamente referida por sua terminologia em inglês *particle image velocimetry*, ou mesmo pela sigla que representa essa terminologia,

PIV, é muito empregada em áreas como a da medição de fluxo de partículas, em particular utilizando o *laser* para iluminar as partículas injetadas no fluxo em estudo.

Para a utilização do método PIV, é necessário que no corpo em estudo sejam observados grãos. Os grãos são marcadores que ficam na superfície da amostra e são essenciais para a execução de todo o processo do PIV. Estes marcadores podem ser gerados por fontes externas, como a iluminação a partir de *laser* de diodo e a pigmentação com tinta preta, ou ainda aproveitando o próprio corpo de prova e as irregularidades de sua superfície.

Souza (2013) utilizou o PIV associado à técnica *sunset laser* para iluminar a superfície de corpos de prova de madeira de *Pinus* em ensaio de flexão estática. Slominski et al. (2007), em seu trabalho sobre fluxo de material granular em silos, utilizou como marcadores para a aplicação do método PIV os próprios grãos de areia que faziam o papel de material granular no ensaio.

Pode-se citar, por exemplo, a utilização do laser em locais onde ocorre alta incidência de luz. A iluminação por meio de *laser* demanda na maioria das vezes a ausência de luz no local do ensaio. Tal situação não

ocorre com a pigmentação da superfície com tinta. Estudos como este podem viabilizar o uso do método PIV para monitoramento de pontes, por exemplo, o que implicaria em diminuição excessiva de custos, mão-de-obra, facilidade de aplicação e rapidez nos resultados, tendo em vista que os métodos convencionais de monitoramento são de alta complexidade, demandam grande instrumentação são ainda onerosos.

O objetivo deste trabalho é verificar a aplicação do método PIV associado à pigmentação da superfície do material com tinta, na mensuração de deformações e deslocamentos em madeiras submetidas a esforços de flexão estática.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados 20 corpos de prova de madeira de *Pinus taeda*, sem qualquer presença de defeitos, nós ou descontinuidade das fibras. Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma ASTM–D143-94 (1995) com as dimensões de 2,5 x 2,5 x 41 cm.

Para os ensaios, foram utilizados ainda uma câmera fotográfica digital de alta resolução, marca CANON Rabel t3, jogo de lentes para

melhor ajuste do foco e zoom, *laser* de diodo, tinta preta em *spray* e a Máquina manual de ensaio de flexão estática.

Dos 20 corpos de prova, 10 foram pigmentados com tinta preta de forma que as gotículas ficassem separadas uma das outras e ao mesmo tempo em uma quantidade suficiente para a execução do PIV. Desta forma 10 corpos de prova foram ensaiados com partículas geradas pelo *laser* e outros 10 corpos de prova com partículas geradas a partir da pigmentação com tinta.

Foi utilizada a espécie *Pinus taeda* por ser uma das espécies mais empregadas na construção civil em todo o mundo.

2.1 Ensaio de flexão estática

O ensaio de flexão estática foi conduzido de acordo com a norma ASTM–D143-94 1995 e a partir do mesmo foi possível obter informações como capacidade de deformação (MOE) e resistência (MOR) do objeto em estudo. Como o método PIV trabalha com o deslocamento dos grãos do material, é necessário que a área em estudo não se movimente. Neste caso o ponto de aplicação de carga no ensaio de flexão estática foi invertido e se tornou o ponto de apoio, enquanto os dois pontos de apoio

se tornaram agentes de aplicação de carga. As adaptações foram feitas, conforme Figura 1.

Entra Figura 1.

2.2 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)

O processo de aplicação do método PIV associado ao *sunset laser*, ocorre basicamente com o posicionamento do *laser* de forma com que seu feixe de luz ilumine paralelamente a superfície do corpo de prova, gerando assim regiões com maior e menor intensidade de luz. Isto ocorre devido às imperfeições da superfície do material sendo que, tais irregularidades juntamente com o feixe de luz do *laser*, serão os agentes criadores dos grãos na madeira. É necessário ainda que a câmera digital seja posicionada perpendicularmente ao centro do corpo de prova, como mostra a Figura 2.

Entra Figura 2.

Comparou-se os resultados obtidos pela técnica PIV utilizando a iluminação *sunset laser* e a pigmentação da superfície da madeira para a criação dos grãos. Nas Figuras 3 e 4 são demonstrados os corpos de prova com os dois tipos de partículas.

Entra Figura 3.

Entra Figura 4.

O processo completo consiste em subdividir a imagem em células de interrogação; calcular o campo de intensidade no tempo de $t+\Delta t$ para uma célula de interrogação; calcular a correlação entre imagens a partir dos campos de intensidade e repetir o processo para cada célula de interrogação. É então iniciado o ensaio e capturadas as imagens em um intervalo regular de tempo (20s). Não é exercida carga sobre a primeira imagem capturada para que a mesma seja testemunha para as demais imagens. Após a captura das imagens, elas foram processadas no *Software Image J* (Livre) com o intuito de trabalhar apenas com a área de interesse e transformar as imagens em matrizes de frequência RGB (*red*,

green e blue). Este processo favorece a análise das imagens pelo método PIV, pois evidencia os pontos com maior intensidade de luz também chamados de grãos. Utilizou-se a matriz de frequência *green*, pois foi aquela que proporcionou os melhores resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a descrição dos resultados, são apresentados os gráficos relativos ao corpo de prova número 5 iluminado por meio da técnica *sunset laser* (Figura 5) e o corpo de prova número 7 pigmentado com tinta, (Figura 6).

Entra Figura 5.

Entra Figura 6.

Estes gráficos trazem a orientação dos vetores de deslocamento dos grãos gerados pela técnica *sunset laser* na superfície do corpo de prova. Pode-se observar que tanto na Figura 5 quanto na Figura 6 os vetores encontram-se orientados na angulação entre 240° e 330°. Isso demonstra que o PIV conseguiu analisar o comportamento da madeira

durante o ensaio de flexão estática por meio da iluminação com *laser* e pela pigmentação com tinta preta.

É possível identificar pela Figura 7 e pela Figura 8 os vetores na superfície da madeira e suas orientações de acordo com o comportamento do material durante o ensaio de flexão estática.

Entra Figura 7.

Entra Figura 8.

Observa-se por meio da orientação dos vetores o comportamento da madeira no decorrer do ensaio de flexão estática. É possível identificar na Figura 7 e na Figura 8 os vetores indicando a orientação do deslocamento das partículas na superfície do corpo de prova durante o ensaio de flexão estática. A ocorrência da cor vermelho na parte esquerda da Figura 8 pode ser considerada como ruído. Isto demonstra a necessidade de aprimoramento da técnica PIV associada à pigmentação com tinta, o que pode ser solucionado com mais estudos para este processo.

4 CONCLUSÃO

Concluiu-se com o presente trabalho por meio da comparação do método PIV aliado ao *sunset laser* e aliado à pigmentação da superfície do material com tinta que ambos os métodos são capazes de mensurar e descrever deslocamentos em superfícies de materiais submetidos a esforços. Isto indica a viabilidade de utilização de qualquer um destes métodos na geração dos grãos para a técnica PIV.

Apesar de ainda necessitar algum aprimoramento, as partículas geradas pela pigmentação com tinta podem ser uma ótima alternativa em situações onde o uso do *sunset laser* é inviável devido às condições impostas pelo ambiente, por exemplo, lugares com alta incidência de luz.

Uma provável utilização para o método PIV associado à pigmentação de tinta preta é o monitoramento de estruturas em uso, como pontes, edifícios e prédios históricos.

REFERÊNCIAS

ASTM - American Society for Testing and Materials. **Standard methods of testing small clear specimens of timber: D 143 – 94**. Philadelphia, PA, 1995.

GESUALDO, F. A. R. **Estruturas de madeira**. Uberlândia: Universidade Federal De Uberlândia, 2003. 105 p. Notas de Aula.

RAFFAEL, M.; WILLERT, C.; WERELEY, S.; KOMPENHANS, J. **Particle Image Velocimetry: A Practical Guide**. 2nd edition. Berlin, Germany: Springer, 2007. 448 p.

SLOMINSKI, C.; NIEDOSTATKIEWICZ, M.; TEJCHMAN, J. Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow. **Powder Technology**, v. 173, n. 1, p. 1-18, 2007.

SOUZA, T. M. **Análise do mecanismo de ruptura em flexão estática em madeira por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas**. 2013. 85 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

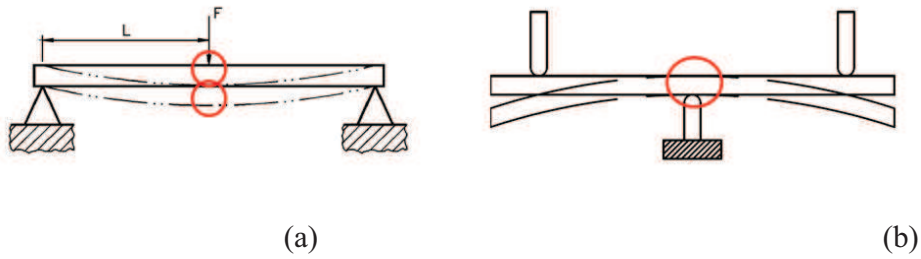


FIGURA 1 Ensaio de flexão estática. a) Método convencional. b) Adaptação do ensaio para o método PIV. Fonte: Acervo próprio.

FIGURE 1 **Static bending test. a) Conventional method. b) Adaptation of the assay for the PIV method. Source: Own collection.**

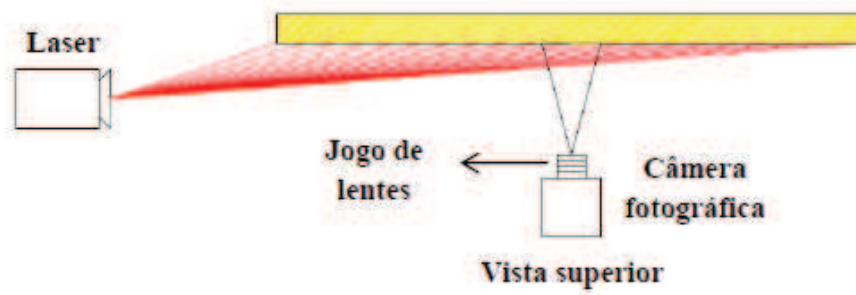


FIGURA 2 Esquema de aplicação do método PIV. Fonte: Acervo próprio.

FIGURE 2 **Layout for the application of PIV method. Source: Own collection.**



FIGURA 3 Corpo de prova de madeira de *Pinus Taeda* pigmentado com tinta preta. Fonte: Acervo pessoal.

FIGURE 3 Specimen of *Pinus taeda* wood pigmented with black ink.

Source: Own Collection.

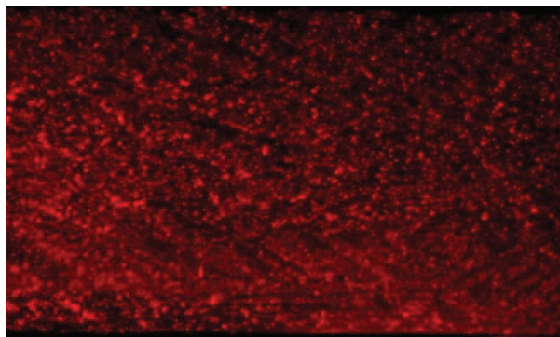


FIGURA 4 Aplicação do PIV na configuração do *sunset laser*. Fonte: Acervo pessoal.

FIGURE 4 Application of PIV in the sunset laser configuration.

Source: Own Collection.

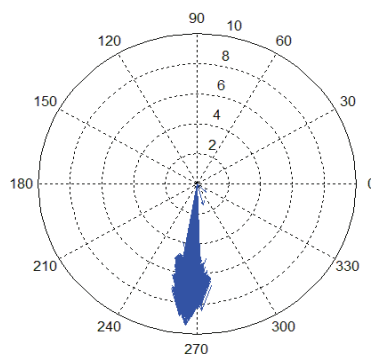


FIGURA 5 Gráfico do corpo de prova número 5 com partículas geradas pelo *laser*.

FIGURE 5 **Graphic of the specimen number 5 with particles generated by laser.**

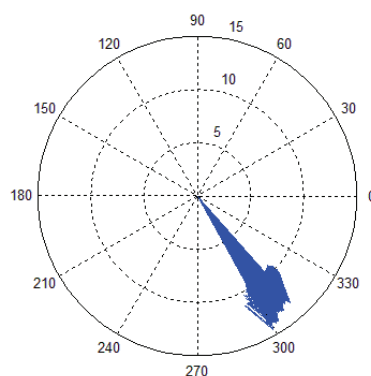


FIGURA 6 Gráfico do corpo de prova número 7 com partículas geradas pela pigmentação com tinta.

FIGURE 6 **Graphic of the specimen number 7 with particles generated by pigmentation with ink.**

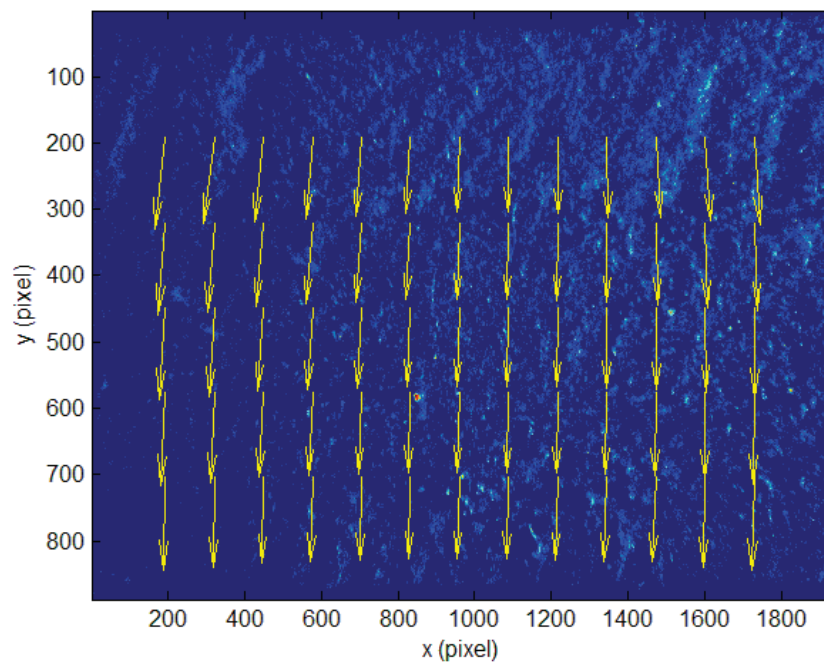


FIGURA 7 Vetores em seus respectivos lugares na superfície do corpo de prova número 5 utilizando *laser*.

FIGURE 7 **Vectors in their respective places on the surface of the specimen number 5 using laser.**

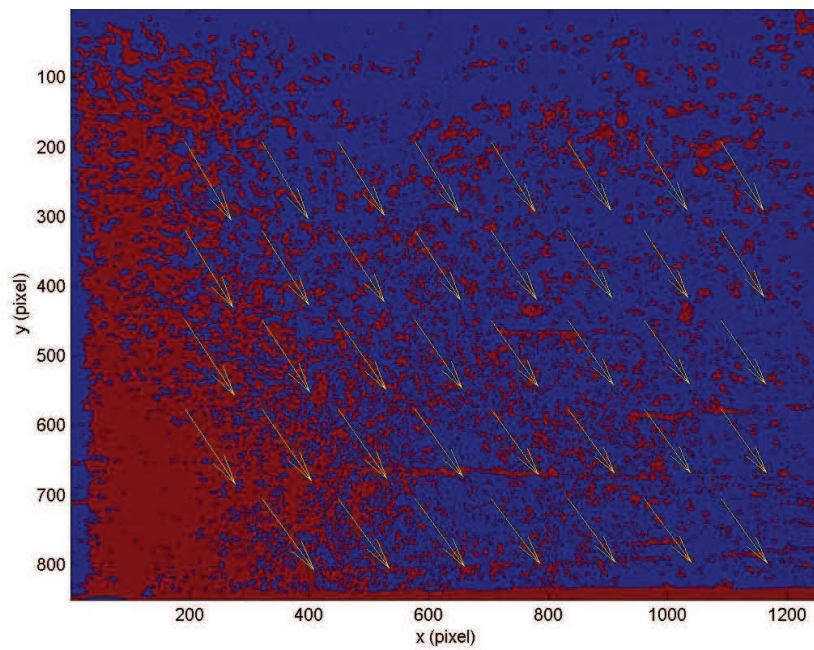


FIGURA 8 Vetores em seus respectivos lugares na superfície do corpo de prova número 7 utilizando a pigmentação com tinta.

FIGURE 8 **Vectors in their respective places on the surface of the specimen number 7 using pigmentation with ink.**

(VERSÃO PRELIMINAR)

**ARTIGO 2 Comportamento de madeira com presença e ausência de nós
em ensaio de flexão estática pela técnica da velocimetria por
imagens de partículas**

RODRIGO ALLAN PEREIRA¹

FRANCISCO CARLOS GOMES²

ROBERTO BRAGA ALVES JÚNIOR³

ELLEM WALESKA NASCIMENTO DA FONSECA⁴

Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003).

¹ Engenheiro Agrícola, Mestrando, Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, rallap.ufla@yahoo.com.br.

RESUMO

A utilização da madeira em sistemas construtivos tem ocorrido desde os primórdios da civilização. Com o crescente aumento da utilização deste material, tornam-se necessários estudos que visem o seu uso racional, uma vez que sua extração pode causar danos ambientais. Um exemplo disso são as madeiras com nós, que eram consideradas inaptas ao uso estrutural até a revisão da norma NBR 7190 no ano de 2010, que propôs uma classificação das madeiras com nós, de acordo com sua posição e tamanho na peça. Com base nisso, este trabalho tem o objetivo de analisar as deformações por meio de método de ensaios não destrutivo e, ainda, descrever o comportamento de madeiras de *Pinus taeda* com presença e ausência de nós, quando submetidos a esforços de flexão estática. Para tal, foi utilizada a Máquina Universal de Ensaio (método convencional de ensaios), e a técnica da Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV), associada ao *sunset laser* (Método não convencional). Este último é considerado um método simples, barato e que não necessita de contato direto com o objeto em estudo. A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar pelo método PIV sinais de ruptura do material ensaiado, antes que os mesmos fossem identificados pela Máquina Universal de Ensaio. A partir dos gráficos gerados pelo PIV, analisou-se ainda, o padrão de deformação dos corpos de prova e a influência dos nós na resistência do material. Por meio da comparação dos resultados obtidos pelas duas técnicas, gerou-se um fator de correlação entre Máquina Universal de Ensaio e PIV.

Palavras-chave: Madeira. Nó. Flexão estática. PIV.

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos materiais utilizados atualmente são homogêneos, como é o caso do aço e dos plásticos. Existem, ainda, os materiais heterogêneos, que têm variação da sua composição ao longo do material. Um exemplo muito importante de material heterogêneo é a madeira, que além de heterogênea é higroscópica, pois permite trocas de água com o ambiente. É também anisotrópica, ou seja, apresenta diferentes propriedades em diferentes direções de eixos.

Quando se trata de resistência dos materiais, um dos fatores mais importantes é a presença de imperfeições ou defeitos naturais. No caso da madeira, essas imperfeições podem ocorrer na forma de descontinuidade das fibras por meio de furos ocasionados por ação de insetos ou microrganismos, deterioração por meio de intempéries. No entanto, a imperfeição mais comum em madeiras é a presença de nós.

Com o aumento da utilização da madeira em todo o mundo, faz-se necessário o uso racional desse material. O estudo da interferência que os nós ocasionam nas propriedades mecânicas deve ser intensificado.

A madeira é um excelente material estrutural, devido a sua alta resistência e baixa densidade, quando comparada a outros materiais. Para uma aplicação segura e com alto desempenho, suas propriedades físicas e mecânicas devem ser estudadas. Para que as características e as propriedades dos materiais sejam conhecidas, é necessária a realização de ensaios que forneçam dados essenciais para o cálculo de parâmetros, que descrevem o comportamento dos materiais quando solicitados a esforços. Como exemplo desses parâmetros, tem-se o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR). Tais parâmetros indicam, respectivamente, a capacidade de se deformarem e ainda

voltarem ao estado inicial e a carga máxima que este material suporta sem entrar em ruptura.

Os métodos mais utilizados para a caracterização das propriedades dos materiais são chamados de métodos convencionais de ensaio, que são aqueles já consagrados e normatizados. Exemplo disso é a máquina universal de ensaios que é capaz de realizar ensaios de tração, compressão e cisalhamento. No entanto, esses ensaios têm contato direto com as amostras e as levam à completa ruptura, torna-se então, oneroso e não sustentável executar ensaios a partir de tais métodos.

Novas metodologias para a caracterização das propriedades dos materiais têm se destacado e mostrado grande eficiência e acurácia. Entre elas estão os métodos de ensaios não destrutivos. Xavier et al. (2004) utilizaram o método de elementos finitos em uma comparação entre as técnicas de ensaios “Iosipescu” e “off-axis” para ensaio de cisalhamento e, a partir deste método não destrutivo, foi possível gerar uma correção para os valores obtidos. Ukyo e Masuda (2004) investigaram a relação de tensão-deformação utilizando o método de correlação de imagens digitais (DIC), Baradit, Aedo e Correa (2006) utilizaram o método de micro-ondas em madeira para a detecção de nós, notou-se ser difícil diferenciar a região dos nós das demais regiões da madeira. Isso ocorreu devido à madeira ser um material de constituição heterogênea. Nagai, Murata e Nakano (2009) aplicaram a modelagem por elementos finitos e compararam com análise experimental para detectar defeitos e nós em madeira, quando solicitadas a esforços de flexão. Petersson (2010) utilizou a técnica de velocimetria por imagem de partículas, para analisar madeiras com nós. Nagai, Murata e Nakano (2011) analisaram a tensão em madeira contendo nós durante ensaio de tração, utilizando a correlação de imagens digitais (DIC), Guindos e Ortiz (2013) empregaram a fotogrametria de baixo custo para análise de rigidez

e validação do método de elementos finitos em madeiras com nós, quando solicitadas à flexão.

Os Ensaios não destrutivos (END's) mais utilizados recentemente utilizam dentre outros, o ultrassom, a radiografia, a análise de vibrações, micro-ondas, emissão acústica e as técnicas óticas, onde se destaca a velocimetria por imagens de partículas (PIV).

As primeiras aplicações comerciais de sistemas de medições baseados na PIV datam 1997, conforme Raffel et al. (2007). Essa técnica consiste em capturar imagens sequenciais em intervalos de tempo capaz de identificar instantaneamente o que ocorre com a amostra, durante determinado ensaio. A iluminação da amostra é feita por meio de emissão de laser e os registros de imagens através de câmeras digitais. O intervalo de tempo de exposição na aquisição da imagem deve ser pequeno o suficiente para congelar o movimento das partículas. A técnica conhecida como velocimetria por imagem de partículas, PIV, é muito empregada em áreas como a da medição de fluxo de partículas, em particular utilizando o *laser* para iluminar as partículas injetadas no fluxo em estudo.

Levando em consideração as vantagens que o método de velocimetria por imagens de partículas (PIV) oferece, como por exemplo, baixo custo dos equipamentos, facilidade de execução, possibilidade de monitoramento de estruturas ao longo do tempo, método não intrusivo (sem contato com o objeto em estudo), rapidez nos resultados, dentre outros, o mesmo será utilizado como forma de caracterização do material madeira da espécie *Pinus taeda* a partir do ensaio de flexão estática, na máquina universal de ensaios.

Este trabalho teve como objetivo mensurar a eficácia do método PIV associado ao *sunset laser* na descrição do comportamento de materiais no decorrer do ensaio, além de comparar as propriedades mecânicas das amostras com nós e livre de imperfeições. Foram verificados os deslocamentos dos grãos

da madeira ao longo do ensaio de flexão e, ainda, comparados os resultados obtidos a partir da Máquina Universal de Ensaios (método convencional de ensaios) e a partir do método PIV (método não convencional de ensaios).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de flexão estática foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaios previamente instrumentada para a aplicação do método PIV associado ao *sunset laser*.

No experimento, foram utilizados 60 corpos de prova de madeira de *Pinus taeda*, 30 deles com presença de nó na sua parte central e os demais, sem a presença de nós ou qualquer outro defeito. Os corpos de prova foram fabricados de acordo com a norma ASTM D143-94 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1995), foram confeccionados com as dimensões de 2,5 x 2,5 x 42 cm.

Para os ensaios, foram utilizados uma câmera fotográfica digital de alta resolução, marca CANON Rabel t3, jogo de lentes para melhor ajuste do foco e zoom, um *laser* de diodo, e a Máquina Universal de Ensaios.

2.1 Ensaio de flexão estática

O ensaio de flexão estática foi conduzido de acordo com a norma ASTM-D143-94 (ASTM, 1995)e, a partir do mesmo, foi possível obter informações como módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR). Para o método PIV, uma adaptação foi necessária na montagem do ensaio. Como o método PIV trabalha com o deslocamento dos grãos do material, é necessário que a área em estudo não se desloque em nenhum dos pontos de apoio. Nesse caso, o ponto de aplicação de carga no ensaio de flexão estática foi

invertido e se tornou o ponto de apoio, enquanto os dois pontos de apoio se tornaram agentes de aplicação de carga. A Figura 1 exemplifica a adaptação do ensaio de flexão estática.

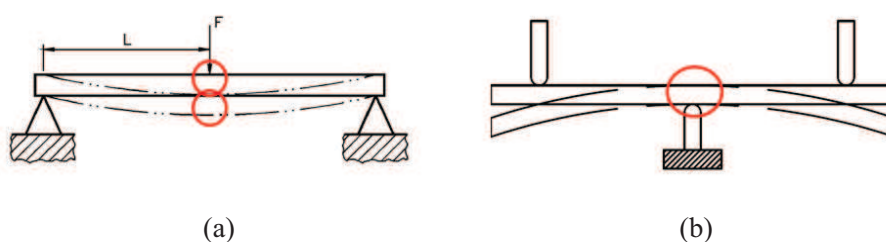


FIGURA 1 Ensaio de flexão estática. a) Método convencional. b) Adaptação do ensaio para o método PIV

Fonte: Acervo próprio.

2.2 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)

O processo de aplicação do método PIV associado ao *sunset laser*, ocorre basicamente com o posicionamento do *laser* de forma com que seu feixe de luz ilumine paralelamente a superfície do corpo de prova, gerando assim, regiões com maior e menor intensidade de luz. Isso ocorre devido às imperfeições da superfície do material. Tal fenômeno é denominado de *sunset laser*. As irregularidades na superfície do corpo de prova juntamente com o feixe de luz do laser, serão os agentes criadores dos grãos na madeira. É necessário ainda, que a câmera digital seja posicionada perpendicularmente ao centro do corpo de prova, como mostra a Figura 2.

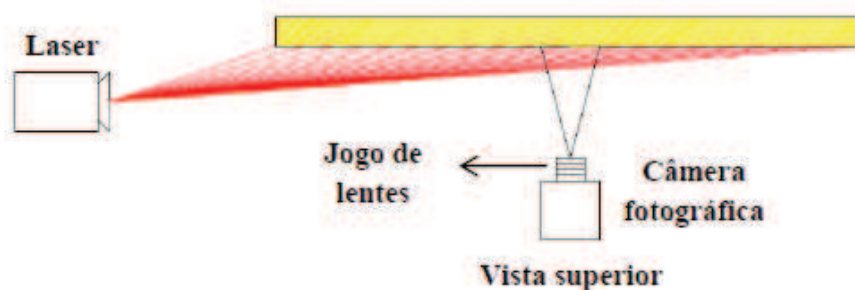


FIGURA 2 Esquema de aplicação do método PIV

Fonte: Acervo próprio.

O processo completo consiste em subdividir a imagem em células de interrogação; calcular o campo de intensidade no tempo de $t+\Delta t$ para uma célula de interrogação; calcular a correlação entre imagens a partir dos campos de intensidade e repetir o processo para cada célula de interrogação.

É, então, iniciado o ensaio e capturadas as imagens em um intervalo regular de tempo (20s). Não é exercida carga sobre a primeira imagem capturada para servir de testemunha para as posteriores. Após a captura das imagens, as mesmas foram trabalhadas no *Software Image J* (Livre) com o intuito de trabalhar apenas com a área de interesse e de transformar as imagens em matrizes de frequência RGB (*red, green e blue*). Esse processo favorece a análise das imagens pelo método PIV, pois evidencia os pontos com maior intensidade de luz, também chamados de grãos. Utilizou-se a matriz de frequência *green*, pois foi aquela que proporcionou os melhores resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Deslocamento dos grãos da madeira

O método PIV traz ainda uma abordagem do deslocamento dos grãos da madeira em toda a extensão do corpo de prova. Pode ser observado na Figura 3, o que ocorreu com o corpo de prova número 5, sem nó.

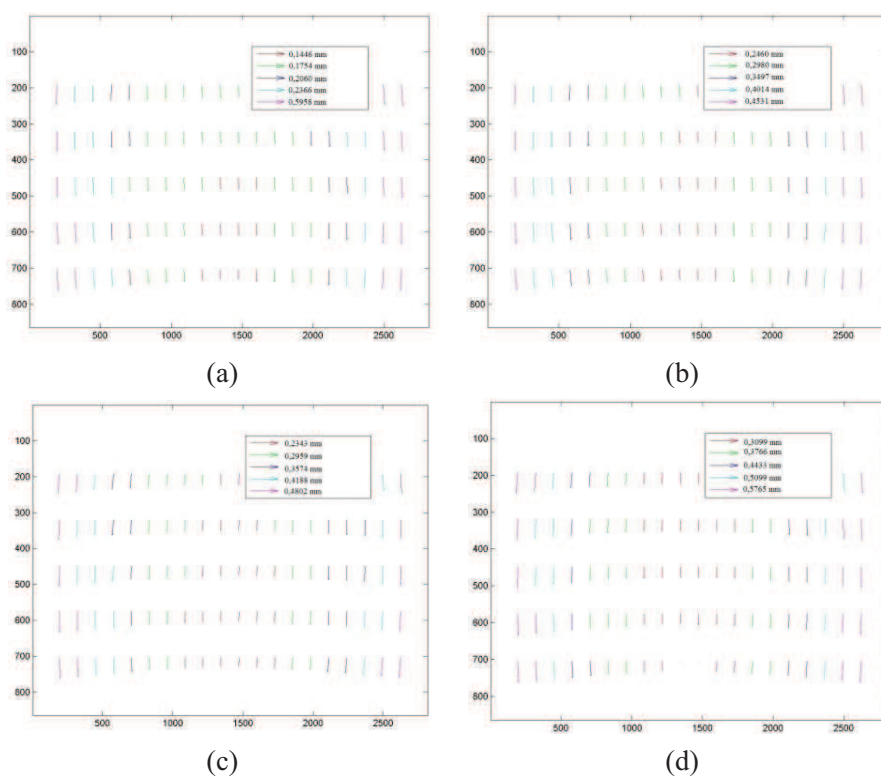


FIGURA 3 Níveis de deformação ao longo do corpo de prova 5 sem nó. (a) Tempo de ensaio de 60s e carga de 424,8 N. (b) Tempo de ensaio de 100s e carga de 714,2 N. (c) Tempo de ensaio de 120s e carga de 843,7 N. (d) Tempo de ensaio de 140s e carga de 968,2 N

Nota-se que os eixos “x” e “y”, dos gráficos apresentados acima (Figura 5) foram fornecidos em medidas de pixels. Para a conversão de pixel para milímetros, adotou-se o fator de 0,030775 mm/pixel. Com isso, chegou-se aos deslocamentos apresentados nestes gráficos em milímetros.

Observa-se por meio do direcionamento dos vetores da Figura 3, que na parte superior da amostra ocorreu afastamento dos grãos, no sentido do centro do corpo de prova para a extremidade, o que caracteriza esforços de tração. Na parte inferior da amostra, observou-se que os vetores estão direcionados da extremidade para o centro, o que indica esforços de compressão.

Nota-se que o corpo de prova se deforma mais nas suas extremidades, e que na parte central, não ocorrem grandes deslocamentos até o rompimento total da amostra.

Com 60 segundos de ensaio e carga aplicada de 424,8 N (Figura 3a), observa-se que o deslocamento das partículas em quase todas as partes da amostra é aproximadamente 0,2 mm. Somente na extremidade da amostra, os deslocamentos foram da ordem de 0,5 mm. No decorrer do ensaio, inicia-se o aparecimento de diferentes faixas de deslocamento, ou seja, o corpo de prova é dividido no gráfico em diferentes cores as quais representam diferentes valores de deslocamento.

Na Figura 3d, com 140s decorridos de ensaio e carga aplicada de 968,2N, os deslocamentos dos grãos da madeira são maiores que no início do ensaio (Figura 3a). Isso demonstra a capacidade do método PIV em acompanhar o comportamento do material, em diversas etapas do carregamento.

Para representar as amostras com presença de nós, escolheu-se aleatoriamente o corpo de prova número 9. É apresentado na Figura 4, o deslocamento dos grãos da madeira na superfície deste corpo de prova no decorrer do ensaio de flexão estática obtidos pelo método PIV.

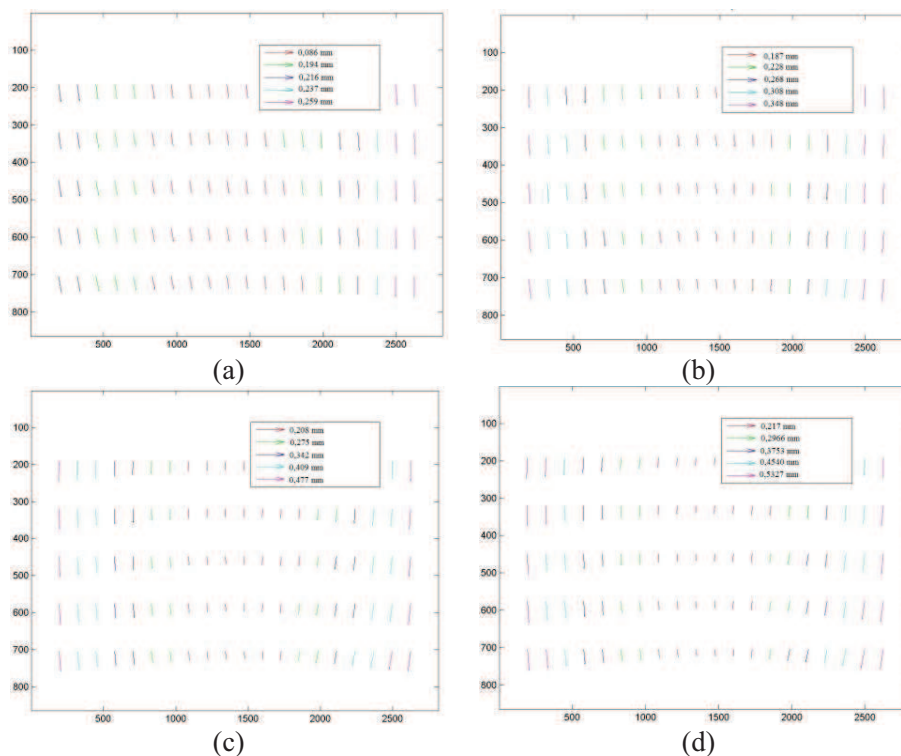


FIGURA 4 Níveis de deformação ao longo do corpo de prova 9 com nó. (a) Tempo de ensaio de 40s e carga de 162 N. (b) Tempo de ensaio de 80s e carga de 356,1 N. (c) Tempo de ensaio de 120s e carga de 535,2 N. (d) Tempo de ensaio de 140s e carga de 617,2 N. (e) Tempo de ensaio de 180s carga de 754,2 N. (f) Tempo de ensaio de 240s. e carga de 880 N

O mesmo comportamento observado na amostra sem nó foi encontrado na amostra com presença de nó (Figura 4). Isso indica que apesar de resistir menos a esforços de flexão estática, madeiras com presença de nós se comportam de maneira semelhante às madeiras isentas de nós, durante sessão de carregamento.

Vale ressaltar que os dois corpos de prova apresentados, representam perfeitamente os demais quanto ao seu comportamento.

3.2 Fator de correção

Durante o processamento dos dados, foi observado que os deslocamentos ocorridos nos corpos de prova, foram diferentes pelo método convencional de ensaios (Máquina Universal de Ensaios) e pelo método PIV. Por meio de análise mais detalhada, observou-se que até determinado ponto do ensaio, as deformações ocasionadas pela Máquina Universal de Ensaios eram três vezes maiores que os deslocamentos obtidos pelo método PIV. O tempo de ensaio até onde essa conversão pode ser aplicada é o mesmo tempo que o método PIV acusou ruptura das fibras do material e consequente perda de correlação entre imagens consecutivas.

É ilustrado na figura 5, os dados dos deslocamentos obtidos pelos dois métodos relativos ao corpo de prova 4 sem presença de nós.

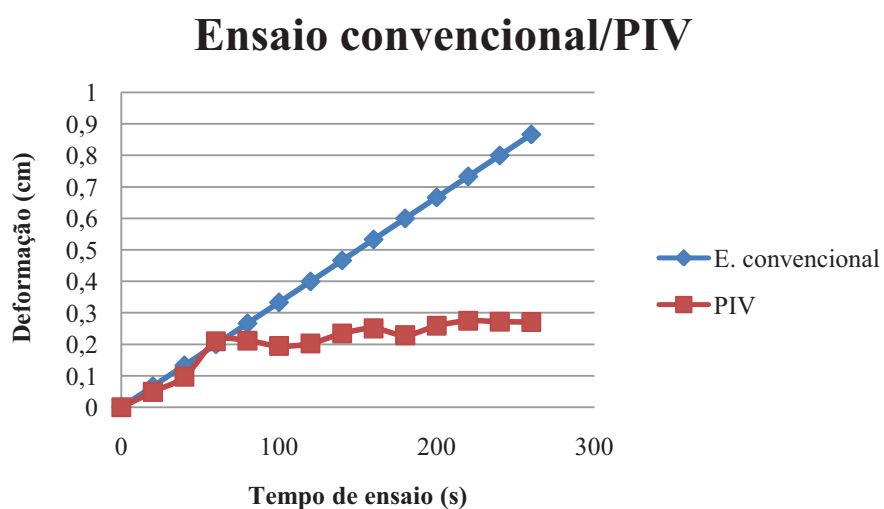


FIGURA 5 Comparação entre deformações pelo método PIV e método convencional de ensaio para o corpo de prova 4 sem nó

Pode ser observado na Figura 5 a correlação entre as curvas PIV e MUE caminham até o tempo de 60 segundos. Neste mesmo instante o método PIV acusa que houve perda de correlação entre imagens consecutivas.

É comparado na Figura 6 os deslocamentos obtidos pelos dois métodos relativos ao corpo de prova 8 com presença de nós.

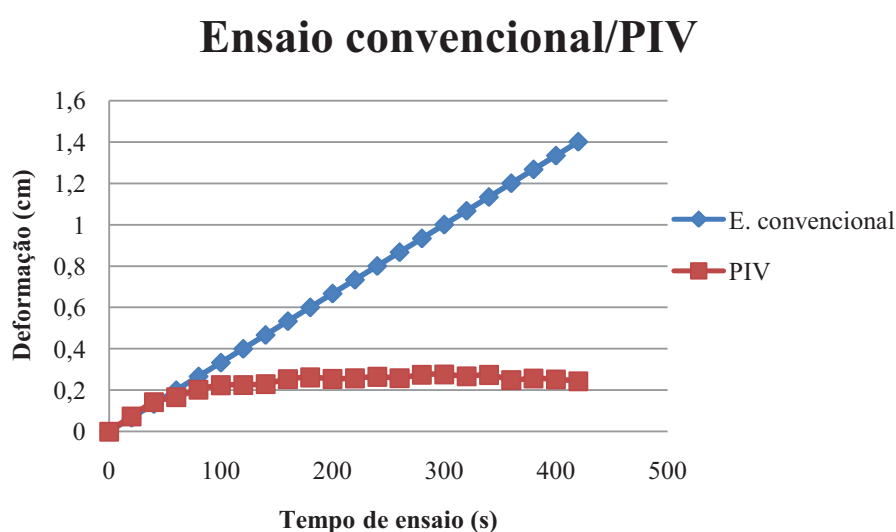


FIGURA 6 Comparação entre deformações pelo método PIV e MUE para o corpo de prova 8 com nó

A não correlação das curvas ocorreu a partir do tempo 80 segundos, conforme Figura 6.

Com os resultados obtidos nas Figuras 5 e 6, percebe-se que o PIV é uma ferramenta precisa para medições de pequenos deslocamentos, ou seja, a curva de deformação dos corpos de prova analisados pelo PIV, coincide com a curva de deformação das amostras obtida pelo método convencional de ensaios (Máquina Universal de Ensaios), somente no início do ensaio de flexão estática. As amostras analisadas indicaram que o método PIV tem uma boa correlação

entre imagens consecutivas, principalmente na região elástica do material ensaiado.

4 CONCLUSÕES

Concluiu-se que o método PIV é confiável e preciso na caracterização de materiais, principalmente quando aliado a técnica *sunset laser*.

Pode-se afirmar que, por meio da comparação dos resultados obtidos pelo método convencional de ensaios (Máquina Universal de Ensaios), que a utilização do método não convencional (PIV), pode ser aplicada para mensurar deslocamentos em materiais submetidos a esforços de flexão.

Em ensaios de flexão, o fator de conversão Ensaio Convencional/PIV é igual a três, até a ruptura do material.

Madeiras com nós apresentaram menores resistências quando comparadas às isentas de nós, no entanto para determinados usos e exigências, as mesmas podem ser empregadas como material estrutural.

Nos ensaios de flexão estática realizados com monitoramento das deformações na região crítica da força aplicada, por meio da iluminação *sunset laser*, a técnica PIV previu a ruptura da madeira antes que o processo fosse observado na Máquina Universal de Ensaios. Dessa forma, a técnica PIV permite a análise da estrutura em uso, observando as normas de segurança e tomando como referência os estados limites.

Comparando os deslocamentos relativos à Máquina Universal de Ensaios e o método PIV, pode-se afirmar que o método PIV fornece uma avaliação mais consistente, referente às deformações elásticas em corpos de prova submetidos à flexão estática, já que é possível com esse método, um acompanhamento minucioso da superfície do material em estudo.

Concluiu-se com o presente trabalho que o método PIV apresenta uma vantagem relevante sobre outros métodos para avaliação de estruturas em uso, como pontes, telhados e prédios históricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam os seus agradecimentos a CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

**Behavior of wood with presence and absence of knots in static bending test
by the technique of Particle Image Velocimetry**

ABSTRACT

The use of wood in construction systems has occurred since the beginning of civilization. With the increasing use of this material, studies that aim at its rational use become necessary, since its extraction can cause environmental damage. An example of this are the woods with knots that were considered unfit for structural use until the revision of the NBR 7190 standard in 2010 that proposed a classification of the woods with knots according to their position and size in the piece. Based on this, this paper aims to analyze the deformations through the non-destructive testing method and also describe the behavior of *Pinus taeda* wood with and without knots, when submitted to static bending efforts. To this end, a Universal Testing Machine (conventional test method) was used, and the technique of Particle Image Velocimetry (PIV) associated with the sunset laser (unconventional test method). The latter is considered a simple and inexpensive method that does not require direct contact with the object under study. From the graphs generated by PIV, the deformation pattern of the specimens was analyzed and how much the knots influence the strength of the material. Through the comparison of results obtained by the two techniques, a correlation factor between the Universal Testing Machine and PIV was generated. It was concluded that the use of the PIV method is indicated for field conditions without the need to destroy the material analyzed.

Keywords: Wood. Knot. Static bending. PIV.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard methods of testing small clear specimens of timber: D 143-94**. Philadelphia, 1995.31 p.
- BARADIT, E.; AEDO, R.; CORREA, J. Knots detection in wood using microwaves. **Wood Science and Technology**, Zurich, v. 40, n. 2, p. 118-123, 2006.
- GUINDOS, P.; ORTIZ, J. The utility of low-cost photogrammetry for stiffness analysis and finite-element validation of wood with knots in bending. **Biosystems Engineering**, London, v. 114, n. 2, p. 86-96, 2013.
- NAGAI, H.; MURATA, K.; NAKANO, T. Defect detection in lumber including knots using bending deflection curve: comparison between experimental analysis and finite element modeling. **Journal of Wood Science**, London, v. 55, n. 3, p. 169-174, 2009.
- NAGAI, H.; MURATA, K.; NAKANO, T. Strain analysis of lumber containing a knot during tensile failure. **Journal of Wood Science**, London, v. 57, n. 2, p. 114-118, 2011.
- PETERSSON, H. Use of optical and laser scanning techniques as tools for obtaining improved fe-input data for strength and shape stability analysis of wood and timber. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTATIONAL MECHANICS, 5., 2010, Paris. **Anais...** Paris: ECCM, 2010. 1 CD-ROM.
- RAFFEL, M. et al. **Physical and technical background**. Berlin: Springer, 2007.77 p.
- UKYO, S.; MASUDA, M. Investigation of the true stress-strain relation in shear using the digital image correlation method. **Journal of the Japan Wood Research Society**, Tokyo, v. 50, n. 3, p. 146-150, 2004.
- XAVIER, J. C. et al. A comparison between the Iosipescu and off-axis shear test methods for the characterization of Pinus Pinaster Ait. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Kidlington, v. 35, n. 7, p. 827-840, 2004.