



RODRIGO ALLAN PEREIRA

**VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE
PARTÍCULAS APLICADA AO ESTUDO DE
DEFORMAÇÕES EM MADEIRA SERRADA E
PAINÉIS DE MADEIRA**

LAVRAS - MG

2017

RODRIGO ALLAN PEREIRA

**VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS APLICADA AO
ESTUDO DE DEFORMAÇÕES EM MADEIRA SERRADA E
PAINÉIS DE MADEIRA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções Rurais e Ambiente, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Francisco Carlos Gomes

Coorientador

Dr. Roberto Alves Braga Júnior

LAVRAS - MG

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Pereira, Rodrigo Allan.

Velocimetria por imagem de partículas aplicada ao estudo de deformações em madeira serrada e painéis de madeira / Rodrigo Allan Pereira. - 2017.

160 p. : il.

Orientador(a): Francisco Carlos Gomes.

Coorientador(a): Roberto Alves Braga Júnior

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Técnicas não destrutivas. 2. PIV. 3. Deformações. 4. Módulo de elasticidade. I. Gomes, Francisco Carlos. II. Braga Júnior, Roberto Alves. III. Título.

RODRIGO ALLAN PEREIRA

**VELOCIMETRIA POR IMAGENS DE PARTÍCULAS APLICADA AO
ESTUDO DE DEFORMAÇÕES EM MADEIRA SERRADA E
PAINÉIS DE MADEIRA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções Rurais e Ambiente, para a obtenção do título de Doutor.

Aprovada em 17 de janeiro de 2017.

Dr. Holmer Savastano Júnior	USP
Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein	DCF/UFLA
Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães	DEG/UFLA
Dr. Tadayuki Yanagi Junior	DEG/UFLA

Dr. Francisco Carlos Gomes
Orientador

Dr. Roberto Alves Braga Júnior
Coorientador

**LAVRAS - MG
2017**

A DEUS.

*Por me dar uma família abençoada
e por estar ao meu lado em todos
os momentos de minha vida.*

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

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

Ao professor e orientador, Francisco Carlos Gomes, pelo apoio, pela confiança e amizade, tornando esta etapa mais fácil e prazerosa de ser executada.

Ao professor e coorientador, Roberto Braga, pelas diretrizes e pelos encaminhamentos que muito engrandeceram este trabalho.

Ao Fernando Pujaiço, pelo auxílio em todas as etapas deste trabalho.

Ao professor Lucas Henrique, pela amizade e pela ajuda prestada.

Ao professor Rafael Farinassi, pela disponibilidade em auxiliar em todos os procedimentos necessários.

Ao professor Tales Fernandes, pela ajuda na análise estatística dos dados.

Aos alunos de iniciação científica envolvidos nesta pesquisa, Carlos Henrique, Eduardo, Jeferson e João Manoel.

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

Aos meus pais José Ailton e Cleonice e minha irmã Stela, pelo amor e apoio incondicional.

A minha namorada Larissa, pelo amor, incentivo e pela presteza em ajudar sempre que necessário.

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

Às secretárias Helem e Fernanda, pela dedicação e pelo carinho com que desenvolvem seu trabalho.

A todos os amigos, professores, técnicos e alunos do Departamento de Engenharia (DEG) da Universidade Federal de Lavras.

Agradeço a Deus por tudo que tem me proporcionado e por ter me dado forças para concluir mais esta etapa.

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

*“Faça o teu melhor na condição que você tem,
enquanto você não tiver condições melhores
para fazer melhor ainda.”*

Mario Sérgio Cortella.

RESUMO GERAL

O emprego dos materiais estruturais construtivos requer o profundo conhecimento de suas características, bem como métodos de avaliação de suas propriedades físicas e mecânicas, para seu melhor desempenho. Sendo assim, torna-se importante a busca por metodologias de ensaios capazes de descrever o comportamento dos materiais. O objetivo neste estudo foi aplicar a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) e verificar seu potencial como uma ferramenta para medição de deformações e caracterização dos materiais. A técnica não destrutiva de ensaios PIV, possui como vantagem a medição indireta das deformações, com a possibilidade de aplicação em campo e de não causar danos ao material. A técnica PIV foi aplicada em madeira serrada de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis* e painéis de madeira Compensado, LVL (*Laminated veneer lumber*) e OSB (*Oriented strand board*) em ensaio de flexão estática. Verificou-se por meio de comparação com um método convencional de ensaio, que a técnica PIV foi capaz de medir os deslocamentos ocorridos nos ensaios de flexão estática em diferentes regiões dos corpos de prova. Aplicando-se o teste estatístico “t de *Student*” com 1% de confiança verificou-se que alguns valores de deformação foram iguais nas duas técnicas aplicadas e as medições que não apresentaram igualdade estatística, obtiveram uma equação de correção ($y = ax + b$) com valores de “a” próximos de 1 (maior valor de $a = 0,874$) e valores de b próximos a 0 (maior valor de $a = 0,094$). Em relação à caracterização dos materiais, os valores de módulo de elasticidade encontrados pela técnica PIV foram iguais estatisticamente àqueles encontrados pela metodologia convencional em todos os tipos de materiais ensaiados. Concluiu-se com o presente estudo que a técnica PIV é uma ferramenta precisa e confiável para medição de deslocamentos em peças submetidas a carregamentos, sendo também capaz de caracterizar diferentes materiais, com precisão semelhante às técnicas tradicionalmente utilizadas.

Palavras-chave: Técnicas não destrutivas. PIV. Deformações. Módulo de elasticidade.

GENERAL ABSTRACT

The use of constructive structural materials requires a deep knowledge of its characteristics, as well as methods of evaluating its physical and mechanical properties, for its better performance. Thus, it becomes important the search for methodologies of tests capable of describing the behavior of the materials. The objective of this study was to apply the particle image velocimetry (PIV) technique and verify its potential as a tool for measuring deformation and characterization of the materials. The non-destructive technique of PIV tests has the advantage of indirect measurement of deformations, with the possibility of field application and of not causing damage to the material. The PIV technique was applied to sawed wood of *Pinus oocarpa*, and *Eucalyptus grandis*, plywood panels, LVL (Laminated veneer lumber) and OSB (Oriented strand board) in static bending test. It has been found through comparison to a conventional test method that the PIV technique was able to measure the displacements occurred in the static bending tests in different regions of the samples. By applying the Student's t-test with 1% confidence, it was verified that some values of deformation were equal in the two applied techniques and the measurements that did not present statistical equality, obtained a correction equation ($y = ax + b$) with values of "a" close to 1 (highest value of $a = 0.874$) and values of "b" close to 0 (highest value of $a = 0.094$). Regarding the characterization of the materials, the values of modulus of elasticity found by the PIV technique were statistically the same as those found by the conventional methodology in all types of materials tested. It was concluded with the present study that the PIV technique is an accurate and reliable tool for measuring displacements in load-bearing parts and is also capable of characterizing different materials, with precision similar to the techniques traditionally used.

Keywords: Non-destructive techniques. PIV. Deformations. Modulus of elasticity.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1	Representação gráfica dos três eixos principais de uma peça de madeira.....	20
Figura 2	Ensaio com equipamento de Ultrassom.	36
Figura 3	Configuração do ensaio utilizando o método de vibração transversal.....	39
Figura 4	Aplicação do <i>Stress wave timer</i>	41
Figura 5	Equipamentos de medição Pilodyn® e Resistograph®.....	44
Figura 6	Diferentes tipos de marcadores.....	52
Figura 7	Janelas de interrogação com diferentes tamanhos.	53
Figura 8	Influência do tamanho da janela de interrogação no deslocamento angular.....	53
Figura 9	Diferentes configurações de <i>step size</i>	54
Figura 10	Espaço delimitado para busca de uma ROI em imagens consecutivas.....	55

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

Figure 1	Selected WSIZE and followed path.	85
Figure 2	System setup description.	86
Figure 3	Surface of the samples with the 3 different treatments.	87
Figure 4	Displacement test with WSIZE = 16.....	94
Figure 5	Displacement test with WSIZE = 32.....	95
Figure 6	Displacement test with WSIZE = 64.....	96
Figure 7	Loss of correlation in relation to the distance from the origin to a WSIZE.....	97
Figure 8	PCC value for a rotated analysis region.	98
Figure 9	Region of analysis with a WSIZE = 32 and T = 0.67	102
Figure 10	Displacement tests over the analysis region.	104
Figure 11	Rotation tests over the selected analysis regions.	105

Figure 12	Tracking results of PIV method over the selected analysis regions, with $l_0 = 4$ and $T = 0.6$	106
Figure 13	Tracking results of PIV method over the selected analysis regions, with $l_0 = 1$ and $T = 0.82$	107

ARTIGO 2

Figura 1	Vista geral da Máquina Universal de Ensaio, a instrumentação do ensaio de flexão estática para a aplicação da técnica PIV e os materiais ensaiados.	120
Figura 2	Marcadores inseridos na superfície dos materiais ensaiados.....	121
Figura 3	Deslocamento das janelas de interrogação durante os ensaios.	125
Figura 4	Comparação dos valores de deslocamento obtidos pela técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) e pelos relógios comparadores (RC).	127
Figura 5	Regressão linear dos valores de deslocamento obtidos pela técnica PIV (eixo x) e pelo relógio comparador (eixo y).	130

ARTIGO 3

Figura 1	Vista geral da Máquina Universal de Ensaio e a instrumentação do ensaio de flexão estática para a aplicação da técnica PIV (a) e os corpos de provas utilizadas no experimento (b).....	147
Figura 2	Marcadores inseridos na superfície dos materiais ensaiados.....	148
Figura 3	Comparação dos módulos de elasticidade obtidos pela técnica PIV e pelos relógios comparadores.....	152

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

Table 1	Valores de módulo de elasticidade e módulo de ruptura encontrados na literatura.....	32
---------	--	----

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

Table 1	Beam deformation measure with the dial watches.....	104
Table 2	Error in the measure of beam deformation with the PIV technique when compared to the dial watches.	107

ARTIGO 2

Tabela 1	Número de corpos de prova para cada material ensaiado	116
Tabela 2	Equações médias de correção para cada tipo de material.....	132
Tabela 3	Análise estatística dos resultados pelos relógios comparadores e pela técnica PIV nas três regiões de análise.	134

ARTIGO 3

Tabela 1	Número de corpos de prova para cada material ensaiado	144
Tabela 2	Comparação estatística dos módulos de elasticidade obtidos pelo método convencional e pela técnica PIV.	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
A_0	Região de análise inicial
α_i	i-ésimo ângulo
\forall	Para todo
\in	Pertence
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celcius
cm	Centímetros
cP	Centipoise
d	Deformação
d_{\max}	Distância máxima
E	Módulo de elasticidade
g.m^{-2}	Gramas por metro quadrado
H_0	Hipótese estatística
Hz	Hertz
i	Linha-pixel
i_0	Linha-pixel inicial
j	Coluna-pixel
j_0	Coluna-pixel inicial
kgf.cm^{-2}	Quilograma-força por centímetro quadrado
L	<i>Search length</i>
l_0	<i>Step length</i>
M	Número de imagens
MPa	Mega Pascal
N	Número de pontos
PA	Padrão de pontos A
PB	Padrão de pontos B
PC	Padrão de pontos C
P_m	m-ésima imagem
R^2	Coefficiente de determinação
RC	Relógio comparador
t	Tempo
T_v	<i>Threshold value</i>
WSIZE	Windows size
\mathbb{Z}^+	Números inteiros positivos
μ_{PIV}	Média pela técnica PIV
$\mu_{\text{Relógio comparador}}$	Média pelo relógio comparador
T	Intervalo de tempo
ρ	Função correlação

LISTA DE SIGLAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamic</i>
DCF	Departamento de ciências florestais
DIC	<i>Digital Imagem Correlation</i>
ECT	<i>Electrical capacitance tomography</i>
FF	Fenol-formaldeído
GPS	<i>Global Positioning System</i>
LDA	<i>Laser Doppler anemometry</i>
LDV	<i>Laser Doppler velocimetry</i>
LSV	<i>Laser speckle velocimetry</i>
LVL	<i>Laminated veneer lumber</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MDI	Diisocianato de difenilmetano
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIRS	<i>Near infrared spectroscopy</i>
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PCC	<i>Pearson Correlation Coefficient</i>
PIV	<i>Particle images velocimetry</i>
PTV	<i>Particle tracking velocimetry</i>
UEPAM	Unidade experimental em painéis de madeira
UTM	<i>Universal Testing Machines</i>

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE

1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Madeira	20
2.2	Madeiras de reflorestamento	21
2.3	Produtos reconstituídos à base de madeira	23
2.4	Propriedades da madeira	26
2.4.1	Propriedades físicas	26
2.4.2	Propriedades mecânicas	28
2.5	Técnicas de ensaio	29
2.5.1	Ensaio destrutivo	30
2.5.2	Ensaio não destrutivo (END's)	34
2.5.2.1	Ultrassom	35
2.5.2.2	Vibração longitudinal e transversal	38
2.5.2.3	Strees wave timer	41
2.5.2.4	Pilodyn® e Resistograph®	44
2.5.2.5	Raio-X	45
2.5.2.6	Outras técnicas não destrutivas	47
2.6	Velocimetria por imagens de partículas	49
2.6.1	Procedimento experimental	50
2.6.1.1	Tamanho e distribuição dos marcadores	51
2.6.1.2	Tamanho da janela de interrogação	52
2.6.1.3	Passo de busca (step size)	53
2.6.1.4	Espaço de busca	54
2.6.1.5	Limiar de semelhança	55
2.6.2	Técnica PIV aplicada em fluidos e gases	55
2.6.3	Técnica PIV aplicada em materiais sólidos	57
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS	63

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

Parameters criteria for PIV analysis applied in the load study of beams	79
--	----

ARTIGO 2

Análise das deformações e da elasticidade em madeiras submetidas à ensaio de flexão estática utilizando a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) Parte 1..... 111

ARTIGO 3

Análise das deformações e da elasticidade em madeiras submetidas à ensaio de flexão estática utilizando a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) Parte 2..... 139

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A produção e a utilização de diferentes tipos de materiais no campo industrial e da construção civil têm 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.

Em geral, as metodologias e técnicas convencionais utilizadas para caracterização e avaliação dos materiais necessitam de equipamentos específicos e condições ambientais controláveis, como ocorre nos laboratórios. No entanto, quando é necessário avaliar e monitorar as condições de uma peça em uso, torna-se inviável a utilização desse tipo de técnica de ensaio. Gouvêa et al. (2011) afirmam que os problemas dessas técnicas de ensaio estão ligados à lentidão nos resultados, necessidade de grande número de amostras e alto custo da operação.

Uma opção frente às situações que demandam medições em campo ou em situações restritivas são as técnicas não destrutivas de ensaio. Grande parte destas técnicas utiliza princípios físicos intrínsecos aos materiais para inferir sobre suas respectivas características.

As vantagens da utilização das técnicas não destrutivas de ensaio são a não necessidade de contato com o material ensaiado e a possibilidade de utilização desse material após o término dos ensaios. Esse tipo de metodologia agrega ainda outros fatores favoráveis à sua utilização como rapidez dos ensaios e resultados, possibilidade de aplicação em campo, equipamentos com valor de mercado mais acessível, custo mais baixo dos procedimentos e ainda a classificação rápida das peças na indústria.

Entre as técnicas de ensaio utilizadas para caracterizar mecanicamente os diversos tipos de materiais, principalmente a madeira e seus derivados, destaca-se o *stress wave timer* (DE PAULA et al., 2016; FREITAS; GONCALEZ; DEL MENEZZI, 2016), o ultrassom (MELO; DEL MENEZZI, 2016; RIBEIRO et al., 2016), técnicas vibracionais (SEGUNDINHO et al., 2012, 2013), entre outras.

Tendo em vista que grande parte das metodologias de ensaio para caracterização dos materiais não fornece resultados referentes à deformação e deslocamentos em situações de carregamento, torna-se necessária a busca por técnicas capazes de fornecer tais resultados.

Nesse sentido, a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) mostra-se eficaz para mensurar deformações em situações em que ocorre variação entre a posição inicial e final de um objeto.

A técnica PIV foi desenvolvida originalmente no campo dos fluidos e gases, com diversas aplicações nesse campo de estudo (BANGALEE et al., 2013; XU et al., 2017). Alguns autores têm estudado a aplicação dessa metodologia em materiais sólidos para verificação de deformações e obtenção de propriedades mecânicas (BRAGA JÚNIOR et al., 2015; MAGALHÃES; BRAGA; BARBOSA, 2015; PEREIRA, 2014; SOUZA et al., 2014).

A técnica PIV fornece as deformações ocorridas em determinado objeto por meio da análise de imagens sequenciais capturadas durante a fase de carregamento responsável pela deformação ocorrida. Essas imagens são processadas por um algoritmo computacional que rastreia a região de interesse e fornece o seu deslocamento vetorial do início ao fim do carregamento.

A utilização de uma técnica capaz de medir deslocamentos e caracterizar materiais, como é o caso da técnica PIV, é importante no sentido de melhorar as condições de análise e monitoramento de peças com funções estruturais empregadas em máquinas, equipamentos e estruturas civis.

Diante da necessidade de se avaliar os diferentes tipos de materiais com função estrutural, destaca-se como material construtivo a madeira, que devido a sua natureza anisotrópica possui comportamento mecânico mais complexo que os materiais isotrópicos, como o aço e o concreto, por exemplo. Sendo assim, se uma metodologia de ensaio for capaz de avaliar e caracterizar o comportamento de peças de madeira em situações de carregamento, assume-se que o mesmo ocorrerá com a análise de materiais menos complexos.

O objetivo neste estudo foi avaliar o potencial da técnica PIV como ferramenta de medição de deslocamentos e deformações, caracterização de materiais, bem como o estudo detalhado de todos os seus parâmetros. Entre os objetivos específicos estão o estudo detalhado dos parâmetros da técnica PIV (*window size*, *step size*, braço de busca, limiar de semelhança e padrões de marcadores) e a influência que estes provocam no resultado final, a análise das deformações ocorridas em madeira serrada (*Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis*) e painéis reconstituídos de madeira (Compensado, LVL e OSB) e ainda a caracterização desses materiais por meio da obtenção de seus módulos de elasticidade utilizando a técnica PIV.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

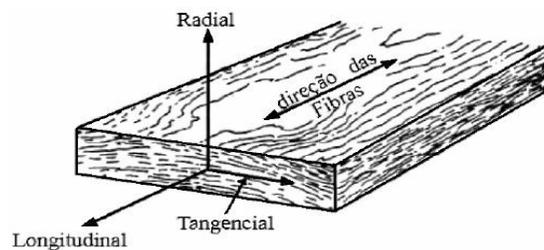
2.1 Madeira

A madeira é um material de origem biológica, sendo elaborada por um organismo vivo, que é a árvore. Esse material é formado por uma matéria heterogênea e anisotrópica que interage com as variações de umidade do ambiente (higroscopicidade).

A constituição do lenho ou madeira ocorre por meio de pequenos elementos celulares que desempenham diferentes funções. Sua estrutura anatômica é característica de cada espécie florestal e pode também variar de acordo com a idade e as condições ambientais de crescimento (BURGER; RICHTER; 1991).

Quando se trata de resistência e da rigidez da madeira, um dos principais fatores a serem considerados é a anisotropia desse material. De acordo com Oliveira, Tomazello Filho e Fiedler (2010) uma das causas das propriedades anisotrópicas da madeira é a orientação das micelas, fibrilas e fibras que formam o tecido lenhoso. Dessa forma o comportamento desse material varia de acordo com seus três eixos, ou seja, longitudinal em relação ao caule, radial em relação aos anéis de crescimento e tangencial aos anéis de crescimento (IEEE STANDARD ASSOCIATION – IEEE-SA, 1991), conforme Figura 1.

Figura 1 Representação gráfica dos três eixos principais de uma peça de madeira.



Fonte: Adaptado de Smith (1990 citado por GODOY, 2007).

A experimentação e o uso de técnicas mais apuradas e precisas fazem com que algumas características da madeira como a variabilidade e anisotropia possam ser estudadas de forma mais eficaz, melhorando assim seu uso posterior.

Na construção civil, a madeira é um material com grande aceitabilidade devido, principalmente, às suas propriedades físicas e mecânicas. Características como relação resistência-massa, facilidade de processamento em obra e ainda ser um recurso renovável, fazem da madeira um dos materiais mais importantes para a sociedade moderna (DIAS, 2000).

2.2 Madeiras de reflorestamento

Devido às pressões exercidas sobre as florestas nativas, além do elevado consumo de matéria-prima pelas indústrias, a área de florestas plantadas vem crescendo cada dia mais. As florestas plantadas têm vantagens como alta produção por unidade de área, a flexibilização dos plantios florestais, a possibilidade de predeterminação dos rendimentos e a homogeneização da matéria-prima, quando comparadas às nativas (ZENID, 2009).

O Brasil é um país de vocação tipicamente florestal e as espécies florestais exóticas, como *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*, se adaptaram tão bem graças à avançada tecnologia silvicultural brasileira (VALVERDE et al., 2005), além de características de clima, solo, extensão territorial, mão de obra e infraestrutura favoráveis ao desenvolvimento das espécies (VALVERDE et al., 2005).

Algumas espécies de *Pinus* são amplamente utilizadas em diversos países principalmente na construção civil. Entre elas, destaca-se a espécie *Pinus oocarpa*, originária do México e América Central, considerada uma das espécies com maior número de indivíduos no país, de ocorrência natural de Norte a Sul (DVORAK et al., 2000; PERRY, 1991). A espécie é também cultivada em países do continente Africano e América do Sul como exóticas para fins

comerciais (DVORAK et al., 2000; GREAVES, 1982). É considerada no México a espécie florestal de maior importância devido aos diversos usos de seus produtos madeiros e não madeiros (COMISION FORESTAL DEL ESTADO DE MICHOACAN - COFOM, 2001).

Uma árvore adulta de *Pinus oocarpa* pode atingir até 35 m de altura e diâmetro à altura do peito (DAP) de 50 cm a 70 cm (PERRY, 1991). Essa espécie apresenta ainda alta resistência e densidade de $0,490 \text{ g.cm}^{-3}$ aos 13 anos de idade (BRASIL; NICOLIELO; VEIGA, 1980).

Madeiras do gênero *Pinus* são indicadas para edificações, movelaria e caixotaria, além disso, suas fibras são adequadas à fabricação de papel e produzem também bastante resina. Na América do Norte madeiras de *Pinus* estão entre as espécies de madeira mais utilizadas na construção civil.

O gênero *Eucalyptus* (do grego eu = bem e kalipto = cobrir) possui esse nome pela forma arredondada dos seus frutos, bem como a proteção ao redor de suas sementes. É nativo da Austrália e pertence à família *Myrtaceae*. Possui cerca de 700 espécies catalogadas, sendo amplamente empregada nas diversas áreas de produção (MARTINI, 2010).

De acordo com Renzo (2008) a boa adaptação do *Eucalyptus grandis* ao clima de algumas regiões do Brasil faz com que o gênero seja um dos mais plantados, dentre todos aqueles introduzidos até agora no Brasil. Possui ainda características favoráveis à produção de lâminas e painéis. Seus valores de densidade média, entre $0,3$ e $0,55 \text{ g.cm}^{-3}$ (RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993), classificam essa madeira como apta para usos estruturais.

A espécie *Eucalyptus grandis* apresenta madeira leve e fácil de ser trabalhada. É utilizada na construção civil e em caixotaria de acordo com a duração do ciclo. Além disso, tem grandes usos em serraria e laminação. A madeira pode apresentar problemas como empenamento e rachaduras caso seja

proveniente de árvores de rápido crescimento. Atualmente é a principal fonte de matéria-prima para celulose e papel no estado de São Paulo (FERREIRA, 1979).

2.3 Produtos reconstituídos à base de madeira

O aumento da utilização dos produtos reconstituídos de madeira pode ser atribuído às melhorias tecnológicas empregadas nesses materiais. As aplicações dos produtos reconstituídos de madeira vão desde a fabricação de móveis e coberturas de edificações até elementos estruturais como vigas e pilares (PEDROSA; IWAKIRI; MATOS, 2005).

De acordo com Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES (2008), painéis podem ser definidos como estruturas fabricadas por meio da ação de pressão, temperatura e resina, compostas por madeira em lâminas ou em diferentes estágios de desagregação.

Os painéis podem ser usados substituindo a madeira maciça em diversos casos, principalmente na indústria moveleira e construção civil, mas como suas propriedades são influenciadas diretamente pelo seu processo de fabricação e componentes utilizados, seus elementos constituintes devem ser escolhidos conforme o local onde será empregado e sua função dentro da estrutura (RENZO, 2008).

Segundo Iwakiri (2005) os painéis podem ser subdivididos como laminados e particulados. Entre os laminados destacam-se os compensados e o LVL (*Laminated veneer lumber*). Já entre os particulados, podem ser citados o MDP (*Medium Density Particleboard*), MDF (*Medium Density Fiberboard*) e OSB (*Oriented Strand Board*).

Os painéis laminados LVL (*Laminated veneer lumber*) tiveram seu uso iniciado durante a Segunda Guerra Mundial, na confecção de hélices de avião e outras peças de alta resistência de aeronaves (CARVALHO; LAHR, 2003).

Esse tipo de painel consiste basicamente em lâminas de madeira de coníferas, principalmente do gênero *Pinus*, com espessuras que variam de 2,5 a 3,2 mm, orientadas na mesma direção, ou seja, dispostas na mesma direção da grã e coladas com fenol-formaldeído por meio de prensagem a quente (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999).

É um produto muito versátil, pode ser empregado para fins estruturais internos e externos, em vigas, andaimes e demais utilizações dentro de uma edificação, além de móveis, degraus, pisos e telhados (CARVALHO; LAHR; BORTOLETTO JÚNIOR, 2004; ECKELMAN, 1993).

Entre as vantagens do LVL, pode-se citar a maior resistência mecânica quando comparada à madeira sólida, maior flexibilidade dimensional, e podem ser produzidos em qualquer dimensão (MATOS, 1997). A vantagem que mais se destaca é a economia no consumo de madeira e uma alta relação peso/resistência das peças (PEDROSA, 2003).

Os painéis compensados são formados a partir da colagem de lâminas de madeira sobrepostas, com direção da grã perpendicular entre as camadas e unidas por resina por meio da aplicação de temperatura e pressão. Geralmente os painéis são formados por um número ímpar de camadas (IWAKIRI, 2005).

Segundo Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente - ABIMCI (2009), o compensado atende a uma demanda diversificada de usos e aplicações, que compreende principalmente a construção civil, a indústria moveleira e embalagens.

Para Keinert Júnior (1996), o compensado mostra-se um produto superior ao LVL devido sua laminação cruzada. A laminação cruzada, em conjunto com a restrição da linha de cola, visa a balancear os diferentes comportamentos físico-mecânicos exercidos pelas lâminas de camadas adjacentes (SUCHSLAND, 1972).

Os painéis *Oriented Strand Board* (OSB) foram produzidos inicialmente no Sudeste do Canadá, região notória pela abundância de *Aspen* (*Populus spp*) e *Pinus*. Esse produto disseminou-se pelos Estados Unidos, e o painel OSB ganhou notoriedade mundial (WANG; WINISTORFER, 2000).

Este tipo de painel é confeccionado por meio de prensagem a quente das partículas retangulares do tipo “*strand*” e resinas fenol-formaldeído e/ou isocianato (MDI). Os painéis OSB são compostos por três camadas cruzadas, com as partículas de cada camada orientadas na mesma direção, o que oferece uma melhor distribuição da resistência nas direções longitudinal e transversal, além de melhorar a estabilidade dimensional (MALONEY, 1993).

Sua principal limitação quando comparado a outros painéis, é a baixa estabilidade dimensional devido ao inchamento em espessura quando em contato com umidade, o que vem motivando diversas pesquisas com o intuito de melhorar essa característica. Alguns autores estudaram as modificações químicas que ocorrem nesses painéis (CHANG; CHANG, 2003; HILL; MALLON, 1999), outros autores buscaram formas de melhorar a estabilidade dos painéis OSB adicionando repelentes de água como a parafina (GUIMARÃES JUNIOR et al., 2008; IWAKIRI; MENDES; SALDANHA, 2003; MENDES, 2010).

Apresenta vantagens como a possibilidade de usar toras de qualidade inferior na sua produção, além de ser considerado ecologicamente eficiente quando comparado a outros tipos de painéis como o compensado, visto que utiliza 96% da madeira, enquanto o compensado aproveita apenas 56%, diminuindo o custo do produto (EISFELD, 2009).

Os usos do OSB podem ser estruturais ou não estruturais, entre eles destacam-se pisos, vigas, divisórias, paredes, embalagens, coberturas e obras temporárias como, por exemplo: tapumes e alojamentos (MENDES, 2010; PAINEL..., 2007).

2.4 Propriedades da madeira

Por ser um material com diferentes tipos de células, possuir um comportamento anisotrópico e ser também higroscópica, a madeira possui um comportamento físico e mecânico diferente de materiais normalmente utilizadas como peças estruturais, como é o caso do concreto e dos metais. As características intrínsecas a cada espécie florestal variam de acordo o clima e solo da região, o manejo durante seu crescimento e principalmente com suas propriedades químicas, anatômicas, físicas e mecânicas.

2.4.1 Propriedades físicas

Segundo Panshin e De Zeeuw (1980) as propriedades físicas da madeira são aquelas referidas como propriedades não mecânicas. Várias são as propriedades físicas da madeira, tais como a umidade, a retratibilidade, a resistência da madeira ao fogo, a durabilidade natural, a resistência química, entre outros (GOMES, 2003). Para a utilização da madeira na construção civil, destacam-se a importância de algumas propriedades físicas, tais como a densidade e retratibilidade.

Bowyer, Shmulsky e Haygreen (2003) afirmam que a densidade básica pode ser definida pela relação massa seca por unidade de volume saturado. A densidade está ainda relacionada ao volume de vazio dos poros e com outras propriedades físicas e mecânicas (VALE; DIAS; SANTANA, 2010).

Os valores de densidade das diferentes espécies florestais variam entre 0,13 a 1,40 g.cm³ sendo uma das mais importantes propriedades da madeira (BURGER; RICHTER, 1991).

De acordo com Hellmeister (1982), no âmbito da construção civil, a densidade é a propriedade física mais relevante quanto à caracterização de madeiras estruturais, fabricação de chapas ou à utilização na indústria de móveis.

A densidade interfere diretamente nas propriedades de resistência da madeira, pois quanto maior o valor dessa propriedade, maior será a resistência da madeira a esforços mecânicos. Quando a análise do material se refere às deformações decorrentes das variações climáticas, a propriedade a ser estudada é a retratibilidade. Essa característica pode provocar variações dimensionais (contração e expansão) em peças de madeira.

Segundo Oliveira, Tomazello Filho e Fiedler (2010), em decorrência da anisotropia, mais importante que avaliar a retratibilidade volumétrica total é ter o conhecimento das variações lineares das dimensões, nas direções transversal e longitudinal. Ainda segundo Oliveira, Tomazello Filho e Fiedler (2010), as variações dimensionais no sentido longitudinal não são muito preocupantes, uma vez que seus valores são muito pequenos, ou menos de 1% para madeira normal, em todas as espécies. Já no sentido transversal, as variações são maiores e diferem conforme a direção tangencial ou radial, sendo a primeira maior que a segunda.

Os efeitos da retratibilidade influenciam diretamente em aspectos como o desdobro e secagem das peças de madeira, acarretando em problemas como rachaduras, fendilhamentos, empenamentos, entre outros. Os maiores problemas oriundos da retratibilidade podem ser observados na construção civil durante a vida útil das edificações. Problemas como empenamentos em pisos de tábua, contração e expansão nas juntas de esquadrias, movimentação irregular de portas e deformação em peças estruturais são exemplos de como a retratibilidade pode influenciar no uso da madeira nas edificações.

2.4.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas da madeira são àquelas referentes à resistência e rigidez desse material sob ação de esforços. Vários são os tipos de esforços que podem solicitar uma peça de madeira, são eles: esforços de tração, compressão, cisalhamento, torção, flexão, entre outros.

Para análise das propriedades mecânicas da madeira é necessário avaliar a orientação das fibras em relação à carga ou esforço aplicado. São duas direções principais: paralela e normal às fibras.

A resistência da madeira na direção normal às fibras é geralmente menor que na direção paralela. Na compressão, os valores de resistência observados na direção normal às fibras são em média 25% menores que na direção paralela (BODIG; JAYNE, 1993).

O comportamento de um corpo sólido varia de acordo com a carga nele aplicada. Quando qualquer esforço é aplicado sobre um determinado material, uma deformação, mesmo que muito pequena, ocorrerá. Dessa forma, duas situações distintas podem ocorrer: se as cargas aplicadas forem menores que o limite elástico, o material tende a retornar às suas dimensões originais após a remoção da carga e caso os esforços aplicados excederem o limite elástico, provavelmente ocorrerá uma deformação permanente no corpo analisado.

Benjamin (2006) afirma que as propriedades mecânicas consideram geralmente a resistência e a rigidez do material, ou seja, a capacidade de suportar cargas ou esforços mecânicos. O módulo de elasticidade é a propriedade que caracteriza o material a partir da curva “tensão x deformação específica” na fase de comportamento elástico linear.

De acordo com Silva (2002), os parâmetros módulo de ruptura e módulo de elasticidade (E) que geralmente são determinados em ensaios de flexão estática, são de grande importância na caracterização das propriedades da

madeira, uma vez que seus valores podem ser relacionados às classes de resistência do material.

Mesmo que o módulo de elasticidade não forneça informações completas sobre as propriedades de um material, é possível concluir que altos valores de módulo de elasticidade indicam alta resistência e baixa deformação do material (KLOCK, 2000).

De acordo com Matos (1997) o módulo de elasticidade (E) pode ser entendido como o esforço necessário para que um corpo de 1 cm² de seção transversal seja estendido até o dobro do seu tamanho original, expressando assim a rigidez do material. Essa condição é hipotética, uma vez que antes de ser atingida ocorrerá a ruptura completa do material.

Servolo Filho (2013) corrobora as ideias de Matos (1997), afirmando que mesmo o módulo de elasticidade à flexão estática, sendo um valor teórico, uma relação pode ser usada para a classificação de madeiras. Assim, quanto maior o valor do módulo de elasticidade, maior a resistência e menor a deformidade da madeira.

Além do módulo de elasticidade, o módulo de ruptura é outro parâmetro que pode ser determinado durante um ensaio de flexão estática. O valor desse parâmetro indica o maior esforço ocorrido em um material durante uma fase de carregamento.

2.5 Técnicas de ensaios

A demanda por materiais com as mais diversas características e comportamentos tem crescido exponencialmente nas últimas décadas. Isso pode ser atribuído a fatores como a busca por materiais mais leves, mais resistentes a esforços mecânicos, resistentes a ambientes agressivos ou ainda resistentes a organismos degradadores. Aliado aos novos tipos de materiais está a demanda

por novas metodologias de ensaio que atendam às necessidades das atividades que utilizam esses materiais como matéria-prima.

Segundo Hein, Lima e Chaix (2010) as indústrias derivadas de produtos florestais como as de papel e celulose, siderúrgicas e madeireiras, necessitam de técnicas de ensaios cada vez mais rápidas e precisas para atender ao grande número de amostras para caracterização de suas matérias-primas.

As técnicas convencionais de ensaio, aquelas já normatizadas e tidas como referência, não conseguem determinar todas as características intrínsecas a cada material, principalmente aquelas que demandam uma análise do interior das amostras. Por consequência desses problemas, surgiram as técnicas não destrutivas de ensaio, que agregam características como simples execução, baixo custo e em algumas situações a análise interna do corpo analisado.

As metodologias atuais de ensaio se dividem em dois grupos principais: as técnicas de ensaios que levam a amostra à ruptura e as técnicas não destrutivas, que não interferem no seu uso posterior ao procedimento de ensaio.

2.5.1 Ensaios destrutivos

Apesar da precisão e acurácia desses métodos de ensaio, problemas como o custo dos procedimentos, o custo e desperdício dos materiais, o tempo de execução e principalmente a inviabilização do uso dos materiais após os ensaios, são fatores que incentivam a busca por procedimentos mais simples, rápidos, com menor custo e preferencialmente não destrutivos (STANGERLIN et al., 2008).

As técnicas de ensaio que levam os corpos de prova à ruptura fornecem na maioria das vezes informações precisas quanto às propriedades físicas e quanto ao comportamento mecânico dos materiais.

Para análise dos materiais submetidos a esforços vários são os parâmetros que descrevem o comportamento mecânico dos mesmos. No entanto, entre esses parâmetros os mais utilizados são a Tensão de ruptura e o Módulo de Elasticidade (E).

Os parâmetros, módulo de ruptura e módulo de elasticidade, são importantes, sobretudo na caracterização das propriedades mecânicas da madeira, principalmente por se tratar de um material de origem biológica e também por sua variabilidade entre espécies.

Vários são os autores que trabalharam com a caracterização de madeira serrada de *Pinus e Eucalyptus* e painéis de madeira OSB, Compensado e LVL com o objetivo de viabilizar a utilização desses materiais na construção civil (TABELA 1).

Tabela 1 Valores de módulo de elasticidade e módulo de ruptura encontrados na literatura.

Autor	Tipo de ensaio	Material	Módulo de elasticidade (MPa)	Módulo de Ruptura (MPa)
NBR 7190 (1997)	Compressão	<i>Eucalyptus grandis</i> <i>Pinus taeda</i>	12813 13304	- -
Lobão et al. (2004)	Flexão estática	<i>Eucalyptus grandis</i>	13910 - 17080	-
Ashley e Ozarska (2000)	Flexão estática	<i>Eucalyptus grandis</i>	12062 - 13238	76,7 - 96,3
Ballarin e Palma (2003)	Flexão estática	<i>Pinus Taeda</i>	13812	107
Trianoski (2012)	Flexão estática	<i>Pinus taeda</i>	8234	64
Melchiorretto e Eleotério (2003)	Flexão estática	<i>Pinus taeda</i>	6330	49
Ballarin e Nogueira (2005)	Compressão	<i>Pinus taeda</i> (madeira juvenil)	8418	-
		<i>Pinus taeda</i> (madeira adulta)	13376	-
Santos (2008)	Flexão/Paralelo	Compensado de <i>Pinus sp.</i>	3471	-
	Flexão/Perpendicular		3385	-
Iwakiri et al. (2002)	Flexão estática	Compensado de <i>Pinus oocarpa</i>	10265 - 12169	73,6 - 76,6
		Compensado de <i>Pinus taeda</i>	8482,57 - 9302,24	64,04 - 71,87
Zegarra (2011)	Flexão estática/paralelo	OSB	7741,37	36,97
	Flexão estática/perpendicular		1799,13	19,71
Santos (2008)	Flexão/Paralelo	OSB de <i>Pinus sp.</i>	5466	-
	Flexão/Perpendicular		1643	-
Iwakiri et al. (2009)	Paralelo	OSB	5952	43,6
	Perpendicular		2919	24,6

Continuação...

Mendes (2010)	Flexão/Paralelo	OSB de <i>Pinus taeda</i>	8061,18	57,5
	Flexão/Perpendicular		2022,31	20,82
Müller et al. (2015)	Flexão estática/ Flatwise	LVL de <i>Pinus taeda</i>	15270	100
	Flexão estática/ Edgewise		12310	94
Palma e Ballarin (2011)	Flexão/Flatwise	LVL de <i>Eucalyptus grandis</i>	13114	-
	Flexão/Edgewise		15871	-
Souza (2009)	Flexão estática/ Flatwise	<i>Pinus oocarpa</i>	16199	85
	Flexão estática/ Edgewise		16160	93
	Flexão estática/ Flatwise	<i>Pinus kesiya</i>	17086,9	94
	Flexão estática/ Edgewise		15062	92
Melo et al. (2013)	Flexão estática	Lâminas de <i>Schizolobium amazonicum</i>	5975	20,63

Fonte: Do Autor

2.5.2 Ensaios não destrutivos (END's)

Tendo em vista os problemas decorrentes dos métodos convencionais de ensaio, uma alternativa com grande eficiência de aplicação são os métodos de ensaios não destrutivos. Esses métodos agregam vantagens como a simplicidade de execução, o baixo custo de equipamentos, além de permitir a obtenção de resultados com rapidez e eficácia.

As técnicas não destrutivas de ensaio permitem em um curto espaço de tempo e com certa facilidade a obtenção de diversas características e propriedades dos materiais, estejam eles em laboratório ou em campo.

A aplicação de ensaios não destrutivos em madeiras para determinação de suas propriedades físicas e mecânicas teve início na década de 1950 nos Estados Unidos. Outros países como Suíça, Alemanha e Japão têm grande importância no que se refere ao desenvolvimento de pesquisas nessa área (TARGA; BALLARIN; BIAGGIONI, 2005).

Os métodos de ensaio não destrutivos possuem diferenças entre si, variando os equipamentos utilizados, a execução dos ensaios e principalmente o princípio físico explorado.

A hipótese fundamental para a avaliação não destrutiva da madeira surgiu com Jayne (1959). Sua proposta foi de que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação 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.

Os ensaios não destrutivos são aqueles realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos nos materiais ou ainda determinar suas propriedades. Para tanto, esses ensaios utilizam de princípios físicos definidos, sem alterar as características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais dos materiais. Gouvêa et al. (2011), afirmam que as

avaliações não destrutivas estão relacionadas à qualificação e caracterização das propriedades dos materiais sem prejudicar seu posterior uso.

De acordo com Oliveira (2005), a utilização de avaliação não destrutiva em materiais homogêneos e isotrópicos como o aço, os plásticos e cerâmicos, possibilita a detecção de falhas no material, provenientes do processo de fabricação. Em materiais heterogêneos e anisotrópicos como a madeira, em que a presença de falhas e irregularidades ocorre naturalmente, as técnicas não destrutivas podem utilizar essas características intrínsecas à natureza do material para determinar suas propriedades.

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

Oliveira (2005) afirma que existem diversas técnicas não destrutivas utilizadas para avaliação da madeira. Entre elas, pode-se citar a análise química, Raios-X, técnicas vibracionais e transmissão de ondas sonoras, além das técnicas óticas. Sendo que na indústria, a função da grande maioria dessas técnicas é a classificação do material madeira e seus derivados.

A seguir são destacadas algumas técnicas de ensaio e suas respectivas aplicações em diferentes aplicações para a obtenção das características físicas e químicas dos materiais e na análise estrutural.

2.5.2.1 Ultrassom

A técnica denominada ultrassom se baseia na movimentação das ondas ultrassônicas através do corpo analisado. Com a propagação das ondas sonoras em um corpo, ocorre a perturbação do arranjo dos átomos do material. Não há, no entanto, a movimentação do material, apenas perturbação de suas partículas (OLIVEIRA, 2005).

Segundo Vary (1987), a frequência das ondas sonoras capaz de estimular o sentido da audição no ouvido humano está no intervalo de 20 Hz e 20000 Hz. Toda onda com frequência abaixo do intervalo audível é chamada de onda infrassônica, e as ondas com frequência acima desse intervalo são denominadas de ondas ultrassônicas.

A técnica que utiliza a emissão de ondas sonoras com frequência acima do intervalo audível, ou seja, ultrassônicas, tem sido utilizada, entre outras aplicações, na caracterização e classificação de espécies florestais e produtos reconstituídos de madeira.

A aplicação do Ultrassom consiste no posicionamento de dois transdutores no material. Por meio de um transdutor, a onda ultrassônica é introduzida no material e captada pelo outro transdutor, sendo assim é possível encontrar a velocidade de propagação da onda no interior do material analisado (OLIVEIRA, 2005). Essa configuração pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 Ensaio com equipamento de Ultrassom.



Fonte: Ribeiro et al. (2016).

A caracterização da madeira por meio da técnica ultrassom, principalmente em relação às propriedades mecânicas, estão diretamente ligadas ao módulo de elasticidade, à densidade e à velocidade de propagação da onda no interior do material (OLIVEIRA, 2005).

Vários estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de comprovar a eficiência da aplicação da técnica Ultrassom na caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais.

Feio, Machado e Lourenço (2004), utilizaram metodologias de ensaio destrutiva e não destrutivas (Pilodyn®, Resistógrafo® e Ultrassom) em madeira de Castanho (*Castanea sativa* Mill.). Os autores concluíram que as técnicas de ensaio não destrutivas apresentam vantagens como a facilidade de execução e rapidez nos ensaios.

Oliveira (2005) em avaliação de diversas espécies florestais, entre elas o *Eucaliptus grandis* e *Pinus elliotti*, utilizou a técnica de ultrassom para avaliação das propriedades desses materiais. Os valores médios do módulo de elasticidade estático e dinâmico (Ultrassom) para madeira de *Pinus elliotti* foram de 13246 MPa e 13080 MPa, respectivamente. Já para madeira de *Eucaliptus grandis*, os valores médios encontrados foram 21612 MPa para módulo de elasticidade estático e 20501 MPa para módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados obtidos utilizando a técnica Ultrassom demonstraram que a técnica de ultrassom pode ser utilizada para caracterização mecânica de *Eucaliptus grandis* e *Pinus elliotti* com confiabilidade.

Silva e Gonçalves (2007), utilizaram a técnica de ultrassom para determinar a densidade em painéis MDF fabricados com madeiras de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis*. Os autores concluíram que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é um parâmetro com valores proporcionais à densidade dos painéis MDF, ou seja, quanto maior a velocidade de propagação da onda, maior a densidade do material.

Melo e Del Menezzi (2016) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de LVL fabricado a partir de Paricá (*Schizolobium amazonicum*) utilizando a técnica Ultrassom e encontraram um valor médio de módulo de elasticidade dinâmico de 11762 MPa e verificaram que este parâmetro foi o mais adequado para estimar as propriedades do LVL.

A aplicação da técnica de ultrassom em alguns materiais não foi satisfatória. Stangerlin et al. (2010) utilizaram a técnica Ultrassom para caracterizar painéis aglomerados de madeira-bambu. Os autores avaliaram diferentes proporções de madeira e bambu na confecção dos painéis e procederam a análise pelo método ultrassom direto e semidireto. Os resultados encontrados pelo método direto apresentaram melhores resultados que aqueles apresentados pelo método semidireto. Isso se deve ao posicionamento dos transdutores, que podem influenciar na velocidade de propagação da onda ultrassônica e conseqüentemente na propriedade avaliada.

Com base nos estudos já desenvolvidos com a técnica ultrassom, pode-se afirmar que esse método de ensaios pode ser aplicado na avaliação das propriedades dos materiais. Isso se deve, entre outros fatores, à sua precisão, sua simplicidade de execução e por não necessitar de contato direto com o material em estudo.

2.5.2.2 Vibração longitudinal e transversal

De acordo com Targa, Ballarin e Biaggioni (2005) a técnica de Vibração transversal tem se destacado entre os usuários por conta de sua frequência de trabalho ser menor que as aplicadas em outras técnicas não destrutivas de ensaio, como o Ultrassom.

Carreira et al. (2004) afirmam que a técnica de vibração transversal se baseia na frequência natural de vibração e na rigidez do material. A aplicação do

método da vibração transversal em uma peça de madeira biapoiada ocorre por meio do posicionamento de uma célula de carga em um dos lados da peça e com a aplicação de um impacto na outra extremidade. Assim a peça vibra na sua frequência natural até cessar o movimento. A célula de carga instalada capta essa vibração e envia o sinal a um receptor. Assim, é determinada a frequência do sinal oscilante (ALMEIDA et al., 2016). Verifica-se a partir da Figura 3 a configuração de um ensaio com a aplicação do método de vibração transversal.

Figura 3 Configuração do ensaio utilizando o método de vibração transversal.



Fonte: Segundinho et al. (2013).

A técnica de vibração é atualmente uma das mais utilizadas para determinação do módulo de elasticidade em madeira devido a sua confiabilidade e precisão (MURPHY, 2000; SEGUNDINHO et al., 2012). A partir das características geométricas da peça, da massa, e da frequência de ressonância, é possível a determinação do módulo de elasticidade pelo método da vibração. Para o cálculo utiliza-se a equação a seguir.

$$E = \frac{f_r^2 \cdot m \cdot L^3}{2,46 \cdot g \cdot I}$$

em que:

f_r = Frequência de ressonância (Hz)

m = Massa da peça (kg)

g = Aceleração da gravidade (m/s²)

L = Comprimento da peça (m)

I = Momento de inércia da seção transversal da peça (m⁴)

Com a popularização dessa técnica, diversos tipos de materiais foram caracterizados por meio da técnica de vibração transversal e longitudinal. Um dos materiais em que a técnica de vibração é mais empregada é a madeira. Dessa forma, várias espécies florestais como o *Eucalyptus citriodora* (CANDIAN; SALES, 2009), *Eucalyptus grandis* e *Pinus taeda* (BALLARIN; PALMA, 2011), peças estruturais (CALIL JUNIOR; MINÁ, 2003; CARREIRA; CANDIAN, 2008; CRISTOFORO et al., 2013; SEGUNDINHO et al., 2012), lamelas utilizadas em vigas de madeira laminada colada (MLC) (ALMEIDA et al., 2012; MIOTTO; DIAS, 2010) e em peças de MLC (SEGUNDINHO et al., 2013), toras de madeira (CARREIRA; DIAS, 2009; CARREIRA; SEGUNDINHO; DIAS, 2011; SEGUNDINHO et al., 2012), entre outras, tiveram seus módulos de elasticidade determinados com a utilização da técnica não destrutiva de vibração transversal e longitudinal.

Os resultados encontrados por Targa, Ballarin e Biaggioni (2005), por exemplo, demonstraram que os valores de módulo de elasticidade estático, por meio do ensaio convencional de flexão estática, e o módulo de elasticidade dinâmico obtido pela técnica de vibração transversal tiveram um coeficiente de determinação (R^2) entre 0,76 e 0,87. Com as amostras de *Eucalyptus grandis*, por exemplo, os valores de módulo de elasticidade encontrados foram de 15306 MPa (estático – método destrutivo) e 16990 MPa (dinâmico – Vibração transversal).

2.5.2.3 *Stress wave timer*

Este método é baseado na velocidade de propagação de ondas de tensão por meio da teoria de propagação de ondas unidirecionais em barras homogêneas e elásticas. O procedimento de ensaio tem início com a aplicação de uma carga instantânea em uma das extremidades da barra, ocasionando a movimentação de uma onda ao longo da barra (FIGURA 4). A propagação da onda causa uma pequena movimentação longitudinal nas partículas, e de acordo com a dissipação da energia da onda, os movimentos das partículas vão diminuindo. Por fim, todas as partículas da barra retornam à posição inicial de repouso (OLIVEIRA, 2005).

Figura 4 Aplicação do *Stress wave timer*.



Fonte: Melo (2012).

A utilização do princípio de propagação de ondas a partir de um pulso de tensão tem sido objeto de vários estudos por diversos autores. Gomes (2007) utilizou, entre outras técnicas não destrutivas de ensaio, o *Stress Wave Timer* para a caracterização de clones de *Eucalyptus*. Os valores de módulo de elasticidade

encontrados pela técnica de ondas de tensão variaram entre 4180 e 4800MPa para análise no sentido transversal e entre 3742 e 3841 MPa no sentido longitudinal.

Em análise do crescimento de indivíduos de *Pinus Taeda* em diferentes sítios, Castelo et al. (2008) verificaram a influência do tipo de solo em diversas características da madeira como massa específica, dimensões das fibras e velocidade de propagação de ondas de tensão. Verificou-se que a técnica de propagação de ondas de tensão (*Stress Wave Timer*) se mostrou eficaz na caracterização das propriedades da madeira.

Melo et al. (2013) avaliaram as características físicas, químicas e mecânicas de lâminas de Paricá (*Schizolobium amazonicum*). Na avaliação das propriedades mecânicas, utilizou-se a técnica *Stress Wave Timer*. Com a velocidade de propagação das ondas de tensão foi possível a obtenção dos valores de módulo de elasticidade dinâmico (“E” médio de 7015MPa). Esses valores se correlacionam diretamente com o aumento da resistência da madeira, o que indica a possibilidade de uso dessa técnica na predição de propriedades mecânicas da madeira.

Em painéis aglomerados fabricados com bagaço de cana e *Eucalyptus urophylla*, Mendes et al. (2012) utilizaram o *Stress Wave Timer* para a quantificação do módulo de elasticidade dinâmico. Os valores de correlação entre o módulo de elasticidade estático (ensaio destrutivo) e módulo de elasticidade dinâmico (ensaio não destrutivo) variaram de acordo com os diferentes tratamentos. O tratamento com maior valor de correlação (0,9863) ocorreu nos painéis produzidos em camadas.

Souza, Del Menezzi e Bortolettyo Júnior (2010) utilizaram o *Stress Wave Timer* para caracterizar painéis LVL produzidos com madeiras de *Pinus oocarpa* e *Pinus kesiya*. Na caracterização mecânica, os módulos de elasticidade por método destrutivo (Flexão estática) e por ensaio não destrutivo (*Stress Wave Timer*) ocorreram em função das duas posições principais do LVL, *edgewise* e

flatwise. Para o tratamento com *Pinus oocarpa*, os valores de módulo de elasticidade estático e dinâmico encontrados na posição *flatwise* foram respectivamente 16,199 MPa e 16,152 MPa e na posição *edgewise* os valores encontrados foram 16,16 MPa e 15,895 MPa. Para o tratamento com *Pinus kesiya*, na posição *flatwise* o módulo de elasticidade estático encontrado foi 17,087 MPa e módulo de elasticidade dinâmico foi 17,476 MPa. Já na posição *edgewise* os valores encontrados foram 15,062 MPa para o módulo de elasticidade estático e 16,872 MPa para o módulo de elasticidade dinâmico.

Para avaliar o potencial de uso da madeira de *Schizolobium parahyba* (Guapuruvu) em painéis LVL, Del Menezzi et al. (2013) utilizaram a metodologia *Stress Wave Timer*. Os autores concluíram que essa metodologia de ensaio pode ser aplicada como uma técnica de classificação e verificaram ainda que as propriedades dessa madeira apresentaram potencial para a produção de painéis LVL.

Palma et al. (2012) avaliaram a produção de painéis compensado utilizando madeira de Seringueira (*Hevea brasiliensis*). A análise ocorreu por meio da comparação dos painéis produzidos com lâminas de baixos (4887-7323 MPa), médios (8200-8948 MPa) e altos (10979-13010 MPa) valores de módulo de elasticidade dinâmico. A classificação das lâminas foi feita utilizando a técnica não destrutiva *Stress Wave Timer*. Os valores de módulo de elasticidade encontrados para as lâminas extraídas das 24 árvores utilizadas no experimento.

Avaliando o efeito da temperatura nas propriedades de painéis OSB fabricados com madeira de *Pinus sp.*, Del Menezzi, Tomaselli e Souza (2007) verificou que tratamentos térmicos influenciam nas propriedades físicas (higroscopicidade) e mecânicas (módulo de elasticidade). Os ensaios foram conduzidos utilizando a propagação de ondas de tensão e um dos fatores que influenciaram o módulo de elasticidade após o tratamento térmico foi a perda de massa das amostras, o que altera a velocidade v_0 de propagação das ondas.

2.5.2.4 Pilodyn® e Resistograph®

Pilodyn® e Resistograph® são equipamentos de ensaio aplicados geralmente em peças estruturais ou árvores vivas que são capazes de determinar algumas propriedades da madeira como a densidade, por exemplo.

O Resistograph® ou resistógrafo é um aparelho que por meio de perfurações em peças de madeira e considerando a energia dispendida nas perfurações determina a sua resistência à perfuração (BOTELHO JÚNIOR, 2006). A utilização desse equipamento permite determinar a densidade do material ou ainda problemas com podridão, descontinuidade de fibras, entre outros.

A técnica Pilodyn®, segundo Coelho (2015) é aquela que mede, entre outras propriedades, a densidade da madeira. Sua aplicação consiste em inserir um pino dentro da madeira, assim, quanto maior a deterioração superficial da madeira, maior a penetração do pino. O resultado da aplicação do Pilodyn® também pode ser correlacionado com as proporções entre cerne e alburno, entre lenho inicial e tardio, com a presença de extrativos na madeira e da densidade (ABREU, 2010). Observam-se na Figura 5 os equipamentos Pilodyn® e Resistograph®.

Figura 5 Equipamentos de medição Pilodyn® e Resistograph®.



Legenda: (a) Pilodyn®. (b) Resistograph®
Fonte: Abreu (2010).

Esses equipamentos podem ser utilizados em diversas situações, como a verificação das condições de peças estruturais em edifícios históricos (ABREU, 2010; BOTELHO JÚNIOR, 2006), em árvores vivas de *Eucalyptus* (GOUVÊA et al., 2011) e *Pinus* (ISIK; LI, 2003), corpos de prova de Castanho (*Castanea Sativa* Mill.) (FEIO; MACHADO; LOURENÇO, 2004), *Eucalyptus grandis e urophylla* (COUTO et al., 2013), Angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), Cumaru (*Dipteryx odorata*), Parajú (*Manilkara spp.*), Pinus (*Pinus spp.*) e Sucupira (*Bowdichia spp.*) (MANTILLA; PEREIRA; ALVES, 2013), entre outros.

2.5.2.5 Raio-X

A utilização dos raios X teve início na França por Polge (1963), permitindo assim, o desenvolvimento das análises dos anéis de crescimento da madeira bem como a determinação da densidade da madeira por meio da leitura de radiografias de amostras de madeira (SILVA, 2006).

A técnica de densitometria de raios X consiste na irradiação de raios X em várias direções em uma amostra de madeira. A partir das radiografia obtida no processo de desenvolvimento da técnica é possível observar as zonas de contraste com diferentes massas específicas no interior da amostra (FERRAZ; TOMAZELLO FILHO, 1978; QUIRINO et al., 2012; SIQUEIRA, 2004).

Por apresentar vantagens como a precisão e praticidade, Tomazello Filho et al. (2008) afirmam que a densitometria por Raio-X é uma das técnicas de ensaio não destrutivas mais promissoras para a avaliação de madeiras serradas. A aplicação dessa metodologia permite a avaliação da qualidade em painéis, pois apresenta leituras realizadas em intervalos micrométricos, o que produz resultados mais precisos (BELINI; TOMAZELLO FILHO; CHAGAS, 2009).

Belini (2012), avalia que a densitometria por Raio-X é uma análise tão importante quanto a avaliação das propriedades físico-mecânicas em painéis.

Devido a suas vantagens, também tem grande potencial de aplicação em madeiras serradas.

Segundo Silva et al. (2004) a técnica de densitometria por Raio-X é uma das técnicas mais avançadas para medição de variações na massa específica. Além disso, essa técnica pode ser utilizada como um instrumento de avaliação dos efeitos dos tratamentos silviculturais, bem como a caracterização tecnológica da madeira.

A técnica de Raio-X foi aplicada na análise de algumas características de madeiras serradas e painéis de madeira, como na avaliação dos anéis de crescimento de *Araucaria Angustifolia* (WEHR; TOMAZELLO FILHO, 2000), de *Pinus caribaea* (FERREIRA; TOMAZELLO FILHO, 2009), em painéis fabricados a partir de *Eucalyptus grandis* e partículas de bagaço de cana-de-açúcar (BELINI, 2012), avaliação do perfil densitométrico em árvores de *Schizolobium parahyba* (LOBÃO et al., 2012), entre outros.

Quoirin (2004) avaliou a aplicação da tomografia de Raios-X para a identificação de defeitos internos em madeira como rachaduras, furos, ataque de fungos, presença de nós, ataque de insetos, entre outros. Verificou-se que essa técnica é capaz de representar fielmente todos os defeitos presentes no interior das amostras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus viminalis*.

Para a caracterização de madeiras de *Eucalyptus grandis* em relação ao parâmetro físico densidade, Silva et al. (2004) utilizaram a técnica de avaliação não destrutiva densitometria de Raio-X, encontrando maiores valores de densidade em amostras com maior quantidade de madeira adulta.

Além da avaliação da densidade, mais estudos têm sido realizados com o intuito de aplicar a técnica de Raio-X em outros tipos de análises. Tomazello et al. (2008) aplicaram a técnica de densitometria de Raio-X em madeiras de Eucalipto e demonstraram o potencial de aplicação dessa metodologia em alguns aspectos como a avaliação da biodegradação da madeira por fungos da podridão

branca, a detecção de alburno e cerne, e ainda a determinação do efeito do manejo florestal em propriedades da madeira.

2.5.2.6 Outras técnicas não destrutivas

A seguir são apresentados alguns trabalhos desenvolvidos com a aplicação de metodologia de ensaio não destrutiva para avaliação de materiais, caracterização, análise estrutural, entre outros.

Gomes (2007) buscando metodologias mais simples para a avaliação da qualidade da madeira para produção de celulose estudou várias técnicas de ensaio não destrutivas como o Pilodyn®, extensômetro, Resistograph®, ondas de tensão e a espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) em comparação com métodos convencionais de ensaio. Os autores concluíram que os métodos do extensômetro e Pilodyn são viáveis para predição da densidade básica da madeira. Além disso, a técnica de espectroscopia de infravermelho próximo foi capaz de estimar a relação S/G (siringila/guaicila) da lignina e a densidade básica da madeira.

Na busca por uma metodologia mais precisa e menos onerosa para análise química e anatômica da madeira, Magalhães et al. (2005), estudaram algumas espécies de *Eucalyptus* e *Pinus* por meio da técnica de reflexão difusa de infravermelho próximo. A técnica mostrou-se eficaz na predição do teor de lignina e espessura de parede com coeficientes de correlação acima de 0,9 e 0,8, respectivamente.

Hein, Lima e Chaix (2010), no trabalho com a técnica NIRS (espectroscopia no infravermelho próximo), buscaram modelos de calibração para a otimização da aplicação dessa técnica na caracterização das propriedades da madeira. Os resultados encontrados indicam que a utilização de ferramentas

de otimização melhora de forma expressiva os modelos preditivos de propriedades como módulo de elasticidade e densidade básica.

Larocca e Schaal (2006) utilizaram um equipamento de GPS para monitoramento do comportamento dinâmico de uma ponte estaiada localizada na Universidade de São Paulo (USP/São Carlos). Esse trabalho buscou comprovar o potencial desse equipamento como instrumento de controle e monitoramento em obras civis. Por meio de comparação dos resultados obtidos por GPS, com transdutor e com análise teórica verificou-se que o GPS pode ser utilizado para caracterizar o comportamento dinâmico de estruturas.

Na avaliação de vigas de concreto submetidas a esforços de flexão, Syroka-korol e Tejchman (2014) utilizaram a técnica ótica Digital Image Correlation (DIC) para analisar as superfícies das vigas quanto às trincas e padrões de ruptura. Por meio da técnica DIC foi possível observar zonas localizadas de deformação da ordem de 16 a 20 mm de comprimento na superfície da viga de concreto.

Xavier et al. (2014) utilizaram a técnica de correlação de imagens digitais (DIC) para medição do tamanho das fissuras em amostras de *Pinus pinaster* submetidos a esforços. As medições foram baseadas no campo de deslocamentos fornecidos pela técnica DIC. Os resultados mostraram-se de acordo com a literatura, além disso, o procedimento foi validado por meio de simulação de elementos finitos.

Várias são as técnicas não destrutivas de ensaio utilizadas para medição de deslocamentos e deformações nos materiais sob carregamento. No entanto, as técnicas óticas (análise de imagens) têm se destacado nesse campo de conhecimento. Entre as técnicas óticas, destaca-se a técnica de Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) pela sua robustez, simplicidade de execução, precisão e rapidez nos resultados.

2.6 Velocimetria por imagens de partículas

As primeiras aplicações comerciais de sistemas de medições baseados na técnica PIV datam de 1997, conforme Raffel et al. (2007). A técnica PIV consiste no acompanhamento dos deslocamentos em um corpo por meio de câmera digital que captura as imagens em determinado período de tempo. O intervalo de tempo de exposição na aquisição da imagem deve ser pequeno o suficiente para congelar o movimento das partículas.

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

Uma das primeiras utilizações do *laser* para a medição de propriedades do fluxo, particularmente a velocidade, ocorreu no trabalho de Yeh e Cummins (1964). Os autores utilizaram a 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. Dessa forma, uma interferência padrão é formada no ponto em que os feixes se cruzam, definindo uma região cujo volume é conhecido. Sabe-se que partículas em movimento pelo volume espalham a luz. Utilizando um fotodetector, as partículas de luz são coletadas e a frequência resultante da saída do fotodetector está diretamente relacionada à velocidade da partícula (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).

A técnica (PIV) é capaz de verificar deformações em 2-D e os vetores de velocidade são obtidos a partir da correlação de imagens consecutivas. Por causa da sua simplicidade de execução, a técnica PIV tem sido utilizada desde a década de 1980. Adrian e Yao (1985) utilizaram as técnicas de PIV e *laser speckle velocimetry* (LSV). Os autores 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). A técnica LSV exigia grande capacidade de processamento para os equipamentos existentes na época, fato que desestimulou sua utilização (RODRIGUES, 2003).

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 líquidos e gases (LECORDIER; TRINITÉ, 2003) e materiais granulares (SLOMINSKI; NIEDOSTATKIEWICZ; TEJCHMAN, 2007), deslocamentos em superfícies (HAJIALILUE-BONAB; SOJOURI; PUPPALA, 2011; YUAN et al., 2011), medições de deformações em objetos sob efeito de esforços (BRAGA JÚNIOR et al., 2012; MAGALHÃES; BRAGA; BARBOSA, 2015; PEREIRA, 2014; RODRIGUES, 2015; SOUZA et al., 2014), entre outros.

2.6.1 Procedimento experimental

As técnicas interferométricas demandam geralmente uma sofisticada configuração experimental do aparato ótico, o que em alguns casos tornam essas técnicas muito onerosas. Isso pode ser considerada uma grande vantagem da técnica PIV sobre as demais técnicas (MAGALHÃES; BRAGA; BARBOSA, 2015).

Na análise PIV, a fotografia capturada é subdividida em uma malha com múltiplas áreas dentro da imagem original. O vetor deslocamento para cada parte da malha é calculado por meio de uma função de correlação que analisa a posição das partículas da imagem em tempos distintos (WHITE; TAKE; BOLTON, 2003). O procedimento de execução da técnica PIV é não intrusivo e utiliza conceitos matemáticos e estatísticos simples (ZARRUK, 2005).

A técnica PIV tem como desvantagem o fato de medir apenas a deformação superficial. Além disso, a amostra não pode ser muito grande uma vez que o seu processamento demoraria muito (SLOMINSKI; NIEDOSTATKIEWICZ; TEJCHMAN, 2007).

Com base na literatura estudada sobre os procedimentos e aplicações da técnica PIV verificou-se uma grande necessidade em conhecer melhor os parâmetros dessa técnica com o intuito de melhorar os resultados obtidos em qualquer tipo de aplicação. A seguir são apresentados os principais parâmetros da técnica PIV e sua influência direta nas análises realizadas e em seus respectivos resultados.

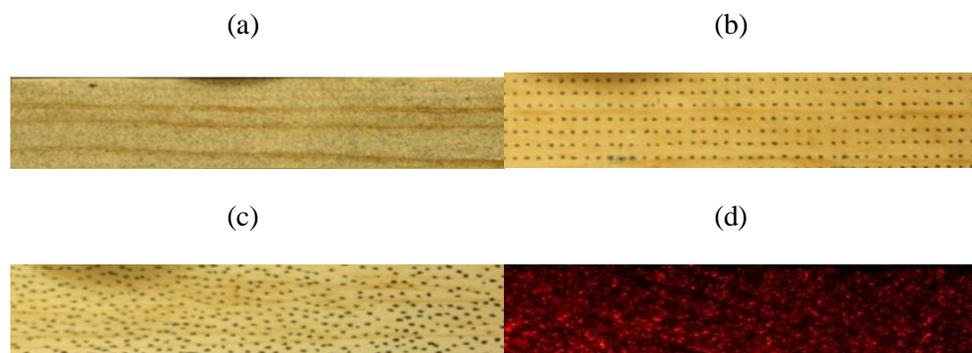
2.6.1.1 Tamanho e distribuição dos marcadores

O procedimento da técnica PIV inicia-se com a captura de imagens de um objeto em uma configuração inicial e outra em uma configuração modificada. Essa imagem é analisada por meio de um algoritmo computacional que faz um detalhamento da superfície do objeto estudado, identificando marcações nela inseridas ou ainda utilizando as próprias características de cada material, como a coloração, presença de anéis de crescimento a rugosidade da superfície, entre outras.

São vários os tipos de marcações já utilizados como o *speckle laser* (BRAGA JÚNIOR et al., 2015; MAGALHÃES; BRAGA; BARBOSA, 2015;

PEREIRA, 2014; SOUZA et al., 2014), Tinta em *spray* (PEREIRA, 2014), pontos marcados com caneta pincel (RODRIGUES, 2015), entre outros (FIGURA 6).

Figura 6 Diferentes tipos de marcadores.



Legenda: (a) Tinta em *spray*. (b) Grade regular com pontos pintados com caneta pincel. (c) Pontos aleatórios pintados com caneta pincel. (d) Pontos gerados por *speckle laser*.

Fonte: Adaptado de Pereira (2014).

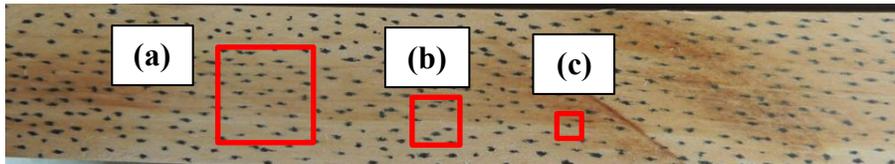
A influência do tipo e conformação dos marcadores no processamento da técnica PIV está associada principalmente à capacidade do algoritmo PIV em identificar os marcadores utilizados e também pela capacidade da técnica em rastrear um conjunto de marcadores em imagens consecutivas. Dessa forma, sabendo que o mínimo passo de busca (*Step size*) possível é de 1 *pixel*, é necessário que cada ponto marcador seja maior que esse valor, caso contrário os mesmos podem ficar perdidos entre uma região de análise e outra.

2.6.1.2 Tamanho da janela de interrogação

O tamanho da janela de interrogação ou região de interesse (ROI) (FIGURA 7) é um parâmetro importante no que diz respeito à qualidade e precisão do processamento da técnica PIV. Maiores janelas de interesse representam um maior número de pontos para análise e conseqüentemente maior

precisão nos resultados. Isso se deve ao fato de que mais marcadores dentro de uma janela de interesse, diminui a chance de ocorrência de outra janela parecida em um lugar indesejado (falso positivo).

Figura 7 Janelas de interrogação com diferentes tamanhos.

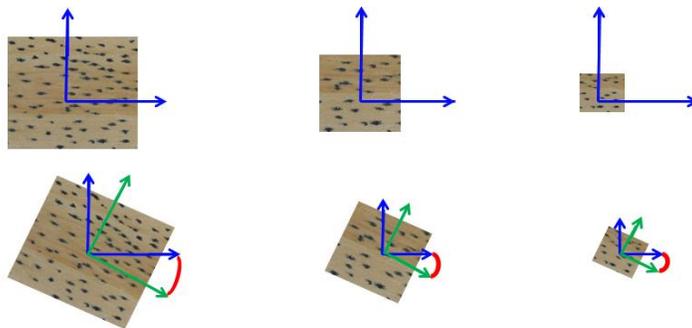


Legenda: (a) ROI de 64x64 *pixels*. (b) ROI de 32x32 *pixels*. (c) ROI de 16x16 *pixels*.

Fonte: Do autor.

As desvantagens de se utilizar janelas de interrogações grandes consistem em demandar maior tempo de análise computacional e por permitir um maior erro em caso de deformação angular (FIGURA 8).

Figura 8 Influência do tamanho da janela de interrogação no deslocamento angular.



Fonte: Do autor.

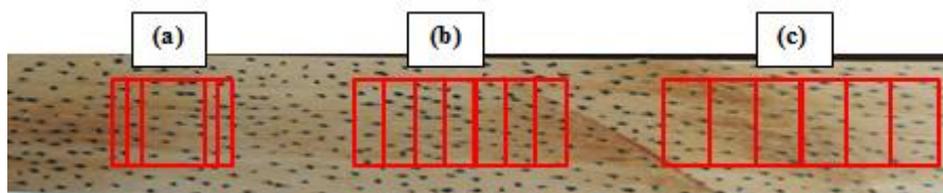
2.6.1.3 Passo de busca (*Step size*)

O passo de busca é o parâmetro que determina a distância a partir de um ponto base que o algoritmo PIV irá buscar a posição de uma janela de

interrogação, ou seja, o algoritmo pode buscar de *pixel* em *pixel* ou de 2 em dois *pixels*, ou de qualquer outro valor inteiro de *pixels*.

Quanto menor o número de pixels para o passo de busca (*step size*), tendo como valor mínimo 1 pixel, mais preciso será o resultado da técnica PIV. Isso se deve ao fato de que menos informações ficarão perdidas no espaço entre uma janela de interrogação e outra. Esse conceito pode ser observado na figura 9.

Figura 9 Diferentes configurações de *step size*.



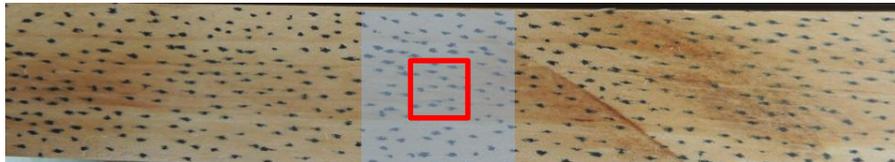
Legenda: (a) *Step size* de 1 *pixel*. (b) *Step size* de 2 *pixels*. (c) *Step size* de 3 *pixels*.
Fonte: Do autor.

O tamanho do *Step size* é importante no que se refere à velocidade de processamento das imagens. Quanto maior o valor do *Step size* maior a velocidade de processamento. No entanto, isso pode influenciar na precisão de medição da técnica PIV e no tamanho das marcações inseridas na superfície das amostras.

2.6.1.4 Espaço de busca

O espaço de busca é o parâmetro que delimita a região onde uma ROI será procurada durante o processamento das imagens no algoritmo PIV. Um espaço de busca grande implica em maior tempo de processamento. Muitas das vezes não é necessária uma grande região de busca, desde que seja conhecido o comportamento do material em fase de carregamento, bem como o seu padrão de deformação (FIGURA 10).

Figura 10 Espaço delimitado para busca de uma ROI em imagens consecutivas.



Fonte: Do autor.

Por outro lado, uma região de busca pequena, mesmo diminuindo o tempo necessário para análise computacional, pode ocasionar uma situação em que a deformação do material foi grande o bastante para sair do alcance da região delimitada para busca, causando erro na análise e consequentemente prejudicando o resultado final.

2.6.1.5 Limiar de semelhança

O parâmetro chamado de *Threshold* (Limiar de semelhança) tem como função a delimitação do padrão de semelhança de uma mesma ROI em uma sequência de imagens. Esse parâmetro é importante, pois uma ROI nunca será exatamente a mesma após a ação de uma carga no objeto em estudo. Dessa forma, um valor de *Threshold* igual a 1 indica que o algoritmo PIV só deverá reconhecer uma determinada ROI em uma imagem consecutiva se ela estiver idêntica à ROI inicial. Isso dificilmente ocorrerá durante a análise computacional da técnica PIV, ou seja, torna-se essencial encontrar um valor ótimo de semelhança de uma mesma ROI em diferentes tipos e intensidades de carregamento.

2.6.2 Técnica PIV aplicada em fluidos e gases

A técnica PIV foi empregada em sua essência no campo dos fluidos e dos gases. Vários autores encontraram na técnica PIV uma forma adequada para medições de fluxo e comportamento de corpos líquidos e gasosos.

Zarruk (2005) mediu a deformação da superfície de um material líquido em ocorrência de ondas utilizando a velocimetria por imagem de partículas. Em comparação com outros métodos, verificou-se que a intensidade correta de luz na superfície do elemento analisado influencia diretamente na precisão da técnica PIV.

Kim et al. (2008) utilizaram a velocimetria por imagem de partículas como base para o desenvolvimento de um novo método de medição do fluxo na superfície de rios a partir de suas margens. Esse sistema permite a visualização do fluxo em tempo real além da possibilidade de um levantamento quantitativo do mesmo sem a necessidade de instrumentação de alta complexidade.

Vários estudos experimentais utilizando fluxos em túneis 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).

A calibração das técnicas não destrutivas de ensaio, bem como a averiguação da sua configuração experimental tornam-se essenciais para a obtenção de resultados adequados. Dessa forma, problemas como perda de correlação, ruídos provenientes das imagens, sobreposição ou movimentação de partículas são minimizados.

Hart (2000), em seu trabalho sobre correção de erros que ocorrem com a técnica PIV, apresentou uma metodologia que corrige os resultados a partir da avaliação de elemento por elemento e ainda por meio da avaliação das regiões adjacentes em cada parte do material.

Wieneke (2005) propôs uma metodologia denominada *stereo-PIV* que utiliza calibração própria por meio de duas câmeras em um suporte 3D a partir de uma ou múltiplas vistas.

2.6.3 Técnica PIV aplicada em materiais sólidos

A medição das variações (dimensionais e de posição) que ocorrem em materiais sólidos solicitados a carregamentos, demandam técnicas de ensaios com baixo grau de complexidade e ainda assim precisas. Dessa forma, a técnica PIV torna-se uma opção viável para essa situação. Vários autores utilizaram a técnica PIV para medição de deslocamentos e deformações em corpos sólidos.

White, Take e Bolton (2003) utilizaram a velocimetria por imagem de partículas para mensurar deslocamentos e deformações em uma massa de solo. Quando comparado com outros métodos de medição, a técnica PIV apresentou vantagens como a precisão, acurácia e a não necessidade da inserção de partículas no material em estudo, uma vez que esse método consegue trabalhar utilizando as irregularidades na superfície do material.

Baba e Peth (2012) utilizaram a técnica PIV para avaliar o comportamento do solo em uma caixa impermeável (comprimento x largura x altura = 3,0 x 1,0 x 1,2 m) quando o mesmo foi saturado com água em duas situações, a primeira pela parte de baixo da caixa e a segundo através de aspersores acima da caixa. Os autores concluíram que a caixa de solo desenvolvida combinada com a aplicação da técnica PIV é uma ferramenta altamente sensível para o estudo do solo em relação ao estado de tensão provocado pela água.

Estudando problemas que podem ocorrer nas fundações, Hajjalilue-Bonab, Sojoudi e Puppala (2011) analisaram o comportamento do solo ao redor de pilares de aço e alumínio em um modelo de caixa de solo. Nesse trabalho foram determinadas as deformações do solo (areia) em situações de esforços laterais nos pilares a partir da técnica PIV. Yuan et al. (2011) também analisaram o deslocamento do solo ao redor de pilares sob ação de carga lateral.

Os autores conseguiram a partir da utilização de duas câmeras fotográficas confeccionar um mapa 3d das deformações ocorridas no modelo.

Algumas técnicas de ensaio não destrutivo têm sido utilizadas com o objetivo de capturar zonas de cisalhamento e outras deformações não homogêneas em corpos granulares, são elas: camadas coloridas de material, Raios-X, fotogrametria e stereo-fotogrametria, tomografia – Raio-X, tomografia por capacitância elétrica (ECT), correlação de imagens digitais (DIC) e velocimetria por imagem de partículas (PIV) (SLOMINSKI et al., 2007).

Ao contrário dos fluidos e gases os materiais sólidos ou granulares não necessitam de marcadores internos, uma vez que seus próprios grânulos ou irregularidades servem de marcadores. A grande vantagem da técnica PIV reside na sua simplicidade (SLOMINSKI; NIEDOSTATKIEWICZ; TEJCHMAN, 2007).

Lueptow, Akonur e Shinbrot (2000) em seu trabalho sobre a utilização da técnica PIV em fluxo granular analisaram o comportamento de uma massa de grãos em uma mesa vibratória. Como pontos marcadores, foram utilizadas partículas claras e escuras dentro do modelo de silo para a execução da metodologia padrão do PIV. Conclui-se que a técnica PIV é capaz de medir deslocamentos por meio da coloração clara e escura das partículas, sendo seu funcionamento idêntico à técnica padrão aplicada para análise do fluxo em fluidos.

Grudzień et al. (2011) e Slominski, Niedostatkiwicz e Tejchman (2007) utilizaram as técnicas não intrusivas PIV e Raio-X para verificar o comportamento do fluxo de material granular no interior de um silo e demonstrar o potencial das duas técnicas em mensurar variações de volumes. Foi observado que a técnica PIV foi capaz de medir as deformações na superfície granular do material sem necessidade de contato direto. Verificou-se ainda que a técnica PIV apresenta como desvantagem o fato de não conseguir medir as tensões que ocorrem no interior do material, sendo que as tensões na superfície e

no interior da massa de grãos podem variar devido ao atrito dos grãos com a parede do silo.

Niedostatkiewicz et al. (2010) analisaram o comportamento do fluxo de um silo no momento da descarga. Para isso, utilizou areia de diferentes granulometrias e diferentes rugosidades de paredes do silo. As medições ocorreram utilizando a técnica ECT (*Electrical capacitance tomography*) em comparação com a técnica de velocimetria por imagem de partículas. Os autores encontraram resultados semelhantes por meio das duas técnicas de análise, no entanto alguns ajustes devem ser feitos com o intuito de aperfeiçoar a aplicação da técnica ECT em silos com fluxos granulares, tais como a calibração dos dados da técnica e ainda melhorar a precisão dos eletrodos de reconstrução das imagens nas paredes do silo.

A análise de qualquer estrutura sólida somente é possível conhecendo-se os esforços que o material suporta. Anteriormente à disseminação das tecnologias digitais, métodos como a fotoelasticidade eram utilizados para medição de deformações em superfícies. Essa técnica consiste em afixar um filme plástico específico na superfície da peça em estudo. Com a deformação da peça é inicia-se o processo de aparecimento de cores distintas no filme plástico, indicando os níveis de deformação em cada região do material analisado. Por meio de uma escala gráfica é possível quantificar numericamente os níveis de deformação para cada cor ocorrida no decorrer do filme plástico.

A utilização da técnica PIV para medições de deformação em peças estruturais se justifica principalmente pela sua facilidade de aplicação, precisão e por utilizar equipamentos de baixo custo e que não são descartáveis como ocorre com a técnica de fotoelasticidade e extensometria. A seguir são apresentados alguns autores que utilizaram a técnica PIV para análise do comportamento mecânico de objetos submetidos a carregamento.

Buscando conhecer melhor as reações de um tecido sensível no momento de penetração de uma agulha, Kerl et al. (2012) utilizaram os conceitos da técnica PIV para execução dos ensaios. Os autores, por meio de iluminação a laser e utilizando tecido feito de gelatina, demonstraram o real comportamento no momento de uma inserção. Esse trabalho torna-se relevante no que se refere a procedimentos cirúrgicos com alto risco e sensibilidade.

Magalhães, Braga e Barbosa (2015), buscando novas ferramentas para caracterização de materiais, utilizaram a técnica PIV para obter o módulo de elasticidade de uma viga de aço A36 em balanço. Seus resultados demonstraram um erro de apenas 5% entre o módulo de elasticidade encontrado pela técnica PIV e o valor real do material.

A técnica PIV pode também ser utilizada para desenvolver mapas de deformação em vigas em balanço. Dessa forma, é possível avaliar a deformação de uma estrutura em cada ponto de suas dependências fazendo com que esse tipo de ferramenta se consolide como mais um método de análise não destrutiva (BRAGA JÚNIOR et al., 2015).

Souza et al. (2014) utilizaram a técnica PIV associada à técnica *sunset laser* para iluminar a superfície de corpos de prova de madeira de *Pinus*, em ensaio de flexão estática. Essa metodologia aproveita as próprias irregularidades do material, fazendo com que elas forneçam os pontos necessários para execução da técnica PIV.

Utilizando metodologia semelhante, Pereira (2014) determinou a diferença entre o comportamento de madeira de *Pinus taeda* sem nós e com presença de nós em ensaio de flexão estática. A partir da técnica de velocimetria por imagens de partículas foram gerados mapas de deformação da superfície das amostras e ainda algumas características como o módulo de elasticidade e módulo de ruptura. Utilizou-se a metodologia *sunset laser* para geração de pontos na superfície das amostras de *Pinus taeda*. Verificou-se grande dificuldade em

manter um padrão na iluminação das amostras, pois os ajustes com o laser são difíceis de serem repetidos igualmente em todas as amostras. Outro fator que dificulta a execução da técnica PIV utilizando o *sunset laser* é a necessidade de inverter o aparato para o ensaio de flexão estática, isto é, a carga é aplicada em dois pontos e o apoio ocorre somente em um ponto.

Para estudar os efeitos da flambagem em perfis metálicos, Rodrigues (2015) utilizou a técnica PIV por meio de uma grade de pontos pintados na superfície das amostras. Esse processo possibilitou de maneira simplificada, a confecção de mapas de deformação das amostras decorrentes do ensaio de compressão.

Nos ensaios de Braga Júnior et al. (2015), Magalhães, Braga e Barbosa (2015), Pereira (2014) e Souza et al. (2014) observou-se que quanto maiores as deformações nas estruturas analisadas, menores foram as correlações entre a técnica PIV e os valores reais de deformação, ou seja, nesses trabalhos a técnica PIV comportou-se melhor em pequenas deformações. Pereira (2014) verificou ainda a necessidade de mais estudos relacionados aos parâmetros da técnica PIV, tais como o tamanho da janela de interrogação, a importância da escolha de um *step size* adequado, o melhor tipo de marcador aplicado à superfície do material, o braço de busca estipulado, entre outros.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabendo da necessidade de avaliar e monitorar constantemente as peças estruturais das edificações é essencial a busca por técnicas com capacidade de exercer essa função com precisão, facilidade e com baixo custo de operação.

A utilização das técnicas não destrutivas de ensaio é uma boa opção frente às técnicas de ensaio utilizadas atualmente para medições de deformações e caracterização dos materiais. Entre as suas vantagens estão a rapidez nos ensaios, precisão, equipamentos com valor acessível e ainda não danificar os objetos ensaiados.

As técnicas não destrutivas como o Ultrassom, Densitometria por Raios X, *Stress wave timer*, vibração longitudinal e transversal, Pilodyn® e Resistograph®, entre outras, são ferramentas para caracterização de propriedades específicas dos materiais como a densidade e o módulo de elasticidade por exemplo. No entanto, essas técnicas demandam equipamentos específicos de medição e também não são capazes de analisar o comportamento mecânico de peças estruturais submetidas a carregamentos.

A técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) possui grande potencial para ser utilizada como ferramenta de medição de deformações e monitoramento de elementos estruturais em uso, podendo também ser utilizada como uma técnica de caracterização dos materiais.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. B. **Ensaaios não destrutivos para avaliação da integridade de elementos estruturais de madeiras em construções históricas**. 2010. 134 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- 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.
- ALMEIDA, D. H. et al. Determinação da rigidez de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 303-309, jun. 2016.
- ALMEIDA, D. H. et al. Madeira laminada colada (MLC) da espécie Paricá. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, Curitiba, v. 12, n. 30, p. 71-82, 2012.
- ASHLEY, P. N.; OZARSKA, B. Furniture from young, plantation grown Eucalyptus. In: THE FUTURE OF EUCALYPTS FOR WOOD PRODUCTS, 1., 2000, Launceston. **Proceedings...** Launceston: IUFRO, 2000. p. 150-158.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo setorial 2009, ano base 2008**. Curitiba, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- BABA, H. O.; PETH, S. Large scale soil box test to investigate soil deformation and creep movement on slopes by Particle Image Velocimetry (PIV). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 125, p. 38-43, 2012.
- BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H. A. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. La. Avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento com uso do método não destrutivo de vibração transversal. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, Curitiba, v. 10, n. 25, p. 5-14, 2011.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008.

BANGALEE, M. Z. I. et al. Flow visualization, PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 66, p. 306-314, 2013.

BELINI, U. L. **Caracterização tecnológica de painéis de fibras da madeira de eucalipto, *Eucalyptus grandis*, e de partículas do bagaço do colmo de cana-de-açúcar, *Saccharum sp.*** 2012. 169 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P. Densitometria de raios X aplicada na avaliação tecnológica de painéis MDF de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 343-350, 2009.

BENJAMIN, C. A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis*.** 2006. 158 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/101780>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites.** Malabar: Krieger, 1993. 712 p.

BOTELHO JÚNIOR, J. A. **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos.** 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado em Reabilitação do Patrimônio Edificado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products and wood science: an introduction.** New York: Blackwell, 2003. 554 p.

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.

BRASIL, M. A. M.; NICOLIELO, N.; VEIGA, R. A. A. Variação da densidade básica da madeira de *Pinus oocarpa* Schiede em diversas idades na região de Agudos, S. P. **Floresta**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 33-40, 1980.

BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 35-338, 2003.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultrassom, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 9, n. 4, p. 83-97, 2009.

CARREIRA, M. R.; CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classificação de peças estruturais de madeira pela técnica da vibração transversal. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 3-14, 2008.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Avaliação da rigidez à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 11, n. 53, p. 75-79, 2009.

CARREIRA, M. R. et al. Classificação estrutural de *Pinus* sp por vibração transversal. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: UFMT, 2004.

CARREIRA, M. R. et al. previsão do módulo de ruptura à flexão em toras de *eucalyptus* sp pelo ensaio de vibração transversal. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, Porto, v. 20, p. 67-72, 2012.

CARREIRA, M. R.; SEGUNDINHO, P. G. A.; DIAS, A. A. Estimativa do módulo de elasticidade à flexão de toras de madeira por meio de vibração transversal livre. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 3, n. 2, p. 27-31, jul./dez. 2011.

CARVALHO, A. M.; LAHR, F. A. R.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Use of Brazilian eucalyptus to produce LVL panels. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 11, p. 61-64. 2004.

CARVALHO, A. M.; LAHR, F. A. R. Painéis laminados estruturais LVL'S. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 1, maio 2003. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/artigos>>. Acesso em: 15 set. 2016.

CASTELO, P. A. R. et al. Influência de diferentes sítios de crescimento sobre a qualidade da madeira de Pinus taeda. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 495-506, 2008.

CHANG, H. T.; CHANG, S. T. Improvements in dimensional stability and lightfastness of wood by butyrylation using microwave heating. **Journal of Wood Science**, Heidelberg, v. 49, n. 5, p. 455-460, 2003.

COELHO, J. D. A. B. **Avaliação das características mecânicas de pavimentos de madeira antigos utilizando identificação dinâmica**. 2005. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.

COMISION FORESTAL DEL ESTADO DE MICHOACAN. **Atlas Forestal del Estado de Michoacan**. Morelia, 2001.

COUTO, A. M. et al. Modeling of basic density of wood from Eucalyptus grandis and Eucalyptus urophylla using nondestructive methods. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 27-34, 2013.

CRISTOFORO, A. L. et al. Metodologia para o cálculo dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira de dimensões estruturais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 4, p. 610-615, 2013.

DE PAULA, M. H. et al. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). **Biodiversidade**, Rondonópolis, v. 15, n. 2, p. 136, 2016.

DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I.; SOUZA, M. R. Avaliação não-destrutiva de painéis OSB modificados termicamente: parte 1- efeito do tratamento térmico sobre a velocidade de propagação de ondas de tensão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 67-75, dez. 2007.

DEL MENEZZI, C. et al. Effect of Nondestructive Evaluation of Veneers on the Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) from a Tropical Species. **Forests**, Berlin, v. 4, n. 2, p. 270-278, 2013.

DIAS, F. M. **A densidade aparente como estimador de propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-24072009-145333/>>. Acesso em: 29 mar. 2016.

DVORAK, W. S. Pinus oocarpa. In: Central America México Coniferous Resource Cooperative (CAMCORE) (Ed.). **Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative**. Raleigh: College of Natural Resources, North Carolina State University, 2000. p. 129-147.

DYKE, M. V. **An album of fluid motion**. Stanford: Parabolic, 1982. 176 p.

ECKELMAN, C. A. Potential uses of laminated veneer lumber in furniture. **Forest Products Journal**, Madison, v. 43, n. 4, p. 19-25, Apr. 1993.

EISFELD, C. D. L. **Análise da competitividade entre as indústrias de painéis de madeira: compensado, MDF e OSB no estado do Paraná**. 2009. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

FEIO, A. O.; MACHADO, J. S.; LOURENÇO, P. B. **Caracterização de propriedades da madeira de castanho na direção perpendicular ao fio: recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas de ensaio**. 2004. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/3077/1/2004_Feio_Machado2.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2016.

FERRAZ, E. S. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Uso de métodos nucleares nos estudos da qualidade da madeira. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 3., 1978, Manaus. **Anais...** Manaus: SBS, 1978. 1 CD ROM.

FERREIRA, A. T. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de Pinus caribaea var. hondurensis Barr. et Golf. por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 83, p. 287-298, 2009.

FERREIRA, M. Escolha de espécies de eucalipto. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 47, p. 1-30, 1979.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: United States Department of Agriculture, 1999. 463 p.

FREITAS, A. S.; GONCALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. Tratamento termomecânico e seus efeitos nas propriedades da Simarouba amara (Aubl.). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 565-572, Dec. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S217980872016000400565&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 28 nov. 2016.

GODOY, J. **Estudo de um novo compósito madeira-resina poliuretano para o desenvolvimento de um isolador híbrido**. 2007. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

GOMES, A. F. **Avaliação das características da madeira e da polpa de Eucalyptus mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva**. 2007. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

GOMES, F.C. **Inovações tecnológicas em estruturas de madeira**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2003. 118 p.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Relação entre características da madeira da polpa celulósica de Eucalyptus com métodos não destrutivos na árvore viva. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 205-220, 2011.

GREAVES, A. Pinus oocarpa. **Forestry**, Oxford, v. 43, p. 503–532, 1982.

GRUDZIENÍ, K. et al. Quantitative estimation of volume changes of granular materials during silo flow using X-ray tomography. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Lausanne, v. 50, n. 1, p. 59-67, 2011.

GUIMARÃES JUNIOR, J. B. et al. Influência do teor de parafina na variação dimensional em painéis aglomerados. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9., 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Ibramem, 2008. p. 251-251.

- HAJIALILUE-BONAB, M.; SOJOUDI, Y.; PUPPALA, A. J. Study of strain wedge parameters for laterally loaded piles. **International Journal of Geomechanics**, Reston, v. 13, n. 2, p. 143-152, 2011.
- HART, D. P. PIV error correction. **Experiments in Fluids**, Berlin, v. 29, n. 1, p. 13-22, 2000.
- HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Otimização de calibrações baseadas em espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa de propriedades da madeira de Eucalyptus. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 3, p. 615-624, 2010.
- HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira**. 1982. 119 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.
- HILL, C. A. S.; MALLON, S. The chemical modification of scots pine with succinic anhydride or octenyl succinic anhydride. I. Dimensional stabilization. **Holzforschung**, Berlin, v. 52, n. 4, p. 427-433, 1999.
- IEEE STANDARD ASSOCIATION. **IEEE 751 - Trial-Use design guide for wood transmission structures, power engineering society**. New Jersey, 1991. Disponível em: <<http://www.fpf.fs.fed.us/swst/environ.htm>>. Acesso em: 12 jul. 2016.
- ISIK, F.; LI, B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, n. 12, p. 2426-2435, 2003.
- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.
- IWAKIRI, S. et al. Produção de compensados de Pinus taeda L. e Pinus oocarpa Schiede com diferentes formulações de adesivo ureia-formaldeído. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 371-375, 2002.
- IWAKIRI, S.; MENDES, L. M.; SALDANHA, L. K. Produção de chapas de partículas orientadas OSB de *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de resinas, parafina e composição de camadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 89-94, 2003.
- IWAKIRI, S. et al. Influência da espessura de partículas e reforço laminar nas propriedades dos painéis de partículas orientadas OSB de Pinus taeda L. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 1, p. 116-122, jan./mar. 2009.

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

KEINERT JÚNIOR, S. Produção de compensados. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 5, n. 31, p. 42-45, abr. 1996.

KERL, J. et al. Tissue deformation analysis using a laser based digital image correlation technique. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, Amsterdam, v. 6, p. 159-165, 2012.

KIM, Y. et al. Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. **Water Resources Research**, Washington, v. 44, n. 9, 2008.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. 2000. 275 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

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).

LAROCCA, A. P. C.; SCHAAL, R. E. Monitoramento do comportamento dinâmico de uma passarela estaiada de madeira com gps e transdutor de deslocamento. **Revista Minerva**, São Carlos, v. 3, n. 1, p. 47-55, 2006.

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.

LOBÃO, M. S. et al. Qualidade do lenhoff de árvores de *Schizolobium parahyba* VAR. *amazonicum*, Acre, Brasil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 3, p. 374-384, 2012.

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

LUEPTOW, R. M.; AKONUR, A.; SHINBROT, T. PIV for granular flows. **Experiments in Fluids**, Berlin, v. 28, n. 2, p. 183-186, 2000.

MAGALHÃES, W. L. E. et al. Determinação de propriedades químicas e anatômicas de madeira com o uso da reflexão difusa de infravermelho próximo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 50, p. 25, 2005.

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.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2nd ed. San Francisco: M. Freeman, 1993. 689 p.

MANTILLA, E. V.; PEREIRA, N. C., S.; ALVES, R. C. Estimativa da densidade aparente, resistência à compressão e módulo de elasticidade da madeira por meio do resistógrafo. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 45-51, 2013.

MARTINI, A. J. **A Introdução do Eucalipto no Brasil completa 100 Anos**. Rio Claro, out. 2010. Blog Tudo Sobre Plantas. (Seção Artigos, Árvores, Cultivo, Meio Ambiente).

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de Pinus taeda L.** 1997. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MELCHIORETTO, D.; ELEOTÉRIO, J. R. Caracterização, classificação e comparação da madeira de Pinus patula, P. elliottii e P. taeda através de suas propriedades físicas e mecânicas. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 18., 2003, Blumenau. **Anais...** Blumenau: [s. n.], 2003. 1 CD-ROM.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Ultrasound nondestructive method to predict physical-mechanical properties of LVL made from Schizolobium amazonicum. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 263-273, 2016.

MELO, R. R. et al. Avaliação das propriedades físicas, químicas, mecânicas e de superfície de lâminas de Paricá (Schizolobium amazonicum Huber ex. Ducke). **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, p. 238-249, 2013.

MELO, R. R. **Avaliação de variáveis tecnológicas na produção de painéis LVL confeccionados com paricá (Schizolobium amazonicum Huber ex. Ducke)**. 2012. 182 f. Tese (Doutorado Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-11022011-105740/>>. Acesso em: 6 abr. 2016.

MENDES, R. F. et al. Determinação do módulo de elasticidade de painéis aglomerados por Stress Wave Timer. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 2, p. 117-122, 2012.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, Maringá, p. 37-47, 2010. Edição Especial.

MÜLLER, M. T. et al. Influência de diferentes combinações de lâminas de Eucalyptus saligna E Pinus taeda em painéis LVL. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 153-164, 2015.

MURPHY, J. F. **Commentary on factors affecting transverse vibration using an idealized theoretical equation**. Madison: Forest Products Laboratory, 2000.

NIEDOSTATKIEWICZ, M. et al. Application of ECT to solid concentration measurements during granular flow in a rectangular model silo. **Chemical Engineering Research and Design**, Elmsford, v. 88, n. 8, p. 1037-1048, 2010.

OLIVEIRA, F. G. R. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultrassom**. 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-25112014-152224/>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de Eucalyptus. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 929-936, set./out. 2010.

PAINEL de OSB oferece maior resistência para uso em estruturas. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 108, out. 2007. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1157&subject=>>. Acesso em: 22 nov. 2016.

PALMA, H. A. L. et al. Influência da qualidade das lâminas no desempenho mecânico à flexão de painéis compensados de *Hevea brasiliensis*. **Floresta e Ambiente**, Seropedica, v. 19, n. 2, p. 133-140, 2012.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PEDROSA, A. L. **Performance de vigas “I” constituídas por flanges de PLP e almas de compensado de Pinus taeda L. e Eucalyptus dunnii Maiden, e alma de OSB de Pinus spp.** 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 2003.

PEDROSA, A. L.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. produção de vigas estruturais em perfil i com painéis de madeira reconstituída de Pinus taeda L. E Eucalyptus dunnii Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 35, n. 3, p. 443-449, 2005.

PEREIRA, R. A. **Análise de esforços de flexão estática em madeira (Pinus Taeda) pelo método de velocimetria por imagem de partículas.** 2014. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e ambiência) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PERRY, J. P. **The Pines of Mexico and Central America**. Portland: Timber, 1991. 231 p.

POLGE, H. Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois: l'analyse densitométrique de clichés radiographiques. **Annals of Science Forest**, Heidelberg, v. 20, n. 1, p. 533-580, 1963.

QUIRINO, W. F. et al. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012.

QUOIRIN, N. S. R. **Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios x.** 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

RAFFEL, M. et al. Physical and technical background. In: RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry**. Berlin: Springer Verlag, 2007. p. 15-77.

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry: a practical guide**. Berlin: Springer Verlag, 1998. 253 p.

RENZO, R. **Painel estrutural de laminas paralelas (PLP) de Eucalyptus grandis utilizando adesivo resorcinólico, taninos e poliuretano derivado de óleo de mamona**. 2008. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

RIBEIRO, E. S. et al. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não- destrutivos. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 2, p. 103-106, 2016.

RIBEIRO, F.; A.; ZANI FILHO, J. Variação da densidade básica da madeira em espécies/procedências de Eucalyptus spp. **Revista IPEF**, Piracicaba, n. 46, p. 76-85, 1993.

RODRIGUES, M. C. **Estudo de flambagem em colunas utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV)**. 2015. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

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.

SANTOS, A. M. L. **Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” pré-fabricadas de madeira com flanges de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado**. 2008. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SEGUNDINHO, P. G. D. A. et al. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1155-1162, 2012.

SEGUNDINHO, P. G. D. A. et al. Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 13, p. 7-14, 2013.

SERVOLO FILHO, H. J. **Propriedades mecânicas da madeira de clones de seringueira (Hevea brasiliensis-RRIM600 E GT1) analisadas em duas épocas do seu ciclo fenológico anual**. 2013. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. Disponível em:
<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-14052013-170717/>>.
Acesso em: 7 abr. 2016.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de Eucaliptus 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, J. C. et al. Influencia da idade e da posição radial na massa específica da madeira de Eucalyptus grandis. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, 2004.

SILVA, L. B. **Variação na estrutura da madeira de quatro espécies da caatinga nordestina e seu potencial para o desenvolvimento sustentável.** 2006. 141 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Salvador, 2006.

SILVA, S. A. M.; GONÇALVES, R. Avaliação da distribuição da densidade em MDF a partir da técnica da onda de ultra-som. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 74, p. 19-26, 2007.

SIQUEIRA, K. P. **Variabilidade da massa específica de Pinus taeda L. em diferentes classes de sítio.** 2004. 43 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

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

SMITH, W. F. **Principles of materials science and engineering.** 2nd ed. New York: Mc Graw-Hill, 1990.

SOUZA, F.; DEL MENEZZI, C. H. S.; BORTOLETYO JÚNIOR, G. Material properties and nondestructive evaluation of laminated veneer lumber (LVL) made from Pinus oocarpa and P. kesiya. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 69, n. 2, p. 183-192, 2010.

SOUZA, F. **Propriedades mecânicas, físicas, biológicas e avaliação não destrutiva de painéis de lâminas paralelas (LVL) com madeira de Pinus oocarpa e P. kesiya.** 2009. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

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.

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.

STANGERLIN, D. M. et al. Estimativa do módulo de elasticidade em painéis aglomerados por meio de emissão de ondas ultra-sonoras. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 17-22, 2010.

SUCHSLAND, O. **Warping of furniture panels**. Michigan: Agriculture Experimental Station, 1972. 48 p. (Extension Bulletin, E-745).

SYROKA-KOROL, E.; TEJCHMAN, J. Experimental investigations of size effect in reinforced concrete beams failing by shear. **Engineering Structures**, Guildford, v. 58, p. 63-78, 2014.

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.

TOMAZELLO, M. et al. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. *Maderas*. **Ciencia y Tecnología**, San José, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

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

VALE, A. T.; DIAS, Í. S.; SANTANA, M. A. E. Relationships among chemical properties, physical and energy wood properties of five cerrado species. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-146, 2010.

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

VALVERDE, S. R. et al. Reflorestamento: mercado da madeira de reflorestamento no Brasil **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 87, fev. 2005. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=689&subject=Reflorestamento&title=Mercado>. Acesso em: 22 nov. 2016.

VARY, A. (Ed.). “**Materials analysis by ultrasonics**”. Park Ridge: Noyes Data Corporation, 1987.

WANG, S.; WINISTORFER, P. M. The effect of species and species distribution on the layer characteristics of OSB. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 4, p. 37-44, 2000.

WEHR, N. J.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, através da microdensitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 58, p. 161-170, 2000.

WHITE, D. J.; TAKE, W. A.; BOLTON, M. D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. **Geotechnique**, London, v. 53, n. 7, p. 619-632, 2003.

WIENEKE, B. Stereo-PIV using self-calibration on particle images. **Experiments in Fluids**, Berlin, v. 39, n. 2, p. 267-280, 2005.

XAVIER, J. et al. Direct evaluation of cohesive law in mode I of *Pinus pinaster* by digital image correlation. **Experimental Mechanics**, Brookfield, v. 54, n. 5, p. 829-840, 2014.

XU, S. et al. Estimation of turbulence characteristics from PIV in a high-pressure fan-stirred constant volume combustion chamber. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 110, p. 346-355, 2017.

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.

YUAN, B. et al. Development of a robust Stereo-PIV system for 3-D soil deformation measurement. **Journal of Testing and Evaluation**, Philadelphia, v. 40, n. 2, p. 256-264, 2011.

ZARRUK, G. A. Measurement of free surface deformation in PIV images. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 16, n. 10, p. 1970, 2005.

ZEGARRA, B. E. V. **Caracterização da estrutura anatômica e da densidade do lenho de árvores de Pinus taeda e efeito nas propriedades tecnológicas dos painéis OSB**. 2011. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-22122011-084728/>>. Acesso em: 6 abr. 2016.

ZENID, J. G. **Madeira**: uso sustentável na construção civil. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisa Tecnológica, 2009.

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

**PARAMETERS CRITERIA FOR PIV ANALYSIS APPLIED IN THE
LOAD STUDY OF BEAMS**

Artigo redigido conforme norma NBR 6022 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003)

ABSTRACT

The use of particle image velocimetry (PIV) technique for flow measurements in liquid and gaseous materials and measurement of deformations in solid materials is an option over conventionally used test techniques. However, the PIV technique requires an adequate choice of each of its parameters so that its final results are accurate and reliable. The objective of this study is the detailed analysis of window size, step size, search size, threshold and marker patterns, as well as the study of the influence of these parameters on the final result. The study was carried out using test samples of *Eucalyptus grandis* wood subjected to static bending test in a universal testing machine. The application of the PIV technique occurred simultaneously to the static bending tests. Dial indicators were placed in three regions of the test samples for comparison of the deformation values obtained by the two techniques. The results showed that the adequate choice of the parameters of the PIV technique contributed directly to the non-existence of false positives, increasing its precision and reliability. It was concluded through this study that the PIV technique is a tool for measuring deformations with precision similar to conventional test techniques, from the definition and choice of parameters as established in the theoretical models.

Keywords: Non-destructive technique. Particle image velocimetry. Structural monitoring.

1 INTRODUCTION

The measurements of deformations in solid surfaces, mainly in structures used in the construction industry are of high complexity and demand expensive equipment. This topic is currently the object of research with the goal to improve the used techniques, to reduce the cost of testing, to promote rapid and accurate measurement and to create new testing methodologies.

The test methodologies may be divided into destructive and non-destructive test techniques. The first one deals with the tests that use the direct contact with the material under study, as it happens in the tests executed in Universal Testing Machines (UTM). Non-destructive testing techniques are those that use physical principles to infer the properties and behavior of materials.

The conventional analysis is associated to negative points as the delay in results, high number of samples, and consequently a high cost of operation (GOUVÊA et al., 2011). Thus, the increase in the use of non-destructive testing techniques is due to the reliability of its results, quicker tests and it does not harm the later use of the analyzed materials (DE PAULA et al., 2016).

Among the non-destructive techniques, optical techniques have become more popular in the field of measurements of displacements and deformations in solid bodies. The Particle Image Velocimetry (PIV) technique is an optical technique with great potential to measure displacements and trajectories of particles in a determined body or medium.

The PIV technique was originally developed in the field of fluids and gases, with several applications in this field of study (BANGALEE et al., 2013; XU et al., 2017). Recently, some authors have studied the application of this methodology in solid materials to verify deformations and to find the mechanical properties (BRAGA JÚNIOR et al., 2015; MAGALHÃES; BRAGA; BARBOSA, 2015; PEREIRA, 2014; SOUZA et al., 2014).

The main parameter for the execution of the PIV technique is the type of pattern used and its distribution on the surface of the sample. The size of the square region of analysis (WSIZE), the distance that the algorithm should search (Search length) a given region of analysis from a pre-established point, the search step (Step length) and the degree of similarity between regions of analysis (Threshold) are also important parameters.

This work aims to evaluate the parameters related to the implementation of the PIV technique such as the best type of pattern along with its distribution and randomness on the surface of the objects under study. In the same way, the parameters directly related to the PIV (WSIZE, Search length, Step length and Threshold) algorithm are studied. These parameters are of fundamental importance to the measurement values discriminated by the PIV technique to be as accurate as the values obtained by the conventional techniques of test and measurement.

1.1 Theoretical foundation

1.1.1 Pearson correlation coefficient

The Pearson Correlation Coefficient (PCC) (PEARSON, 1895) measures the correlation degree between two signals X and Y, with N samples denoted by X_i and Y_i respectively.

$$\rho(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu_x) \cdot (Y_i - \mu_y)}{N \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}$$

where: μ_x , σ_x , μ_y and σ_y are the expected values and the standard deviation values of the signals X and Y respectively. The range value of the coefficient is between $-1 \leq \rho(X, Y) \leq +1$, where a value close to +1 indicates that there is a high correlation level

between X and Y, on the other hand values close to 0 indicate that there isn't a correlation, and finally values close to -1 indicate that there is a correlation but with opposite sense, this means, for example, that when a variable grows the other decreases its value proportionally.

1.1.2 Particle image velocimetry

The Particle Image Velocimetry (PIV) is an optical technique designed to flow visualization. This method needs, to be executed, that the flow in study contains particles, in other words, visible elements in the flow; thus pictures of flow movement are taken and the position of particle groups are identified between images, forming a velocity flow map with magnitude and direction (ADRIAN, 1991).

To recognize two identical particle groups between two consecutive images, many methods may be used, the most widely used method in published material is the PCC method; for this purpose analysis regions are selected in each image and if the PCC value, calculated over these data, exceeds a threshold, the match is declared and the particle groups are identified, else ways, another analysis region is selected in one image and the match test is performed again.

1.2 System description

1.2.1 Definitions used in the PIV technique

Analysis region: An analysis region, in the PIV technique, is a rectangular or square image portion that is selected to analyze particle groups in the image. Thus, if two analysis regions are selected, they can be compared to each other to seek two coincident analysis regions.

1.2.2 Parameters used in the PIV technique

Window size: In the PIV technique, the window size (WSIZE) of a square analysis region has reference to the length in pixels of the side of this region. An increment in the WSIZE value promotes an increase of the computational cost of the method, but in counterpart, an increment in the quantity of the signal information inside the analysis region, and consequently it decreases the probability of having a false positive in the match of two analysis region in two images. On the other hand, small WSIZE values, avoid the loss of correlation between two matched analysis regions that undergo deformation.

Threshold value: The threshold value (T_v) used in the PIV technique indicates the minimum value of PCC that is used to detect a match between two analysis regions. A high threshold value guarantees that the particle groups in matched analysis regions are effectively the same; but it avoids, that two of the same analysis regions be matched when these suffer position deformations in its particle groups. Moreover, a low threshold value guarantees that the analysis regions can be matched after going through considerable position deformations in its particle groups but widens the possibility of having false positives in the matched analysis regions.

Step length: The step length (l_0) is an integer value in pixels, which is used as minimum dislocation unit to choose the portion of the image where the analysis region will be selected from. Thus, if two analysis regions are selected in two different images, if a match is not declared between these images, one of these images is discarded and a new analysis region is selected, distant a step length away from the discarded analysis region.

Search length: In the same context of the “Step length”, the search length (L) denotes the maximum distance (horizontal and/or vertical) in pixels to select a new analysis region, from the original position of the initial analysis region. Hence the distance displaced n_{i0} , $\forall n \in Z^+$, to choose a new analysis region, should be $n_{i0} \leq L$.

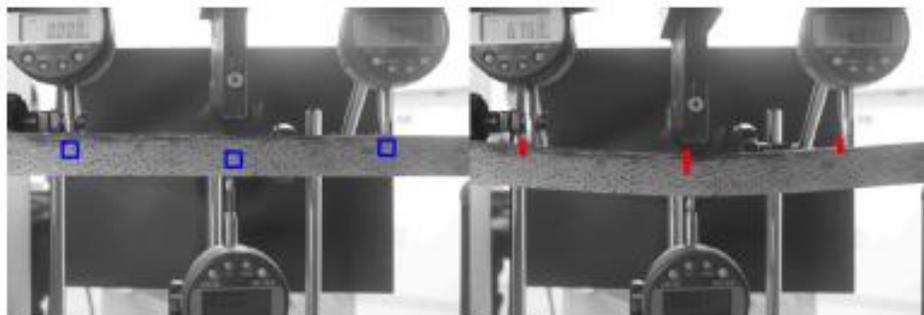
2 MATERIAL AND METHODS

A static bending test of beams in an universal testing machine (brand AROTEC) with capacity of at least 300 kN was done. The tests were conducted with samples without defects, from *Eucalyptus grandis* wood, with dimensions of $2.5 \times 2.5 \times 41$ cm. The execution of the tests and the preparation of the samples were done based on the norm ASTM D143 – 94 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1994).

2.1 System setup

The PIV technique in the context of the static bending test of beams is presented in this work, as the tracking of a set of $N = 3$ analysis regions, selected in an initial picture, through its subsequent displacement captured in pictures taken in standard intervals (T). Figure 1 shows two times the same initial picture taken in the time $t = 0$. The picture on the left represents the beam in study with N square analysis regions of $WSIZE$ pixels; this regions are tracked through a set of M pictures according to a path. This is shown in the right side of the same figure.

Figure 1 Selected $WSIZE$ and followed path.



Source: Do Author.

Initially the static bending system was composed by a universal testing machine and dial indicators to measure the deflection values of beams, additionally a digital camera (CANON EOS Rebel T3) was positioned to take pictures of the tests. The camera was equipped with a lens set to improve the focusing of the surface of samples; the images were taken through the use of a remote control to minimize external interferences in capture time. The instrumentation can be exemplified by Figure 2.

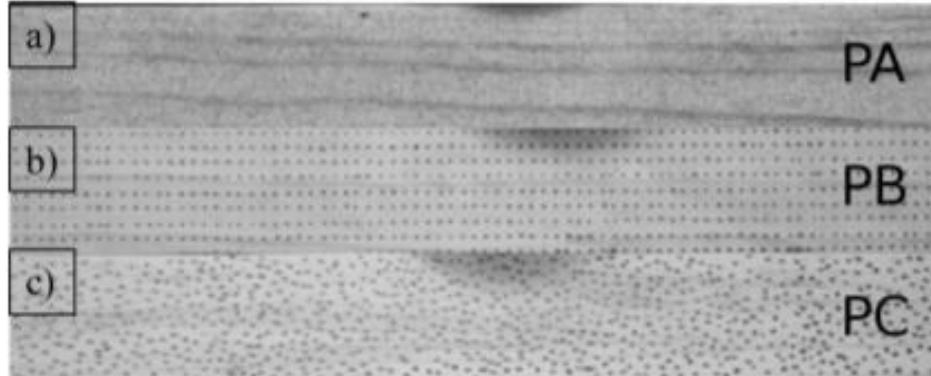
Figure 2 System setup description.



Source: Do Author.

The wood samples were submitted to 3 different treatments in its surface; painted with spray (PA), marking points in regular grid shape of 5 pixels of diameter and separation of 11 pixels, with a brush pen (PB), and random marking points of ~5 pixels of diameter and separation of ~11 pixels with a brush pen (FIGURE 3) so that the PIV algorithm used these points as particle groups and it can track them between consecutive pictures.

Figure 3 Surface of the samples with the 3 different treatments.



Subtitle: Surface of the samples with the 3 different treatments. a) Black spray paint. b) Points in regular grid with brush pen. c) Random points with brush pen.

Source: Do Author.

It was pre-establishment that, the images would be taken in regular intervals of $T = 30s$; this interval gave us an adequate number of images to execute the procedures. The first image was taken at the instant $t = 0$ with displacement zero. After the end of the test, the images were edited to decrease its size in pixels (change the original image to 8 bit format and decreasing the number of pixels to 25%); this procedure is done to achieve low computational time when the PIV algorithm is used as described in the section 2.2.

2.2 Algorithm description

The Algorithm 1 shows the procedure of PIV technique implemented in this work. The algorithm needs as input data a set of M pictures P_m , for all m integer so that $0 \leq m \leq M - 1$. These pictures represent the process X_n^0 of load and break static test; for this purpose, in the picture P_0 , N points X_n^0 , for all n integer so that $0 \leq n \leq N - 1$ will be chosen.

Algorithm 1: PIV algorithm

Data: A set of M pictures P_m taken each T seconds.

Result: X_m^n , a path that describes the deformation of the beam caused by load and break study of N analysis regions through M Pictures.

$\{X_0^n, WSIZE\} \leftarrow \text{quality_test}(P_0);$

Choose the values of T , l_0 and L ;

```

for  $m \leftarrow 1$  to  $M - 1$  do
  | for  $n \leftarrow 0$  to  $N - 1$  do
  | |  $\{X_m^n, Found\} \leftarrow$ 
  | |  $\text{search\_around\_of}(X_{m-1}^n, A_{m-1}^n, P_m)$ 
  | end
end

```

The function *quality_test()*, described in the Algorithm 2, helps the user to choose the better position of initial tracking points X_n^0 , in the picture P_0 , and the side size (WSIZE) of the analysis regions A_0^n . This function uses internally the functions *make_displacement_test()* and *make_rotation_test()*, that are described in the Algorithm 3 and 4, respectively. Section 3.1 shows some examples of a quality test.

Algorithm 2: Quality test of chosen points.

Function *qualit_test(P)* **is**

Input : It uses a picture P where a set of N initial analysis region will be chosen.

Output: $\{X^n, WSIZE\}$, the points X^n where the analysis regions and a variable $WSIZE$ that indicates their side size will be chosen.

repeat

- Choose the values of N and $WSIZE$;
- Select N points X^n in the picture P ;
- According to X^n and over P a set of analysis regions A^n of side $WSIZE$ pixels;

for $n \leftarrow 0$ **to** $N - 1$ **do**

 make_displacement_test ($X^n, WSIZE, P$);

 make_rotation_test ($X^n, WSIZE, P$);

end

until *User approves the results of displacement and rotation tests;*

end

The Algorithm 3 returns a graphic where a curve that describe the PCC value between an initial analysis region in (i_0, j_0) and its neighbors in (i, j) that fulfill $0 \leq |i - i_0| < d_{\max}$ and $0 \leq |j - j_0| < d_{\max}$, is shown. Here we suggest that $d_{\max} \equiv L$.

The Algorithm 4 returns a graphic where a curve that describes the PCC value between an analysis region and its rotated versions up to an angle of α_{\max} degrees.

In the Alg. 1 the variables L , l_0 and T , were also chosen. The criteria to select these values using the results of the quality test can be seen in the section 3.2. Furthermore, in the Alg. 1, the function *search_around_of()*, described in the Algorithm 5, searches for an analysis region that matches A_{m-1}^n , around the point X_{m-1}^n in the picture P_m , and, if the match exists, then the point X_m^n of match is returned, joint with the variable *Found* loaded with *True*; in other cases *Found* is loaded with *False*.

Algorithm 3: Displacement test of one point.

Function *make_displacement_test* ($X, WSIZE, P$) **is**

Input: A picture P , a point $X \equiv (i_0, j_0)$ and a variable $WSIZE$.

Output: A figure with the correlation of an analysis region, in the point X , with its neighbor analysis regions.

According to X and over P an analysis region A_0 of side $WSIZE$ pixels;

Choose the value $d_{max} > 0$;

for $a \leftarrow -(d_{max} - 1)$ **to** $d_{max} - 1$ **do**

for $b \leftarrow -(d_{max} - 1)$ **to** $d_{max} - 1$ **do**

$X_{ab} \leftarrow X + (a, b)$;

 According to X_{ab} and over P an analysis region A_{ab} of side $WSIZE$ pixels;

$C_{ab} \leftarrow \rho(A_0, A_{ab})$

end

end

Plot the values of C_{ab} ;

Plot C_d from C_{ab} , so that

$d = \sqrt{(a - d_{max})^2 + (a - d_{max})^2}$, and using the highest value of PCC when many PCC values coincide with the same d distance;

end

Algorithm 4: Rotation test of one point.

Function *make_rotation_test* ($X, WSIZE, P$) **is**

Input: A picture P , a point $X \equiv (i_0, j_0)$ and a variable $WSIZE$.

Output: A figure with the correlation of an analysis region, in the point X , with its rotated versions.

According to X and over P an analysis region B_0 of side $WSIZE$ pixels;

Choose the value $\alpha_{max} > 0$ degrees;

for $d \leftarrow 0$ **to** d_{max} **do**

$\alpha_i \leftarrow 0.5_i$

 According to X and over P an analysis region B_d of side $WSIZE$ pixels rotated an angle α_i ;

$C_d \leftarrow \rho(B_0, B_d)$

end

Plot the values of C_d .

end

Algorithm 5: Search a match with A , around a point X in a picture P .

Function *search_around_of*(X, A, P) **is**

Input: It uses a picture P where an analysis region that matches with A will be searched, this region will be searched around the X point .

Output: $\{Y, Found\}$, the point Y where a match with A and a variable $Found$ that indicates if the match exist are found.

$Found \leftarrow False$

$Y \leftarrow X$

$OldPCC \leftarrow -1.0$

$i \leftarrow 0$

$j \leftarrow 0$

while $l_0i \leq L$ **do**

while $l_0j \leq L$ **do**

- $y \leftarrow X + l_0(i, j)$;
- According to y and over P analysis region R of side $WSIZE$ pixels;
- $PCC \leftarrow \rho(R, A)$;

if $PCC \geq T$ **and** $PCC \geq OldPCC$ **then**

$Y \leftarrow y$

$Found \leftarrow True$

$OldPCC \leftarrow PCC$

end

$i \leftarrow i + 1$

$j \leftarrow j + 1$

end

end

end

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Quality tests

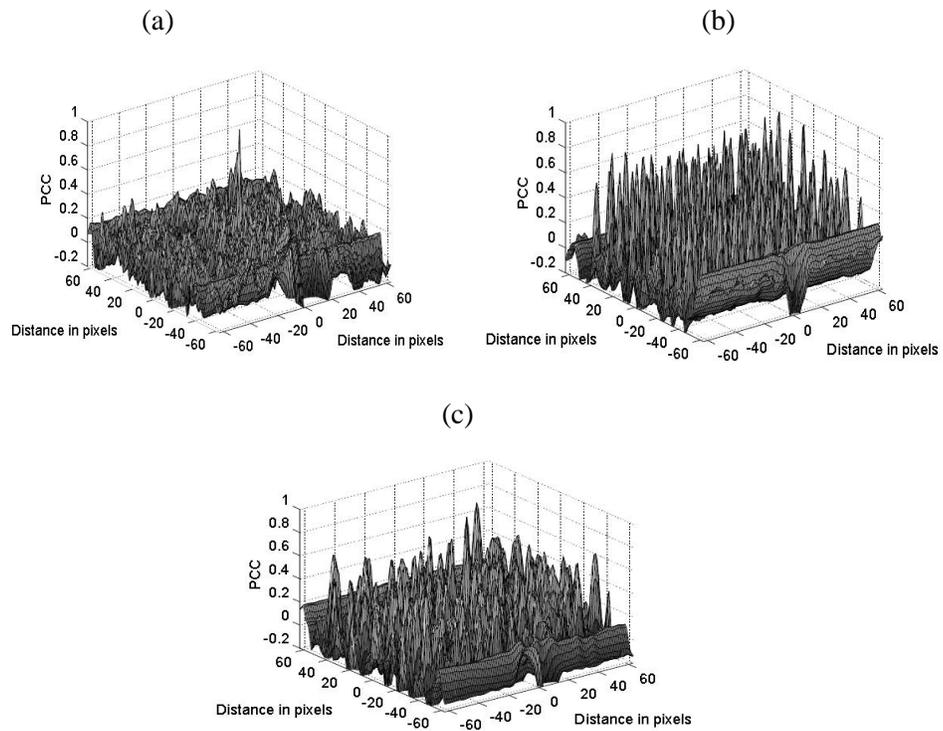
In the next tests we compare 3 types of patterns, over the beams, that we call PA, PB and PC as presented in Figure 3.

3.1.1 Test-1: Displacement test

The test-1 (presented in the Algorithm 3) shows the correlations obtained between two square analysis regions ($A_{i_0j_0}$ and A_{ij}), of WSIZE pixels of side, separated by a distance $d = \sqrt{(i - i_0)^2 + (j - j_0)^2}$ in pixels. The first selected analysis region is $A_{i_0j_0}$, and it is chosen in the pixel position (i_0, j_0) , later this is compared to all analysis regions A_{ij} chosen in the pixel position (i, j) , $\forall_{i,j} \in Z^+ 0 \leq |I - i_0| < L, 0 \leq |j - j_0| < L$. Thus, for purposes of this comparison we use the patterns PA, PB, and PC, and also three different WSIZE values (16, 32 and 64).

The next figures show the results of displacement test using the value $(0; 0)$ to appoint the pixel position $(i_0; j_0)$; in each figure the behavior of one type of pattern is shown. Figure 4 represents the result of the displacement test to WSIZE = 16, Figure 5 represent the result of the displacement test to WSIZE = 32 and Figure 6 represents the results of displacement test to WSIZE = 64.

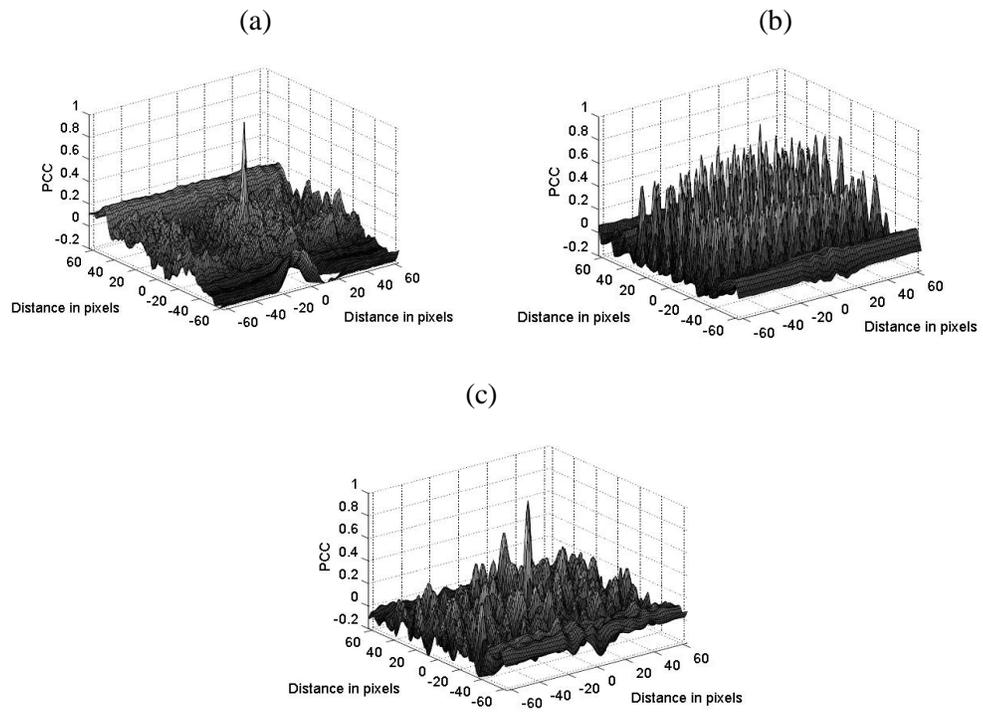
Figure 4 Displacement test with $WSIZE = 16$.



Subtitle: (a) Pattern A. (b) Pattern B. (c) Pattern C.

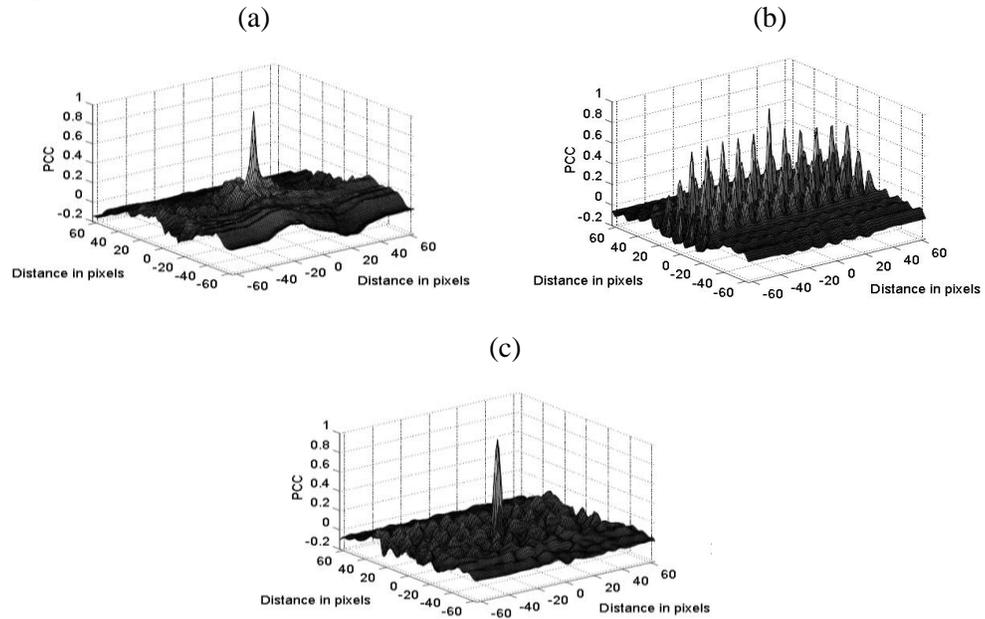
Source: Do Author.

Figure 5 Displacement test with $WSIZE = 32$.



Subtitle: (a) Pattern A. (b) Pattern B. (c) Pattern C.
Source: Do Author.

Figure 6 Displacement test with WSIZE = 64.

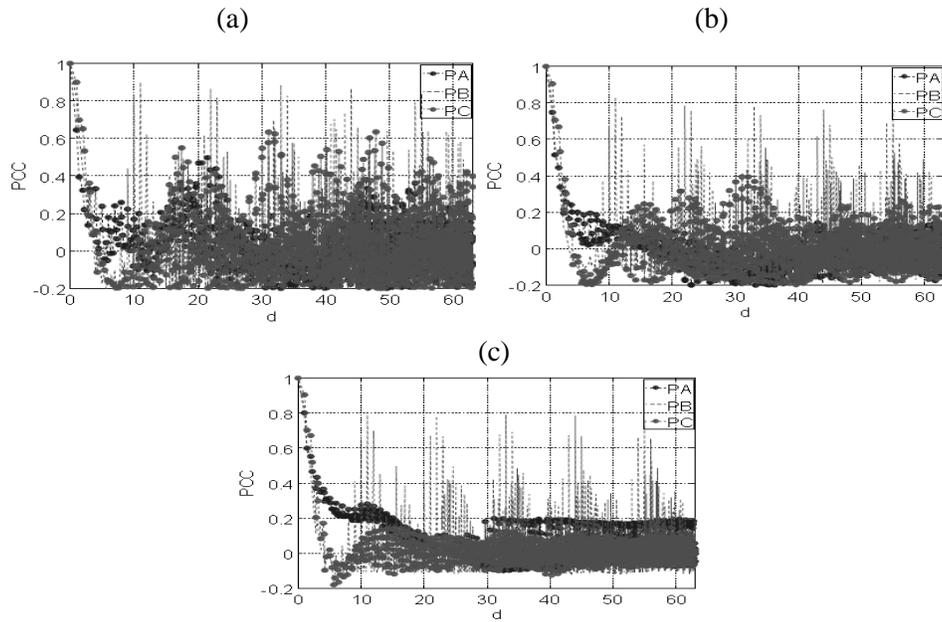


Subtitle: (a) Pattern A. (b) Pattern B. (c) Pattern C.

Source: Do Author.

Finally, for a better understanding of the data Figure 7 was created from the data in the Figures 4, 5 and 6. Each new figure represents the loss of correlation of the 3 different patterns, in relation to the distance d to the pixel position $(i_0; j_0)$; it is important to note that, if many pixel positions represent the same distance, then only the value with the highest correlation is plotted.

Figure 7 Loss of correlation in relation to the distance from the origin to a WSIZE.



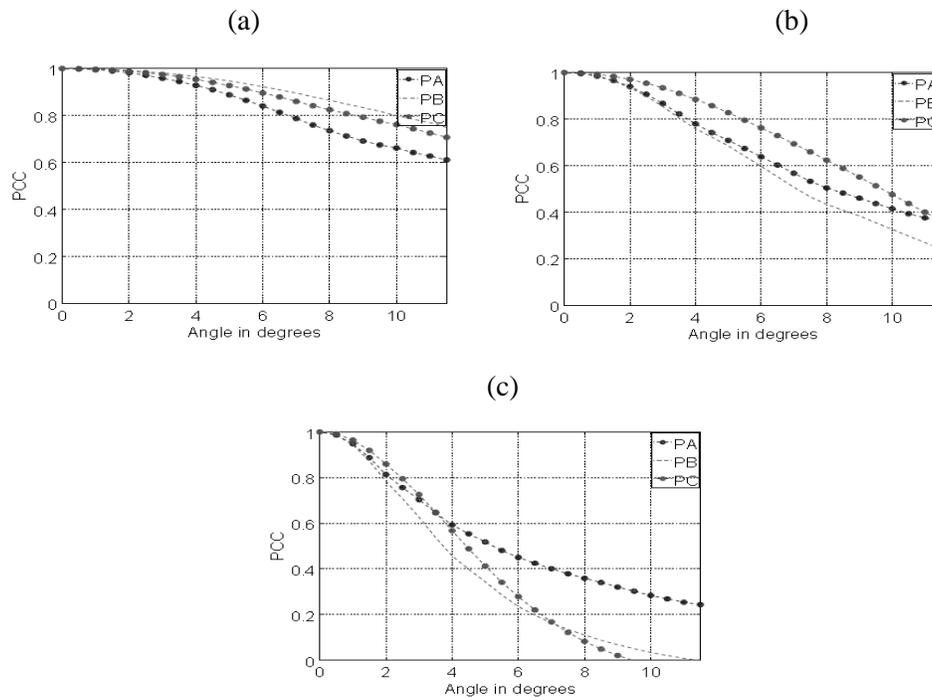
Subtitle: (a) $WSIZE = 16$. (b) $WSIZE = 32$. (c) $WSIZE = 64$.
Source: Do Author.

3.1.2 Test-2: Rotation test

The test-2 (presented in the Algorithm 4) shows the correlations between square analysis regions (B_0 and B_i), of $WSIZE$ pixels of the side. So that B_i is a rotated version, an angle $\alpha_i = 0.5i$, of analysis regions B_0 , $\forall_i \in \mathbb{Z}^+ 0 \leq i \leq 23$.

Figure 8 shows the PCC value for an analysis regions rotated up to an angle of $\alpha_{max} = 11.5^\circ$, in each figure is shown the behavior for the 3 types of patterns. Figure 8 (a) uses a $WSIZE = 16$, Figure 8 (b) a $WSIZE = 32$ and Figure 8 (c) a $WSIZE = 64$.

Figure 8 PCC value for a rotated analysis region.



Subtitle: (a) WSIZE = 16. (b) WSIZE = 32. (c) WSIZE = 64.

Source: Do Author.

3.2 Criteria for variable selection

3.2.1 Choosing the type of pattern

In the test-1 we can see the correlation analysis of 3 types of patterns (see Figure 3). This results can be used to select the best pattern to use in the load and break study of beams; for example, following the Figure 7, it is easy to see that a periodic pattern as PB has also a periodic behavior in the PCC value; so that we have to consider values of threshold $T_v \geq 0.82$ in the Figures 7(b) and 7(c) and $T_v \geq 0.9$ in the Figure 7(a), so that less values of these threshold have the probability of causing false positives in the recognition of an analysis region.

Given that, in the pattern PB, many positions share correlation values with similar values for a threshold relatively high like $T_v = 0.75$, we do not recommend the use of periodic patterns like PB.

The patterns PA and PC are random in nature, with the difference that the pattern points in PC are big and few, and in the PA are many and small. Following the Figure 7, we can see that the PCC values have a behavior approximately monotone decrescent when the size of the analysis region is greater when compared to the size of points in the pattern. Thus, the pattern PA and PC have a strange behavior to a $WSIZE = 16$; so that the T_v value, necessary to have a false positive is $T_v < 0.6$ to PA and PC; we can see this clearly in the Figure 7(a) given that the values of PCC that fulfill this condition only are very close to the origin. In the same sense to a value $WSIZE = 32$, the threshold conditions necessary to have false positives are $T_v < 0.2$ and $T_v < 0.4$ to PA and PC, respectively; these values of PCC are much lower and close to the origin therefore never lead to confusion. Finally, to a value $WSIZE = 64$, the threshold conditions necessary to have a false positive are $T_v < 0.3$ and $T_v < 0.2$ to PA and PC, respectively; these values of PCC are lower like the one obtained with $WSIZE = 32$, therefore these are equally convenient to those obtained with $WSIZE = 32$. Thus, in the Figure 7 (a), there is not a clear advantage of PA over PC given that both support analysis regions of $WSIZE \geq 32$.

In the test-2 we can see the correlation analysis of two rotated analysis regions, to the 3 types of patterns seen in the Figure 3. For a fair comparison, we establish the value $PCC = 0.82$ as the analysis line for the Figure 8, given that we consider values lower than this have given us an error in the recognition of the analysis region. In the Figures 8(a) and 8(b) there is a marked difference to recognize an analysis region in favor of the pattern PC, as this supports a superior rotation angle range. Additionally, in the Figure 8(c) we observe that there is not a significant difference between the angle range when the patterns PA and PC are

compared. Here, it is important to note that in all cases an analysis region with a very large WSIZE, when compared to the size of the points in the pattern (in this case WSIZE = 64), prevents identifying the rotated analysis region correctly. This is expected granted the deviation to a distance d_0 caused by an angle α_0 is less significant than a deviation to a distance $2d_0$. The effect of the rotation is very important in the load and break study of beams, given that in these tests there are small angle rotations in regions analyzed between two consecutive images.

Thus, we recommend the use of patterns such as PC (with big dot patterns) given that for analysis regions, rotated a small angle, these maintain the PCC value better; and consequently the correlation analysis is able to identify better a rotated region.

3.2.2 Choosing the window size

As it can be seen in the Test-1, the value of WSIZE influences the recognition of displaced analysis regions. Thus, a pattern such as PC, with patterns points of 5 pixels of diameter and separation of 11 pixels, needs a WSIZE > 32 to avoid false positives in the analysis region recognition process using a threshold value relatively lower, see Figure 7(b); given that, analysis regions with WSIZE ≤ 32 results in regions with a few characteristic details (information) and the probability of finding a similar region is high.

On the other hand as it can be seen in the Test-2, the value of WSIZE also influences the recognition of rotated analysis regions. So that, for a pattern such as PC, a WSIZE = 64 only allows recognition of analysis regions rotated at most an angle of 2.5° (for a threshold of PCC = 0.82). Thus, to a pattern like PC (similar diameter and separation of pattern points), we recommend the use of a $32 \leq \text{WSIZE} \leq 64$.

3.2.3 Choosing the threshold value

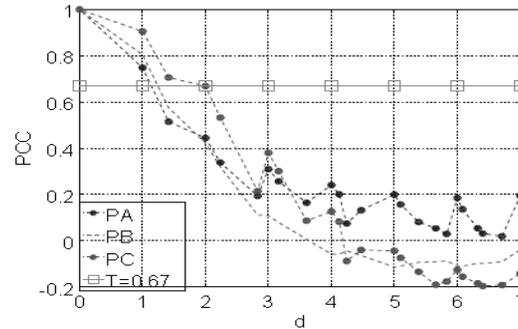
For a pattern as PC, the choice of a threshold T_v depends on the used value for WSIZE; for example, in the Figure 7(a), where a WSIZE = 16 is used, the form of the correlation curve limits the threshold to a value of $T_v \geq 0.60$, given that smaller values cause false positives in the recognition process of analysis regions. Furthermore in the Figure 7(b) the correlation curve limits the threshold to a value of $T_v \geq 0.40$. In all these cases the specific used threshold value of PCC will be chosen taking into account the chosen step length l_0 .

3.2.4 Choosing the step length

The first thing to consider is that if we define a step length such as l_0 pixels, the maximum (bi-dimensional) measure error, in predicting the displacement of an analysis region between two consecutive images, will be of $l_0/2\sqrt{2}$ pixels. Thus if the step length is $l_0 = 1$ pixel, then the maximum displacement error will be of 0.70711 pixels; being this the minimum (desirable) of the maximum displacement error in the technique, and we recommend the use of image sizes that allow acceptable processing times with a step length of $l_0 = 1$ pixel. But if it is desired to use other values for the step length, we should take in consideration other involved variables such as the used threshold.

For example, if we establish the threshold for a value of PCC = 0.67 in the test-1, where a WSIZE = 32 is used (see Figure 9), then we observe that, for the pattern PC, the error in the displacement prediction before losing the analysis region in the recognition process, it is of 2 pixels, or in others words $l_0/2\sqrt{2} \leq 2$ pixels.

Figure 9 Region of analysis with a WSIZE = 32 and $T_v = 0.67$



Source: Do Author.

This means that the possible used step length values should be $l_0 \leq 2.8284$ pixels, given that a superior value of l_0 cause correlation values smaller than 0.67, and this indicates by definition a lost analysis region.

Another example will be the case of the pattern *PA*, where $l_0/2\sqrt{2} \leq 1.2$ pixels. In these cases, we can only choose integers values to l_0 , so that we choose $l_0 = 1$ pixels.

3.2.5 Choosing the search length

The search length parameter (L), is the most free of the parameters. In random patterns as *PA* and *PC* it only depends of computing power available. In periodic patterns as *PB*, if the threshold is very low; by example, with a threshold of $T_v = 0.4$ in the Test-1 as in the Figure 7(b); the value of L should be $L \leq 9$ pixels. In other cases, L can happen a false positive in the recognition process of the analysis regions.

3.3 Measure error in the PIV technique

Like any measure technique, the PIV technique also has considerations to estimate the maximum measure error in the calculation of the displacement. To determinate analytically this data, we have to use the result of section 3.2.4, where we have seen that the maximum (bi-dimensional) measure error, in predicting the displacement of an analysis region between two consecutive images, is of $l_0/2\sqrt{2}$ pixels. Thus, given that in the process of PIV technique we made $M - 1$ comparisons with the M pictures, to determinate the maximum (possible) measure error e in pixels, we use the following equation

$$\text{Measure error} \leq e \equiv l_0 (M - 1) \frac{\sqrt{2}}{2}$$

For everything seen before, it is easy to notice that to get the maximum measure error in millimeters we use $l_0 (M - 1) \frac{\sqrt{2}}{2} \beta$, where β is the conversion factor of pixel to millimeters; thus, to improve e we should minimize this relation, using pictures with a resolution as large as our computing power allows.

3.4 Numerical results

The next figures show the results of submitting a beam to a load and break static test; thus, a system setup like the one described in the section 1.2 was used. The test results were obtained using two methods, the first method uses dial watches and the second applies the *PIV* technique (see section 2.2) over $M = 19$ pictures, as described in the section 3.1 following the procedure described in Alg. 1, with the consideration that in the pictures, 1 pixel is equivalent to 0.27027 millimeters.

In the test, the dial watches will return the maximum deformation of the beam, as it is shown in Table 1. Figures 1 and 2 describe the disposition of these

watches, where the *dial indicator 0*, *dial indicator 1* and *dial indicator 2* represent the dial indicators in the left, middle and the right, respectively.

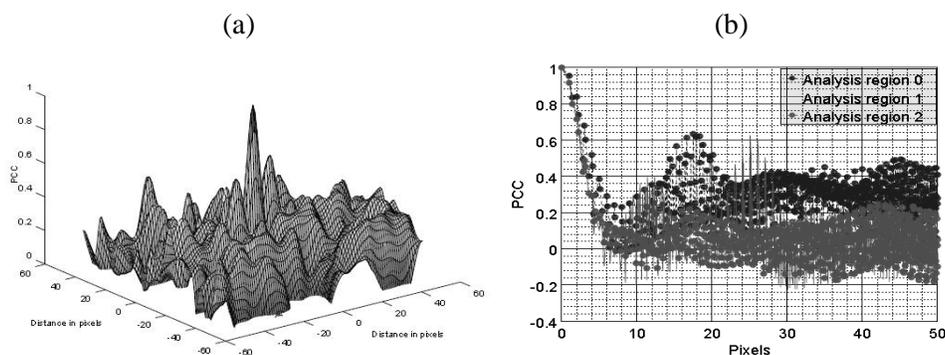
Table 1 Beam deformation measure with the dial watches.

	Dial watch 0	Dial watch 1	Dial watch 2
Maximum			
Deformation	6.75 mm	11.29 mm	6.9 mm

Source: Do Author.

On the other hand, using the *PIV* technique, we select the analysis regions as displayed in the left image of Figure 1. Dislocation and rotation tests were applied over these analysis regions, as described in the Algorithms 3 and 4, respectively. The results of displacement tests can be seen in Figure 10. It is easy to see in Figure 10(b) that if there was only a displacement process over the analysis regions, then it will be necessary to have a $l_0/2\sqrt{2} < 2$ pixels ($l_0 < 2.8284$) so there is not a possibility of a false positive, in the recognition process, with a region located around 17 or 18 pixels of neighborhood.

Figure 10 Displacement tests over the analysis region.

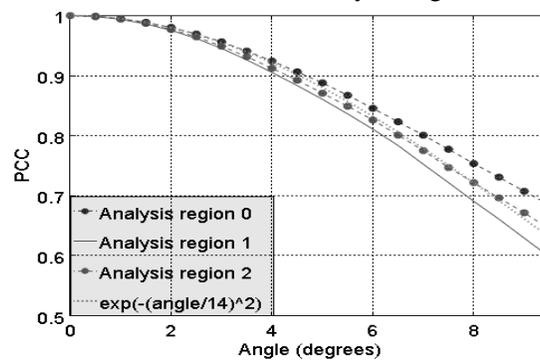


Subtitle: (a) Analysis region 0. (b) Analysis region showed in the radius form.

Source: Do Author.

Additionally, the results of the rotation test can be seen in the Figure 11; in this graphic it is easy to see that if there is only a rotation process over the analysis regions then on average the *PCC* value decreases with the angle (α in degrees) following approximately the function $e^{-(\alpha/14)^2}$. Knowing that the beam in last image has a horizontal rotation of 4.5° , then we can calculate that the mean rotation angle between the analysis region, of two consecutive images, is 0.25° , equivalent to a decrease of *PCC* at 0.99972. Thus, in the cases of analysis regions and pictures used, the procedure made between two images that most influence in the loss of correlation is the dislocation.

Figure 11 Rotation tests over the selected analysis regions.

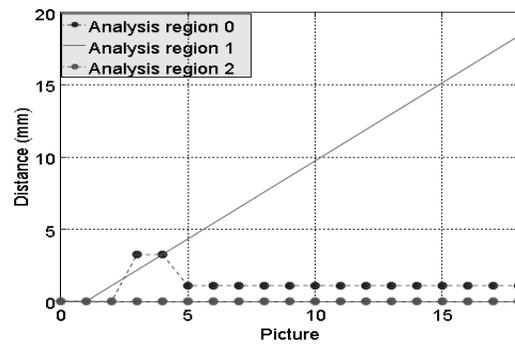


Source: Do Author.

Using these results we can estimate that if we use the parameters: $T_v = 0.6$, $l_0 = 4$, $L = 50$ and $WSIZE = 32$, we are open to the possibility of introducing error in the PIV technique. So that, for a $l_0 = 4$ the bi-dimensional measure error between images is at most 2.8284 pixels (equivalent to 0.76444 millimeters). Following the results in the Figure 10(b) for a measure error of 2.8284 the 3 analysis regions are located slightly above (analysis region 0), and slightly below (analysis regions 1 and 2) of the threshold $T_v = 0.6$. Thus, the analysis regions 1 and 2 are automatically discarded because they are below the threshold,

furthermore the analysis region 0 is above the threshold but has a PCC value so close to a PCC of a false positive located around 17 or 18 pixels of neighborhood. These considerations highlight that there will be errors in the results of PIV algorithm, as it can be seen in Figure 12 when compared to Table I.

Figure 12 Tracking results of PIV technique over the selected analysis regions, with $l_0 = 4$ and $T_v = 0.6$.



Source: Do Author.

Moreover, we can estimate that if we use the parameters, $T_v = 0.82$, $l_0 = 1$, $L = 50$ and $WSIZE = 32$, we get better results, given that for a $l_0 = 1$ the bi-dimensional measure error is at most 0.70711 pixels (equivalent to 0.19111 millimeters). Following the results in Figure 10(b) for a measure error of 0.70711 we can see that the PCC value of the 3 analysis regions are located much above the threshold $T_v = 0.82$ and additionally there is not the possibility of a false positive with any other group of pixels because the unique pixel group that is above the threshold is the pixel group in a radius of 0.70711 pixels of origin. Thus, with a measure error of $e = 0.70711$ pixels across $M = 19$ the maximum possible measure error in the PIV technique will be $e \cdot (M - 1) \cong 12.728$ pixels (in this case equivalent to 3.4400 millimeters). In Figure 13 we can see the results of PIV technique using these parameters, if we compare these results

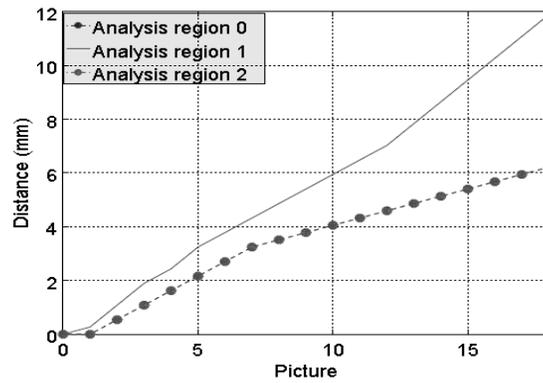
to Table I it is easy to see that the values are too close. Table II presents this in detail, where the maximum error is $0.60200 < 3.4400$ millimeters.

Table 2 Error in the measure of beam deformation with the PIV technique when compared to the dial watches.

Error in	Dial watch 0	Dial watch 1	Dial watch 2
millimeters	0.5338 mm	0.6020 mm	0.6838 mm
Percentage	7.9081%	5.3322%	9.9101%

Source: Do Author.

Figure 13 Tracking results of PIV technique over the selected analysis regions, with $l_0 = 1$ and $T_v = 0.82$.



Source: Do Author.

4 CONCLUSIONS

Through the comparison of the traditional method to analyze load and break study of beams, using universal testing machine, to the technique using the particle image velocimetry method we observed similarity in the results when the adequate parameters criteria to choose them were used.

The results shown in this paper demonstrated the importance of quality tests, these are the displacement and rotation tests. Failure to observe these parameters widens the possibility of false positives in the PIV technique, and consequently in the result of load and break study of beams.

ACKNOWLEDGMENT

We wish to acknowledge the partial financial support for this study provided by the CAPES scholarship PNPB Program.

REFERENCES

ADRIAN, R. J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Palo Alto, v. 23, n. 1, p. 261-304, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143**: standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, 1994. part 16, p. 251-254.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: Informação e documentação: artigo em publicação periódica científica impressa. Rio de Janeiro, 2003.

BANGALEE, M. Z. I. et al. Flow visualization, PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 66, p. 306-314, 2013.

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.

DE PAULA, M. H. et al. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). **Biodiversidade**, Rondonópolis, v. 15, n. 2, p. 136, 2016.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Relação entre características da madeira da polpa celulósica de *Eucalyptus* com métodos não destrutivos na árvore viva. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 205-220, 2011.

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.

PEARSON, K. Note on regression and inheritance in the case of two parents. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, v. 58, p. 240-242, 1895.

PEREIRA, R. A. **Análise de esforços de flexão estática em madeira (Pinus Taeda) pelo método de velocimetria por imagem de partículas**. 2014. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambiência) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

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.

XU, S. et al. Estimation of turbulence characteristics from PIV in a high-pressure fan-stirred constant volume combustion chamber. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 110, p. 346-355, 2017.

ARTIGO 2

**ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES E DA ELASTICIDADE EM
MADEIRAS SUBMETIDAS À ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA
UTILIZANDO A TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR
IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) – PARTE 1**

Artigo redigido conforme norma NBR 6022 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003).

RESUMO

As estruturas demandam, no decorrer de sua vida útil, uma manutenção e monitoramento para verificação das condições de uso dos seus componentes. As técnicas atualmente empregadas na análise de peças estruturais necessitam de equipamentos específicos, sendo de modo geral, muito complexas e com alto custo de execução dos ensaios. Nesse contexto, surge a necessidade de se buscar novas metodologias de ensaio capazes de avaliar deslocamentos e deformações em componentes estruturais presentes nas edificações. O objetivo nesta pesquisa foi avaliar o emprego da técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) para medições de deformações em corpos de prova submetidos a ensaio de flexão estática. A técnica PIV mede variações de posição de uma região de análise em um objeto a partir de imagens antes e depois de uma sessão de carregamento. Os ensaios foram aplicados em madeira serrada de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis* e painéis de madeira Compensado, *laminated veneer lumber* (LVL) e *oriented strand board* (OSB). Os valores de deformação encontrados pela técnica PIV foram comparados com valores provenientes de ensaios convencionais com o emprego de relógios comparadores. Verificou-se que em todos os materiais ensaiados com o emprego da técnica PIV foram encontrados resultados semelhantes àqueles encontrados nos ensaios convencionais. Por meio da aplicação do teste “t de *Student*”, com nível de significância de 1%, observou-se que em algumas regiões de análise de deformação com a técnica PIV foram encontrados valores estatisticamente iguais aos encontrados nos relógios comparadores. As regiões analisadas pela técnica PIV que não obtiveram igualdade estatística em relação aos valores dos relógios comparadores obtiveram uma equação de correção ($y = ax + b$) com valores de “a” próximos de 1, valores de “b” próximos de 0 e R^2 superior a 0,99. Concluiu-se com esta pesquisa que a técnica PIV, com *setup* devidamente ajustado, apresentou resultados semelhantes àqueles obtidos nos ensaios convencionais, comprovando assim sua precisão e confiabilidade nas medições de deslocamentos e deformações.

Palavras-chave: Técnica não destrutiva. Monitoramento de estruturas. Deformações.

ABSTRACT

The civil structures demand, throughout their useful life, a detailed maintenance and monitoring to verify the conditions use of its components. Techniques currently employed in the analysis of structural parts require specific equipment, being generally, very complex and with an elevated execution cost. In this context, it is necessary to search for new test methodologies capable of evaluating displacements and deformations in structural components present in buildings. The objective of this research is to evaluate the use of particle images velocimetry (PIV) for measurements of deformations in test specimens subjected to static bending test. The PIV technique measures variations in the position of an analysis region in an object from an image captured before it is subjected to some effort and another image after loading. The tests were applied on wood of *Pinus oocarpa* and *Eucalyptus grandis* and panels of plywood, laminated veneer lumber (LVL) and oriented strand board (OSB). The deformation values presented by PIV technique were compared with values obtained from dial indicators. It was verified that in all the materials tested the PIV technique presented results similar to those found in the dial indicators. Through Student t test application, with a significance level of 1%, it was observed that in some regions of deformation analysis the PIV technique presented values statistically equal to those found in the dial indicators. The regions analyzed by the PIV technique that did not obtain statistical equality in relation to the values of the dial indicators, obtained a correction equation ($y = ax + b$) with values of "a" near to 1, values of "b" near to 0 and R^2 higher than 0,99. It was concluded with this research that the PIV technique, with setup properly adjusted, presented similar results to those found in dial indicators, thus proving its accuracy and reliability in displacement and deformation measurements.

Keywords: Non-destructive technique. Structural monitoring. Deformations.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção, a verificação e a análise dos materiais sob carregamentos é imprescindível para uma adequada utilização das peças estruturais nos sistemas construtivos. As metodologias e técnicas utilizadas atualmente para medições de deformações em peças estruturais são, em geral, muito complexas e com alto custo operacional e de equipamentos. Dessa forma, o estudo e o emprego de novas técnicas de ensaio capazes de medir deformações tornam-se uma boa alternativa frente às dificuldades encontradas no campo da manutenção de estruturas.

Para a verificação do comportamento mecânico dos materiais submetidos aos diversos tipos de esforços, as técnicas mais utilizadas são aquelas denominadas como convencionais. A máquina universal de ensaios é frequentemente associada a esse tipo de ensaio, por seus resultados precisos, metodologia já estabelecida e normatizada.

O grande problema com as análises convencionais está associado à demora nos resultados, elevado número de amostras e conseqüentemente alto custo da operação (GOUVÊA et al., 2011).

As condições de contorno consideradas para a verificação do comportamento mecânico de amostras de determinado material são diferentes daquelas necessárias para análise de uma peça estrutural. Assim, torna-se impraticável o uso de técnicas convencionais de ensaio que demandam máquinas robustas e de difícil instalação em campo.

Nesse sentido, várias são as técnicas de ensaio utilizadas para aferir condições de uso, características e propriedades dos materiais empregados nas edificações. Oliveira et al. (2015) constataram uma correlação entre os resultados das técnicas não destrutivas de ensaio e as propriedades da madeira. O mesmo autor afirma que entre as técnicas não destrutivas mais utilizadas para avaliação do material madeira pode-se citar a análise química, Raios-X, técnicas vibracionais e transmissão de ondas sonoras.

No entanto, nenhuma dessas técnicas aplicadas diretamente em campo proporciona medições de deformação ou deslocamento, principalmente em peças estruturais como vigas e pilares.

De acordo com De Paula et al. (2016) o aumento na utilização das técnicas não destrutivas de ensaio ocorre pela confiabilidade dos seus resultados, rapidez nos ensaios e por não prejudicar o uso posterior dos materiais analisados.

Entre as técnicas de ensaio não destrutivas, destaca-se a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV). Essa é uma técnica ótica que gera seus resultados a partir de análise de imagens sequenciais. A técnica PIV foi originalmente utilizada no campo dos fluidos e dos gases (BANGALEE et al., 2013; XU et al., 2017) e nos últimos anos teve sua aplicação também voltada para as medições em corpos sólidos (BABA; PETH, 2012; BRAGA JÚNIOR et al., 2015; MAGALHÃES; BRAGA; BARBOSA, 2015; PEREIRA, 2014; SOUZA et al., 2014).

Um dos materiais mais utilizados nas estruturas das edificações é a madeira serrada e os painéis reconstituídos de madeira. No entanto, por se tratar de um material anisotrópico, diferentemente de materiais isotrópicos como o aço e o concreto, possui maior complexidade no seu comportamento mecânico, dificultando assim sua avaliação de forma precisa e confiável. Nesse contexto torna-se essencial a busca por novas metodologias de ensaio que atendam de maneira adequada não só à madeira e os painéis de madeira como os materiais de uma forma geral.

O objetivo neste trabalho foi avaliar o desempenho da técnica PIV quando aplicada para medições de deformação de corpos de prova de madeira serrada (*Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*) e de painéis de madeira (Compensado, LVL e OSB) em ensaio de flexão estática, por meio da comparação entre os valores fornecidos pela técnica PIV e valores fornecidos pelo método convencional de ensaios.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados ensaios de flexão estática em Máquina universal de ensaios (AROTEC[®]) com capacidade de carga de 300 kN.

Para os ensaios foram utilizados os seguintes materiais: corpos de prova de madeira serrada das espécies *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus Grandis* além de painéis LVL, Compensado e OSB (TABELA 1).

Tabela 1 Número de corpos de prova para cada material ensaiado.

MATERIAL	Nº CORPOS DE PROVA
<i>Pinus oocarpa</i>	23
<i>Eucalyptus grandis</i>	23
Painéis LVL	30
Painéis Compensado	30
Painéis OSB	25

Fonte: Do Autor

A manufatura de todas as amostras ocorreu no laboratório Unidade Experimental em Painéis de Madeira (UEPAM) no Departamento de Ciências Florestais (DCF) da Universidade Federal de Lavras, de acordo com os padrões internacionais de confecção de corpos de prova.

Para os ensaios, foram utilizados uma câmera fotográfica digital profissional marca *CANON EOS Rebel t3*, jogo de lentes para ajuste de foco e zoom, pincéis ponta fina cor preta e a Máquina Universal de Ensaio.

2.1 Corpos de prova de madeira serrada de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis*

Os corpos de prova de madeira serrada de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis* foram obtidos a partir de árvores de plantios florestais experimentais localizados no *Campus* da Universidade Federal de Lavras – UFLA, na cidade de Lavras, Minas Gerais.

As amostras para os ensaios de flexão estática foram confeccionadas por meio de uma serra circular esquadrejadeira de acordo com a norma ASTM D143-94 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1994), com dimensões de 2,5 x 2,5 x 41 cm. Os ensaios de flexão estática seguiram as instruções da norma ASTM D143-94 (ASTM, 1994).

2.2 Corpos de prova de painél - *Oriented Strand Board* - OSB

Os painéis *Oriented Strand Board* - OSB foram obtidos mediante compra no comércio de Lavras, Minas Gerais. Os painéis OSB adquiridos são produzidos com adesivo fenol-formaldeído, densidade de $0,65 \text{ g.cm}^{-3}$ e dimensões de 244 x 122 x 1,5 cm (Comprimento, largura e espessura).

Os corpos de prova de flexão estática foram confeccionados com o emprego de uma serra circular esquadrejadeira, conforme descrito pelas normas ASTM D1037 (ASTM, 2006) e DIN 52362 (NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ, 1982) com as dimensões de 25 x 5 x 15 cm (Comprimento, largura e espessura). Sendo posteriormente climatizados à temperatura de $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 5\%$ antes da realização dos ensaios.

2.3 Corpos de prova de painéis - Compensado e LVL

A madeira utilizada para a confecção dos painéis Compensado e LVL neste trabalho foi a de *Pinus oocarpa*, com 25 anos de idade, provenientes de plantios experimentais no *campus* da Universidade Federal de Lavras - UFLA, na cidade de Lavras - Minas Gerais.

Antes das toras serem laminadas, estas foram seccionadas com o auxílio de uma motosserra, dando origem a duas novas toras com 0,60 m de

comprimento. As toras foram então descascadas e aquecidas em água a uma temperatura de 65 °C e por um período de 24 horas. Por meio da utilização de um torno laminador as toras foram processadas, obtendo assim lâminas com espessura de 2,00 mm. As lâminas foram então guilhotinadas nas dimensões de 0,55 x 0,55m e secas em estufa na temperatura de 60 °C até a obter uma umidade entre 5 e 6%.

Anterior à etapa de manufatura dos compensados e LVL, as lâminas já secas foram classificadas de acordo com a qualidade decrescente (A, B, C, D), conforme a Norma Brasileira NBR 9531 – Chapas de Madeira Compensada: Classificação, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1986). No presente estudo, foram utilizadas apenas as lâminas com a classificação B, tanto para as capas como para o miolo dos painéis.

Os painéis foram produzidos com o adesivo fenol-formaldeído, com teor de sólidos de 50,5 %, pH igual a 12,05, gel *timer* de 5,30 minutos e viscosidade de 659 cP. A formulação do adesivo para a aplicação foi a seguinte (em partes por peso): adesivo FF = 100; farinha de trigo = 10 e água = 10. As lâminas foram coladas com gramatura de 180 g.m² (linha simples). O ciclo de prensagem para obtenção dos compensados ocorrerá com temperatura de 150 °C, tempo de 15 minutos e pressão de prensagem de 11 kgf.cm².

Os painéis compensados foram produzidos com sete lâminas cruzadas entre si, enquanto que os painéis do tipo LVL foram produzidos com sete lâminas posicionadas na mesma direção.

Os corpos de prova de flexão estática de Compensado e LVL foram confeccionados com o emprego de uma serra circular esquadrejadeira conforme especificações da norma EN 310 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1993), sendo posteriormente climatizados a (22 ± 2 °C) e umidade relativa de (65 ± 5%).

2.4 Ensaio com a técnica PIV

Os procedimentos para a execução dos ensaios com o emprego da técnica PIV, utilizando os corpos de prova de *Eucalyptus grandis*, *Pinus oocarpa*, em ensaios de flexão estática estão de acordo com a norma ASTM D143 (ASTM, 1994). Os corpos de prova de Compensado e LVL seguiram a norma EN 310 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1993) e de painéis OSB conforme a ASTM D1037 (ASTM, 2006).

Inicialmente o aparato para ensaio de flexão estática da Máquina Universal de Ensaio foi instrumentado com relógios comparadores (um no centro da amostra e outros dois na metade da distância entre os apoios e o ponto de aplicação da carga) para medição dos valores de deslocamento das vigas. Uma câmera profissional digital (*CANON EOS Rebel t3*) foi posicionada perpendicularmente à superfície da amostra (25 cm de distância) para a captura de imagens. A câmera fotográfica foi equipada com jogo de lentes para melhor ajuste do foco em relação à superfície do corpo de prova. A captura das imagens ocorreu com a utilização de um controle remoto para evitar qualquer perturbação na câmera fotográfica. Os equipamentos utilizados, os corpos de prova e a instrumentação da máquina universal de ensaios são ilustrados pela Figura 1.

Figura 1 Vista geral da Máquina Universal de Ensaio, a instrumentação do ensaio de flexão estática para a aplicação da técnica PIV e os materiais ensaiados.



(a)

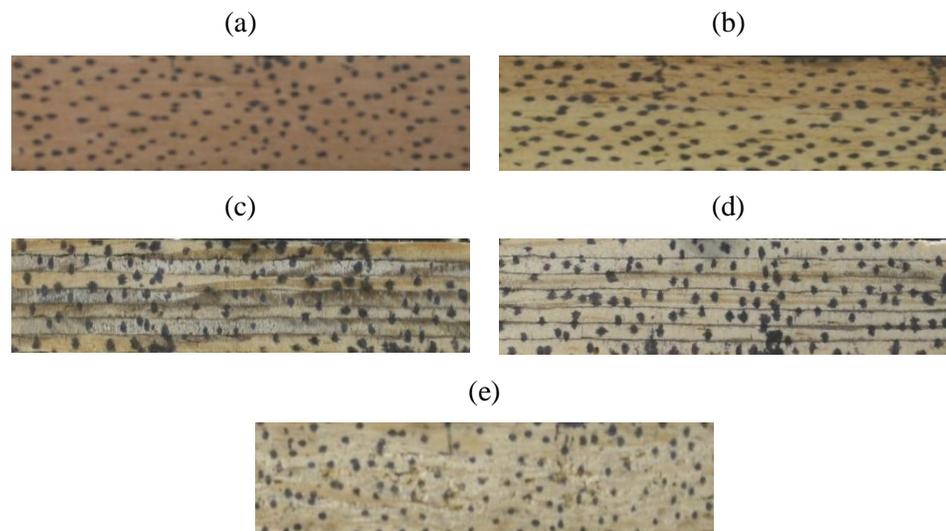
(b)

Legenda: (a) Vista geral da Máquina Universal de Ensaio e a instrumentação do ensaio de flexão estática para a aplicação da técnica PIV. (b) Corpos de prova utilizados no experimento: 1- Madeira serrada de *Pinus oocarpa*; 2- Madeira serrada de *Eucalyptus grandis*; 3 - PaineL LVL; 4 - PaineL compensado; 5 - PaineL OSB.

Fonte: Do autor.

Anterior à captura das imagens, a superfície de todos os corpos de prova foi marcada com pontos feitos com caneta pincel do tipo ponta fina. Os pontos foram distribuídos por toda superfície dos corpos de prova com uma densidade de pontos igual a $9,4 \text{ pontos.cm}^2$. O diâmetro médio dos pontos foi de 1,5 mm, conforme Figura 2.

Figura 2 Marcadores inseridos na superfície dos materiais ensaiados.



Legenda: Corpos de prova com marcadores pintados com caneta pincel e padrão aleatório. (a) *Eucalyptus grandis*. (b) *Pinus oocarpa*. (c) Painel compensado. (d) Painel LVL. (e) Painel OSB. Fonte:

Do autor.

As imagens foram capturadas durante os ensaios de flexão estática em um intervalo regular de tempo. Para os corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* o intervalo entre imagens foi de 30 segundos e para os painéis LVL Compensado e OSB o intervalo entre imagens foi de 5 segundos.

Considerando que em média os ensaios de flexão estática para corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* tiveram a duração de aproximadamente 600 segundos (velocidade de carregamento de $1,3 \text{ mm.min}^{-1}$) e que a duração dos ensaios com os corpos de prova de painéis LVL, OSB e Compensado giraram em torno de 90 segundos (velocidade de carregamento de 5 mm.min^{-1}), cada corpo de prova obteve entre 18 e 20 imagens, número suficiente para a verificação do comportamento desses materiais em situação de carregamento por meio da técnica PIV.

Para a aplicação da técnica PIV, a primeira imagem foi capturada antes do início do carregamento ($t=0$, $d=0$) e as demais foram capturadas conforme intervalo de tempo preestabelecido. Assim, a primeira imagem ($t=0$, $d=0$) serve como parâmetro de comparação para as imagens subsequentes.

Após o término dos ensaios, as imagens capturadas foram devidamente trabalhadas em um *software* de tratamento de imagens (*Image J*) em que as imagens foram convertidas para o formato 8 bit e o número de *pixels* das imagens foi reduzido para 25% do original com o intuito de diminuir o tamanho das imagens. Esse procedimento é importante no sentido de viabilizar o processamento dessas imagens, por meio do algoritmo PIV no *software* livre GNU *Octave*. Para o processamento da técnica PIV utilizou-se uma janela de interrogação de 32×32 *pixels*, *step size* de 1 *pixel*, braço de busca ao redor da região de análise de 50 *pixels* e limiar de semelhança para correlação das janelas de interrogação de 0,82.

2.4.1 Processamento das imagens

Após o processamento das imagens no algoritmo PIV, foram obtidos gráficos com as deformações referentes aos locais escolhidos para análise. Nesse caso, as regiões escolhidas foram aquelas próximas aos três relógios comparadores posicionados (esquerda, centro e direita).

Utilizando os valores dos gráficos de deformação da técnica PIV e os valores obtidos por meio da leitura dos relógios comparadores, foi possível comparar esses resultados entre si em cada um dos corpos de prova ensaiados.

Para fins de análise dos resultados, foram feitas regressões lineares para as três regiões analisadas em todos os corpos de prova. Tais regressões ocorreram com o posicionamento nos gráficos dos valores obtidos pela técnica PIV no eixo x e os valores dos relógios comparadores no eixo y.

Uma grande vantagem do uso de regressão é que com esse teste *t* de *Student* para significância dos parâmetros, pode-se verificar se uma variável é igual à outra e, se não for, as próprias estimativas dos parâmetros são também equações de correção, uma vez que a partir dos valores de deformação pela técnica PIV (eixo *x*), encontra-se o valor corrigido correspondente àqueles encontrados no ensaio convencional (eixo *y*).

2.5 Método estatístico

Com o intuito de comparar estatisticamente os valores de deformação da técnica PIV com os valores do ensaio convencional, analisou-se as equações geradas nas regressões previamente estabelecidas.

O procedimento estatístico delineou-se com a listagem de todas as equações de regressão linear efetuadas nas três regiões de análise em todos os corpos de prova. Dessa forma, cada região analisada apresentou uma equação do tipo “ $y = ax + b$ ”, sendo possível a obtenção de uma equação média de correção para cada região de análise em cada material estudado.

Ao fim do procedimento, avaliou-se se os valores encontrados pela técnica PIV e pelo ensaio convencional são iguais ou diferentes estatisticamente. Para tal foi aplicado o teste estatístico “*t* de *Student*”.

Para verificar se os valores medidos pelos relógios comparadores e pela técnica PIV foram iguais estatisticamente, utilizou-se as equações médias obtidas por meio das regressões. Dessa forma, se os dois valores fossem exatamente iguais, as equações médias teriam obrigatoriamente que assumir a seguinte configuração: $y = x$. No entanto, essa é uma situação ideal, diferente da encontrada, necessitando assim de uma análise estatística mais apurada.

Partindo-se do pressuposto de que para serem exatamente iguais as equações médias de regressão precisariam ser “ $y = x$ ”, formulou-se duas hipóteses:

$$1. \begin{cases} H_0: a = 1 \\ H_1: a \neq 1 \end{cases} \quad \text{e} \quad 2. \begin{cases} H_0: b = 0 \\ H_1: b \neq 0 \end{cases}$$

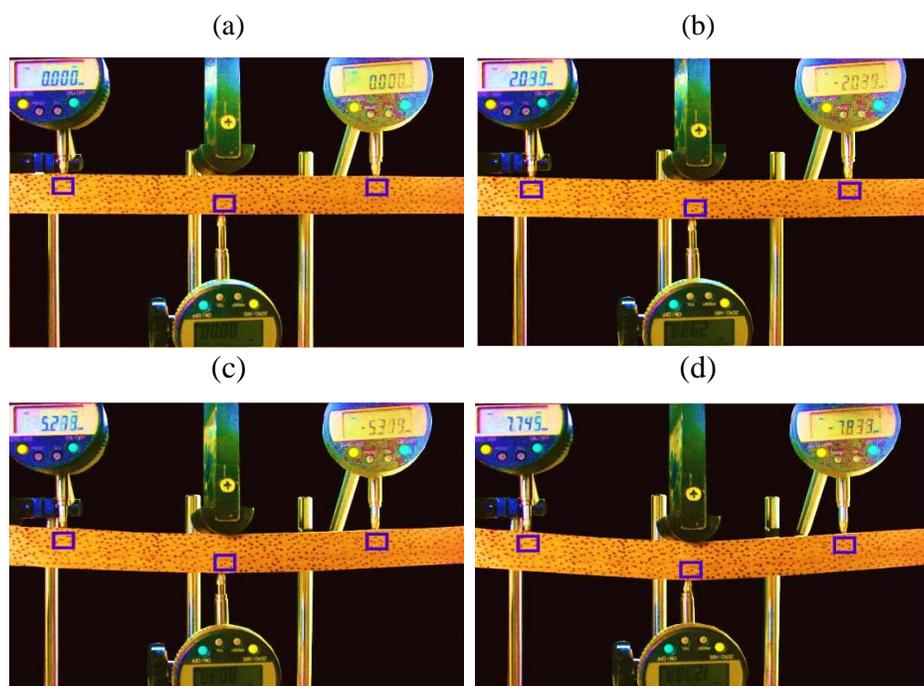
Assim, foi aplicado o teste “t de *Student*” com nível de significância de 1%, para determinar sobre a aceitação ou rejeição das hipóteses H_0 . Em caso de aceitação de H_0 nos dois testes, não se configura necessidade de correção, ou seja, $y = x$. Caso seja aceita a hipótese $H_0: a = 1$ e rejeitada a hipótese $H_0: b = 0$ a equação de correção seria $y = x + b$. Em situações de rejeição da hipótese $H_0: a = 1$ e aceitação da hipótese $H_0: b = 0$ a equação de correção fica $y = ax$. Rejeitando-se as duas hipóteses ($H_0: a = 1$ e $H_0: b = 0$) a equação de correção foi a própria equação estimada, $y = ax + b$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização dos ensaios e devido ao tratamento das imagens, estas foram processadas no algoritmo PIV. Esse procedimento visa ao cálculo dos deslocamentos de uma janela de interrogação posicionada na imagem sem carregamento em relação às fotos subsequentes, conforme Figura 3.

A sequência de imagens observadas na Figura 3 indica que do início ao final do ensaio as janelas de interrogação assumiram localizações coerentes com a deformação verificada no corpo de prova, ou seja, não houve perda de correlação em nenhuma das regiões de análise, mesmo em situação de ruptura, conforme Figura 3(d).

Figura 3 Deslocamento das janelas de interrogação durante os ensaios.



Legenda: (a) tempo igual a zero e carga de 0kN. (b) tempo igual a 150 segundos e carga de 0,8172 kN. (c) tempo igual a 360 segundos e carga de 2,2524kN. (d) tempo igual a 540 segundos e carga de 2,4228kN.

Fonte: Do autor.

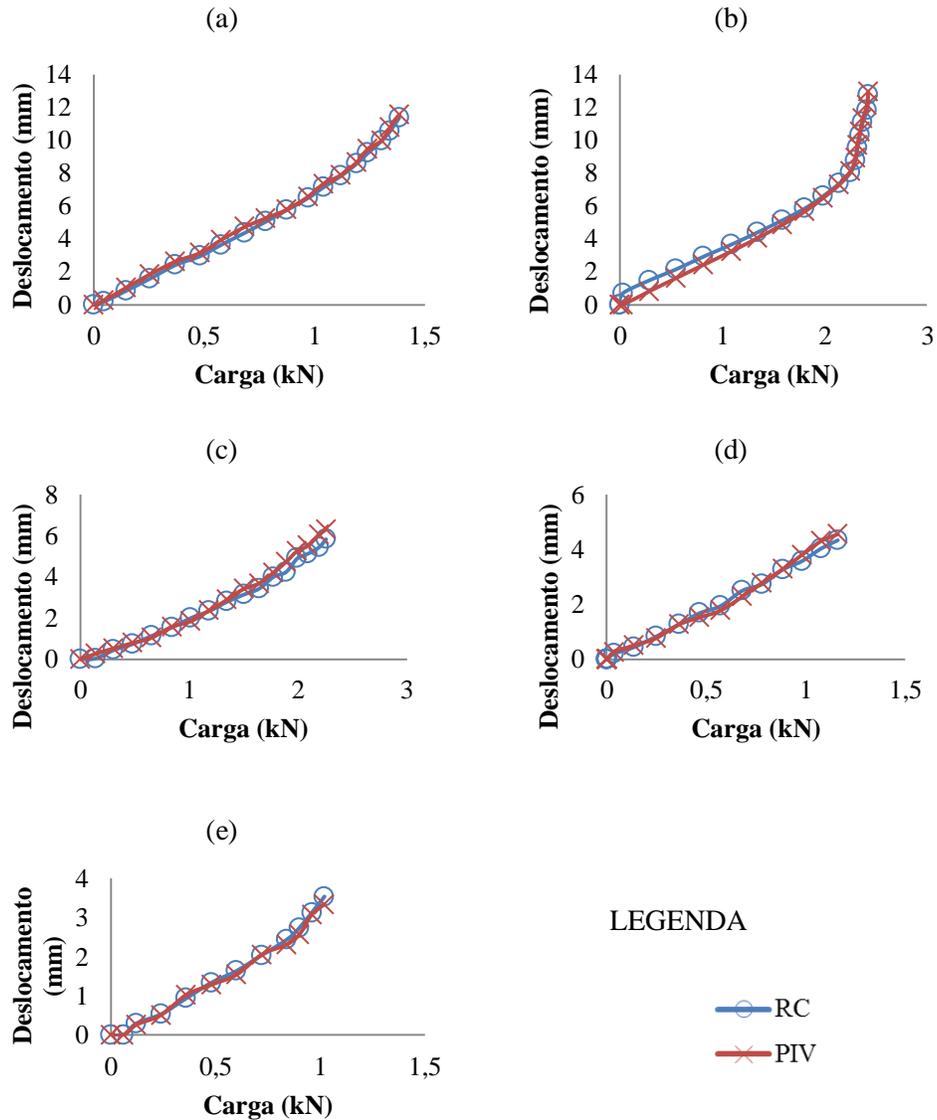
Em situação semelhante, Pereira (2014) observou que próximo ou após à ruptura da amostra, a técnica PIV associada ao *sunset laser* apresentou perda total de correlação, não configurando assim respostas adequadas em situações de maiores deformações. Ou seja, Pereira (2014) verificou que a técnica PIV poderia ser aplicada com eficácia apenas na região elástica dos materiais em fase de carregamento, com deformações muito pequenas. O mesmo ocorreu no trabalho de Souza et al. (2014).

Pereira (2014) verificou também que a aplicação da técnica PIV associada ao *sunset laser* apresenta grande dificuldade em manter uma configuração de ensaios adequada, visto que as partículas (marcadores) geradas pelo *sunset laser* foram diferentes em relação à qualidade e quantidade em cada amostra, prejudicando uma avaliação adequada dos resultados entre os corpos de prova. Fato este não ocorrido neste trabalho, devido principalmente ao estudo detalhado dos parâmetros da técnica PIV, bem como uma escolha adequada dos marcadores e do padrão da sua distribuição na superfície dos corpos de prova.

3.1 Comparação entre método convencional e técnica PIV

A aplicação da técnica PIV nos corpos de prova ocorreu concomitantemente aos ensaios mecânicos de flexão estática. Dessa forma, foi possível analisar as deformações pelo método convencional e pela técnica PIV. Considerando os valores dos relógios comparadores como valores-base, ou seja, o real valor de deformação comparou-se esses resultados com aqueles obtidos por meio da técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) (FIGURA 4).

Figura 4 Comparação dos valores de deslocamento obtidos pela técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) e pelos relógios comparadores (RC).



Legenda: (a) Corpo de prova de *Pinus oocarpa*. (b) Corpo de prova de *Eucalyptus grandis*. (c) Corpo de prova de painéis Compensado. (d) Corpo de prova de painéis LVL. (e) Corpo de prova de painéis OSB.

Fonte: Do autor.

Por meio da análise dos gráficos contidos na Figura 4, observa-se que em todos os materiais ensaiados os valores encontrados por ambas as metodologias seguiram uma mesma linha com pequenas variações, inclusive em situações de ruptura do material.

Os gráficos representados na Figura 3 evidenciam a eficácia de medição da técnica PIV em qualquer tipo de deformação, uma vez que em trabalhos anteriores (BRAGA JÚNIOR et al., 2015; PEREIRA, 2014; SOUZA et al., 2014) foi verificado que a precisão dessa técnica se restringiu às pequenas deformações.

Observou-se também pela Figura 4 que a técnica PIV apresentou resultados próximos àqueles encontrados pela metodologia convencional de ensaios em todos os materiais, desde as madeiras serradas de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis* até os painéis de madeira LVL, Compensado e OSB.

Vale ressaltar que esses materiais apresentam comportamentos mecânicos diferentes entre si. Outro fato importante se refere aos ensaios de flexão estática, sendo os mesmos específicos para cada tipo de material (madeira serrada e painéis), variando as dimensões dos corpos de prova, distância entre apoios e a taxa de aplicação da carga.

3.2 Análise estatística

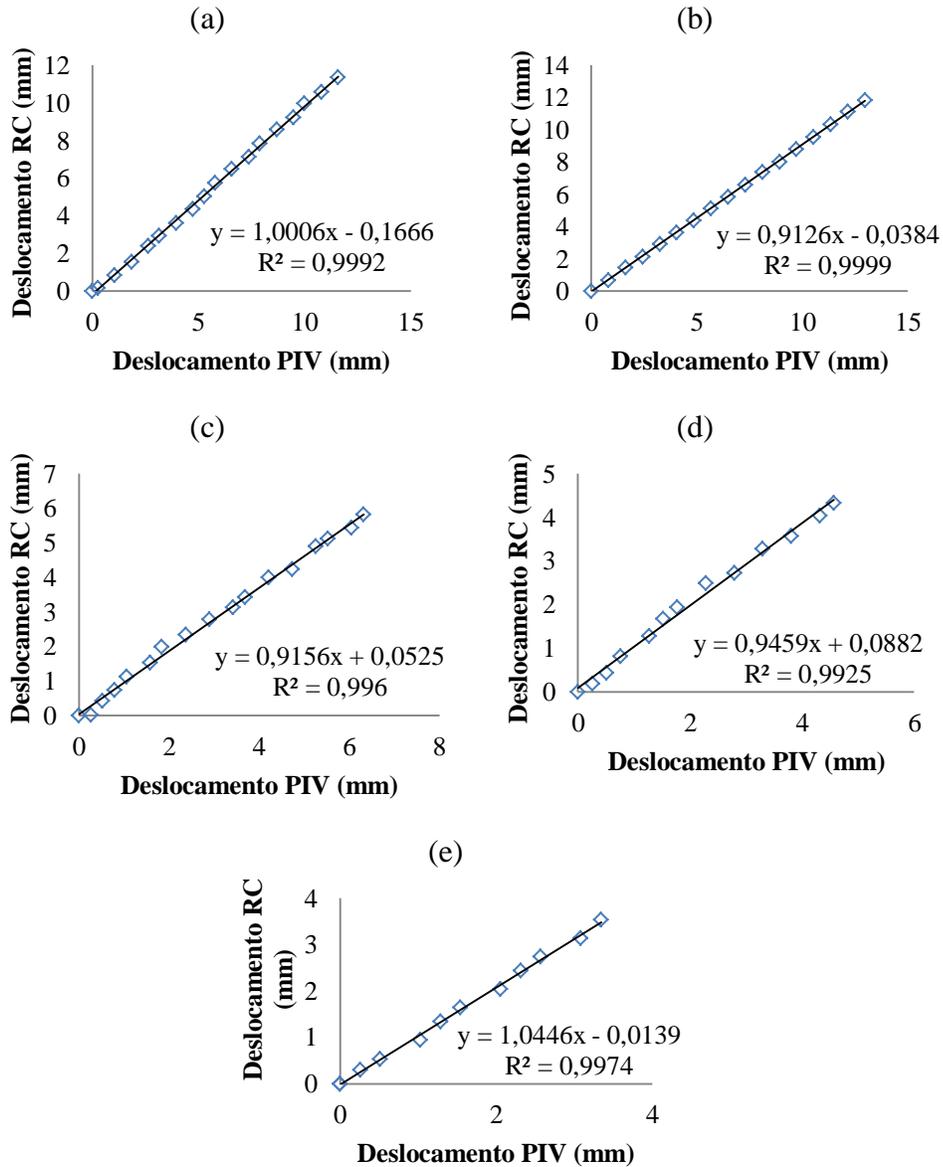
A partir da comparação dos resultados obtidos pelo método convencional (relógios comparadores) e a técnica PIV vislumbrou-se a necessidade de uma verificação estatística dos valores encontrados pelas duas metodologias.

Para essa análise estatística, utilizaram-se os parâmetros “a” e “b” das equações de regressões lineares ($y = ax + b$) desenvolvidas em todos os corpos

de prova com os valores de deslocamento pela técnica PIV (eixo x) e pela análise convencional (eixo y).

As regressões lineares de todos os corpos de prova apresentaram uma equação de correção com valores de “a” e “b” muito próximos de 1 e 0, respectivamente (Figura 5), condição ideal para uma igualdade entre as metodologias. Além disso, os valores de R^2 foram sempre superiores a 0,97, o que indica um alto valor de correlação entre os dois conjuntos de valores.

Figura 5 Regressão linear dos valores de deslocamento obtidos pela técnica PIV (eixo x) e pelo relógio comparador (eixo y).



Legenda: (a) Corpo de prova de *Pinus oocarpa*. (b) Corpo de prova de *Eucalyptus grandis*. (c) Corpo de prova de painel Compensado. (d) Corpo de prova de painel LVL. (e) Corpo de prova de painel OSB.

Fonte: Do autor.

Como observado na Figura 5, cada corpo de prova de cada material foi submetido a uma análise de regressão linear, gerando assim uma equação de correção na configuração “ $y = ax + b$ ” e um valor de coeficiente de determinação R^2 .

Dessa forma, foi possível analisar cada região de análise (esquerda, centro e direita) separadamente em cada corpo de prova e posteriormente para cada material específico, sendo representado por uma equação de correção média, proveniente da média dos valores de “a” e “b” de cada corpo de prova ensaiado, conforme Tabela 2.

Tabela 2 Equações médias de correção para cada tipo de material.

Equações médias das Regressões lineares			
Materiais	Esquerda	Centro	Direita
<i>Eucalyptus grandis</i>	$y = 0,947243x - 0,06646$	$y = 1,019739x - 0,05483$	$y = 0,984674x - 0,12989$
<i>Pinus oocarpa</i>	$y = 0,873791x + 0,044191$	$y = 1,031365x + 0,061252$	$y = 0,939843x - 0,02382$
Compensado	$y = 0,9539x + 0,0943$	$y = 1,188133x + 0,126067$	$y = 0,912833x + 0,0503$
LVL	$y = 1,00682x + 0,045177$	$y = 1,11555x + 0,035127$	$y = 0,982027x + 0,044257$
OSB	$y = 0,965668x + 0,040281$	$y = 1,113448x + 0,000836$	$y = 0,919696x + 0,03172$

Fonte: Do autor.

Com base nas equações médias da Tabela 2, procedeu-se a análise estatística comparando-se a técnica convencional e a técnica PIV. Aplicando-se o teste *t-Student* com nível de significância de 1%, observou-se (TABELA 3) que em alguns casos as hipóteses H_0 , anteriormente descritas, foram aceitas e em outros casos rejeitadas.

Tabela 3 Análise estatística dos resultados pelos relógios comparadores e pela técnica PIV nas três regiões de análise.

Material	Região de análise	Equação média		R ² médio	Desvio padrão		t _{calc} 0,005,n-1		t _{tab} 0,005,n-1		H ₀		Equação de correção
		a	b		a	b	a	b	a	b	a = 1	b = 0	
<i>Eucalyptus grandis</i>	Esquerda	0,947	-0,066	0,992	0,135	0,226	-1,880	-1,408			Aceita	Aceita	y = x
	Centro	1,020	-0,055	0,999	0,094	0,173	1,008	-1,518	2,819		Aceita	Aceita	y = x
	Direita	0,985	-0,130	0,991	0,115	0,222	-0,639	-2,802			Aceita	Aceita	y = x
<i>Pinus oocarpa</i>	Esquerda	0,874	0,044	0,998	0,058	0,195	-10,428	1,088			Rejeita	Aceita	y = 0,874x
	Centro	1,031	0,061	0,999	0,108	0,222	1,394	1,325	2,819		Aceita	Aceita	y = x
	Direita	0,940	-0,024	0,995	0,090	0,226	-3,213	-0,505			Rejeita	Aceita	y = 0,940x
Compensado	Esquerda	0,954	0,094	0,997	0,035	0,147	-7,120	3,516			Rejeita	Rejeita	y = 0,954x + 0,094
	Centro	1,188	0,126	0,993	1,445	0,139	0,713	4,953	2,756		Aceita	Rejeita	y = x + 0,126
	Direita	0,913	0,050	0,997	0,169	0,088	-2,833	3,124			Rejeita	Rejeita	y = 0,913x + 0,050
LVL	Esquerda	1,007	0,045	0,997	0,044	0,099	0,850	2,497			Aceita	Aceita	y = x
	Centro	1,116	0,035	0,993	0,168	0,169	3,766	1,140	2,756		Rejeita	Aceita	y = 1,116x
	Direita	0,982	0,044	0,997	0,048	0,121	-2,069	2,000			Aceita	Aceita	y = x
OSB	Esquerda	0,966	0,040	0,994	0,087	0,065	-1,977	3,091			Aceita	Rejeita	y = x + 0,040
	Centro	1,113	0,001	0,993	0,131	0,095	4,326	0,044	2,797		Rejeita	Aceita	y = 1,113x
	Direita	0,9200	0,032	0,995	0,050	0,058	-8,106	2,730			Rejeita	Aceita	y = 0,920x

Fonte: Do autor.

Os resultados da análise estatística aplicada demonstram que mesmo os materiais e regiões e amostras que tiveram as hipóteses total ou parcialmente rejeitadas, apresentaram uma equação de correção com valores muito pequenos, ou seja, valores de “a” de correção muito próximos de 1 e valores de “b” de correção próximos de zero.

Observa-se ainda que os materiais de madeira serrada (*Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis*) tiveram suas hipóteses estatísticas aceitas para a região central dos corpos de prova. Esse fato pode ser explicado pelo seu comportamento mecânico diferenciado dos painéis, uma vez que foi observado nos ensaios um padrão de deformação menos frágil para esse tipo de material.

Ainda em relação às madeiras serradas, constatou-se que foram aceitas as hipóteses da região central de análise, indicando que a técnica PIV fornece respostas melhores em regiões com deformação mais elástica (parte central) e com menor rotação da superfície, característica encontrada com frequência em regiões mais afastadas da região central do corpo de prova.

Os painéis de madeira (LVL, Compensado e OSB) apresentaram também regiões de análise com hipóteses aceitas, sendo o LVL o tipo de painel com melhores resultados da técnica PIV. No entanto, as regiões de análise com rejeição das hipóteses foram mais frequentes, o que pode ser justificado por rupturas isoladas em uma ou mais lâminas ou cavacos que constituem esses materiais.

4 CONCLUSÃO

Concluiu-se com o presente estudo que a técnica PIV é uma ferramenta precisa e eficaz para a medição de deformações ocorridas em materiais sob ação de carregamentos. Isso foi comprovado por meio da comparação dos resultados da técnica PIV com análise convencional tradicionalmente utilizada e normatizada.

As madeiras serradas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*, obtiveram melhores resultados com a aplicação da técnica PIV devido ao seu comportamento mecânico mais elástico que o comportamento mecânico observado nos painéis compensado, LVL e OSB.

Por fim, verificou-se que mesmo os materiais e regiões de análise que não apresentaram igualdade estatística, quando comparados os valores da técnica PIV e valores do método convencional de ensaios, apresentaram pequenos valores de correção.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1037**: standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials. In: ANNUAL book of ASTM standard. Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-143**: standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, 1994. part 16, p. 251-254.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9531**: chapas de madeira compensada: classificação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: Informação e documentação - artigo em publicação periódica científica impressa. Rio de Janeiro, 2003.

BABA, H. O.; PETH, S. Large scale soil box test to investigate soil deformation and creep movement on slopes by Particle Image Velocimetry (PIV). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 125, p. 38-43, 2012.

BANGALEE, M. Z. I. et al. Flow visualization, PIV measurement and CFD calculation for fluid-driven natural cross-ventilation in a scale model. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 66, p. 306-314, 2013.

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.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 310**: wood based panels – determination of modulus of elasticity and modulus of rupture in static bending. Brussels. 1993.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Relação entre características da madeira da polpa celulósica de *Eucalyptus* com métodos não destrutivos na árvore viva. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 205-220, 2011.

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.

NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ. **DIN 52362**: testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength. Berlin, 1982. 40 p.

OLIVEIRA, M. et al. Análise comparativa do desempenho de ultrassons na avaliação não destrutiva da madeira de Castanho. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, Lisboa, v. 2, n. 14, p. 31-43, 2015.

PEREIRA, R. A. **Análise de esforços de flexão estática em madeira (Pinus Taeda) pelo método de velocimetria por imagem de partículas**. 2014. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambiência) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

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.

XU, S. et al. Estimation of turbulence characteristics from PIV in a high-pressure fan-stirred constant volume combustion chamber. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 110, p. 346-355, 2017.

ARTIGO 3

**ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES E DA ELASTICIDADE EM
MADEIRAS SUBMETIDAS À ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA
UTILIZANDO A TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR
IMAGENS DE PARTÍCULAS (PIV) – PARTE 2**

Artigo redigido conforme norma NBR 6022 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003).

RESUMO

Um dos parâmetros mais importantes no que se refere ao conhecimento do comportamento mecânico dos materiais é o módulo de elasticidade, sendo tradicionalmente obtido por meio de ensaios destrutivos. O objetivo neste trabalho foi verificar o potencial de utilização da técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) como ferramenta para obtenção do módulo de elasticidade em corpos de prova de madeira serrada (*Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis*) e painéis de madeira (Compensado, LVL e OSB). A técnica PIV possui como características o baixo custo de equipamentos, resultados rápidos, precisão e a possibilidade de aplicação em campo. A aplicação da técnica PIV ocorreu durante ensaios de flexão estática em que as deformações foram medidas com relógios comparadores (método convencional), obtendo-se assim medidas comparativas. A partir dos valores de carga aplicados por uma máquina universal de ensaios e os valores de deformação obtidos pelos relógios comparadores e pela técnica PIV foi possível calcular o módulo de elasticidade pelos dois métodos. Com a aplicação do teste estatístico “t de *Student*” com nível de significância de 1% verificou-se que os módulos de elasticidade encontrados pela técnica PIV e pelo método convencional foram iguais estatisticamente. Os valores médios de módulo de elasticidade encontrados com a aplicação do método convencional e pela técnica PIV, respectivamente, foram para o *Eucalyptus grandis* de 13.077 e 13.027 MPA, para o *Pinus oocarpa* de 6.171,6 e 6.418,8 MPa, para o compensado de 10.481,2 e 11.094,3 MPa, para o LVL de 8.687,4 e 10.261,0 MPa e para o OSB de 2480,1 e 2.899 MPa. Concluiu-se que a técnica PIV é capaz de medir valores de módulo de elasticidade com precisão semelhante às técnicas de ensaio tradicionalmente utilizadas para esse fim.

Palavras-chave: Caracterização. Ensaios não destrutivos. Módulo de elasticidade.

ABSTRACT

The most important parameter in terms of material mechanical behavior knowledge is the modulus of elasticity, being traditionally obtained through destructive tests. The objective of this work is the verification of particle image velocimetry (PIV) potential use as a tool to obtain the modulus of elasticity in wood samples (*Pinus oocarpa* and *Eucalyptus grandis*) and wood panels (Plywood, LVL and OSB). The PIV technique has as characteristics the low cost of equipment, fast results, no need for contact with the object tested and possibility of application in the field. The application of the PIV technique occurred during the bending tests where the deformations were also measured with a dial indicator, thus obtaining comparative measurements. From the load values applied by a universal test machine and deformation values obtained by the dial indicator and PIV techniques, it was possible to calculate the modulus of elasticity through both methods. With the statistical Student t-test application with significance level of 1% it was verified that the modulus of elasticity found by the PIV technique and the dial indicator were statistically equal. Average values for the modulus of elasticity found were, presented firstly the values for the use of the conventional method and later the PIV method: 13.077 and 13.027 MPA for *Eucalyptus grandis*; 6.171,6 and 6.418,8 MPa, for *Pinus oocarpa*; 10.481,2 and 11.094,3 MPa for Plywood; 8.687,4 and 10.261,0 MPa for the LVL; and 2480,1 and 2.899 MPa for the OSB. It was concluded that the PIV technique is capable of measuring modulus of elasticity values with similar precision to the test techniques traditionally used for this purpose.

Keywords: Characterization. Non-destructive testing. Modulus of elasticity.

1 INTRODUÇÃO

A utilização dos diversos tipos de materiais na construção civil demanda o conhecimento detalhado de suas características e propriedades, principalmente em situação de carregamento.

O parâmetro mais utilizado quando se trata de avaliação do comportamento mecânico é o módulo de elasticidade (E). Segundo Matos (1997), esse parâmetro fornece informações referentes à rigidez do material e pode ser entendido como o esforço necessário para dobrar o tamanho de um corpo de 1 cm². Quanto maior o valor do módulo de elasticidade, maior a resistência e menor a deformidade da madeira. Sendo assim, baixos valores desse parâmetro acarretarão em madeiras de pior qualidade (SERVOLO FILHO, 2013).

No entanto, as metodologias convencionais de análise tradicionalmente empregadas atualmente, são demoradas e necessitam de equipamentos específicos além de grande número de amostras (MENDES et al., 2012).

As técnicas não destrutivas de ensaio são opções para caracterização dos materiais frente às técnicas convencionais, uma vez que esse tipo de metodologia não prejudica o uso dos objetos após as análises, pode ser aplicado em peças estruturais em uso, possui resultados rápidos e em geral não demandam equipamentos de alto custo.

Uma das grandes vantagens dos métodos não destrutivos de ensaio é a possibilidade de execução do ensaio *in loco*, ou seja, sem necessidade de procedimentos laboratoriais. Isso é de grande valia, principalmente quando se trata de materiais que já estão sendo utilizados e necessitam de algum tipo de avaliação.

Várias são as técnicas não destrutivas de ensaio utilizadas para a obtenção do módulo de elasticidade dos materiais. Entre elas destaca-se o *stress wave timer* (DE PAULA et al., 2016; FREITAS; GONCALEZ; DEL

MENEZZI, 2016), o ultrassom (MELO; DEL MENEZZI, 2016; RIBEIRO et al., 2016), técnicas vibracionais (SEGUNDINHO et al., 2012, 2013), entre outras.

Tendo em vista o crescente aumento da utilização de madeira serrada e painéis reconstituídos de madeira como peças estruturais na construção civil, torna-se necessária a busca por novas metodologias de ensaios capazes de fornecer resultados confiáveis e precisos para uma melhor aplicação desses materiais nas estruturas das edificações.

Nesse contexto, a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV), que é uma técnica ótica com processamento baseado na análise de imagens, surge como uma opção para a avaliação detalhada do comportamento mecânico dos materiais submetidos a esforços.

O objetivo nesta pesquisa foi a avaliar e a validar da técnica PIV como uma ferramenta capaz de caracterizar peças de madeira serrada (*Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*) e painéis reconstituídos de madeira (Compensado, LVL e OSB) submetidos a carregamentos e fornecer seus respectivos módulos de elasticidade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na Universidade Federal de Lavras, sendo os ensaios executados no Laboratório de Resistência dos Materiais e Mecânica de Estruturas no Departamento de Engenharia e a manufatura de todas as amostras na Unidade Experimental em Painéis de Madeira (UEPAM) no Departamento de Ciências Florestais (DCF).

Foram utilizados cinco tipos de materiais: madeira serrada das espécies *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis*, painéis de madeira LVL, compensado e OSB. O número de corpos de provas para cada tipo de material pode ser verificado na Tabela 1.

Tabela 1 Número de corpos de prova para cada material ensaiado.

MATERIAL	Nº CORPOS DE PROVA
<i>Pinus oocarpa</i>	23
<i>Eucalyptus grandis</i>	23
Painéis LVL	30
Painéis Compensado	30
Painéis OSB	25

Fonte: Do Autor.

As madeiras serradas de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis* foram obtidas a partir de árvores de plantios florestais experimentais no *campus* da Universidade Federal de Lavras. Os corpos de provas para os ensaios de flexão estática na madeira serrada foram confeccionados por meio de uma serra circular esquadrejadeira de acordo com a norma ASTM D143-94 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1994), com dimensões de 2,5 x 2,5 x 41 cm, sendo então climatizados à temperatura de 22 ± 2 °C e umidade relativa do ar de $65 \pm 5\%$, conforme utilizado por diversos autores (CEZARO; TREVISAN; BALBINOT, 2016; DELUCIS et al., 2016).

Para a confecção dos corpos de prova de Compensado e LVL foi necessário realizar a produção dos painéis. Para a elaboração dos painéis de Compensado e LVL foi utilizada a madeira de *Pinus oocarpa*, com 25 anos de idade. As toras foram seccionadas utilizando uma motosserra, originando duas toras de 60 centímetros de comprimento. As mesmas foram descascadas e aquecidas em água à temperatura 66 °C por um período de 24 horas, conforme recomendações de Iwakiri (2005). Com a utilização de um torno laminador as toras foram processadas, obtendo lâminas com espessura de 2 mm. As lâminas foram guilhotinadas nas dimensões de 55 x 55 cm e secas em estufa na temperatura de 60 °C até obter uma umidade entre 5 e 6% (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2015).

Para a produção dos painéis foi utilizado o adesivo fenol-formaldeído, com teor de sólidos de 50,5 %, pH igual a 12,05, gel *timer* de 5,30 minutos e viscosidade de 659cP. A formulação do adesivo para a aplicação foi a seguinte (em partes por peso): adesivo FF = 100; farinha de trigo = 10 e água = 10. As lâminas foram coladas com gramatura de 180 g.m² (linha simples). O ciclo de prensagem para obtenção dos compensados ocorrerá com temperatura de 150 °C, tempo de 15 minutos e pressão de prensagem de 11 kgf.cm².

Os painéis compensados foram produzidos com sete lâminas cruzadas entre si, enquanto que os painéis do tipo LVL foram produzidos com sete lâminas posicionadas na mesma direção.

A classificação da qualidade das lâminas (A, B, C e D) foi realizada utilizando como referência a NBR 9531 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986), sendo possível identificar a classificação B para as capas e miolo dos painéis.

Os corpos de prova de flexão estática para os painéis de compensado e LVL foram confeccionados com o emprego de uma serra circular esquadrejadeira, sendo posteriormente climatizados à temperatura de 22 ± 2 °C e

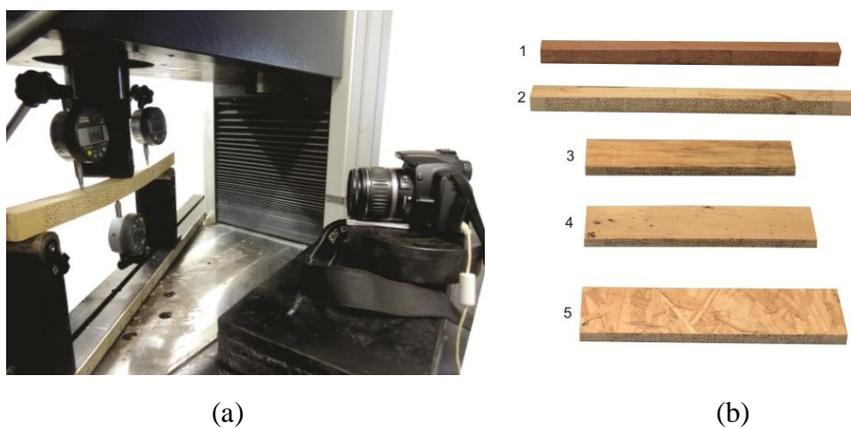
umidade relativa do ar de $65 \pm 5\%$. Foi avaliado o módulo de elasticidade (E) em ensaio de flexão estática conforme a norma EN 310 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1993).

Os painéis *Oriented Strand Board* (OSB) foram obtidos mediante compra no comércio de Lavras - Minas Gerais. Os painéis OSB adquiridos são produzidos com adesivo fenol-formaldeído, densidade de $0,65 \text{ g.cm}^{-3}$ e dimensões de 244 x 122 x 15 cm (comprimento, largura e espessura). Os corpos de prova de flexão estática para os painéis OSB foram confeccionados e armazenados conforme as normas ASTM D1037 (ASTM, 2006) e DIN 52362 (NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ, 1982). O módulo de elasticidade (E) foi calculado de acordo com a norma ASTM D1037 (ASTM, 2006).

Os corpos de prova foram submetidos à flexão estática, em uma Máquina Universal de Ensaio com capacidade de carga de 30 toneladas-força, no qual, foi aplicada a técnica PIV para determinação do Módulo de Elasticidade.

A Máquina Universal de Ensaio foi instrumentada com relógios comparadores (um no centro do corpo de prova e outros dois na metade da distância entre os apoios e o ponto de aplicação da carga) para medição dos valores de deslocamento das vigas. Para capturar as imagens, uma câmera profissional digital (CANON EOS Rebel T3) foi posicionada perpendicularmente à superfície da amostra (25 cm de distância). A câmera fotográfica foi equipada com jogo de lentes para melhor ajuste do foco em relação à superfície do corpo de prova. A captura das imagens ocorreu com a utilização de um controle remoto para evitar qualquer perturbação na câmera fotográfica. Os equipamentos utilizados, a configuração do ensaio, os corpos de prova ensaiados e a instrumentação da máquina universal de ensaios ocorreram conforme Figura 1.

Figura 1 Vista geral da Máquina Universal de Ensaio e a instrumentação do ensaio de flexão estática para a aplicação da técnica PIV (a) e os corpos de provas utilizados no experimento (b).

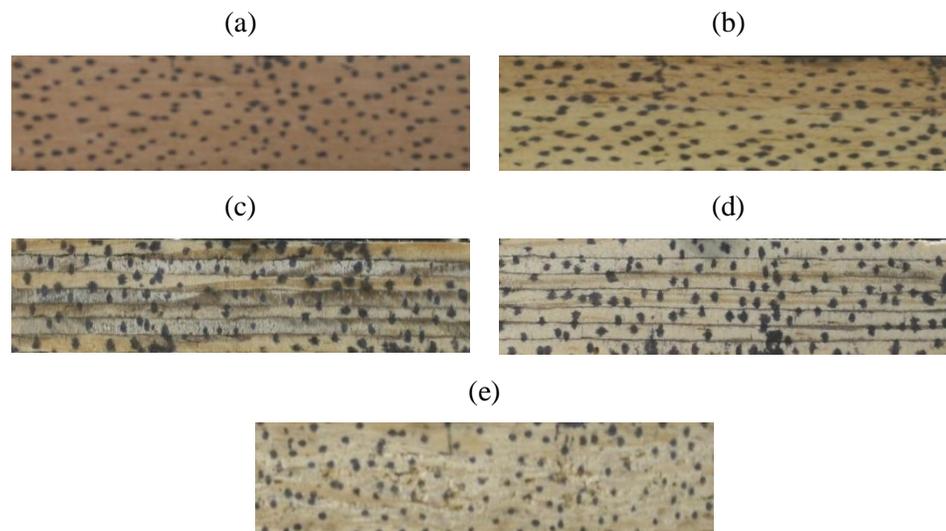


Legenda: 1- Madeira serrada *Pinnus oocarpa*; 2- Madeira serrada *Eucalyptus grandis*; 3-Painel LVL; 4-Painel compensado; 5- Painel OSB.

Fonte: Do autor.

Anterior à captura das imagens a superfície de todos os corpos de prova foi marcada com pontos feitos com caneta pincel do tipo ponta fina. Os pontos foram distribuídos por toda superfície dos corpos de prova com uma densidade de pontos igual a 9,4 pontos.cm². O diâmetro médio dos pontos foi de 1,5 mm, conforme Figura 2.

Figura 2 Marcadores inseridos na superfície dos materiais ensaiados.



Legenda: Corpos de prova com marcadores pintados com caneta pincel e padrão aleatório. (a) *Eucalyptus grandis*. (b) *Pinus oocarpa*. (c) Painel compensado. (d) Painel LVL. (e) Painel OSB.

Fonte: Do autor.

As imagens foram capturadas durante os ensaios de flexão estática em um intervalo regular de tempo. Para os corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* o intervalo entre imagens foi de 30 segundos e para os painéis LVL Compensado e OSB o intervalo entre imagens foi de 5 segundos.

Considerando que em média os ensaios de flexão estática para corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* tiveram a duração de aproximadamente 600 segundos (velocidade de carregamento de 1,3 mm.min) e que a duração dos ensaios com os corpos de prova de painéis LVL, OSB e Compensado giraram em torno de 90 segundos (velocidade de carregamento de 5 mm.min), cada corpo de prova obteve entre 18 e 20 imagens, número suficiente para a verificação do comportamento desses materiais em situação de carregamento por meio da técnica PIV.

Para a aplicação da técnica PIV, a primeira imagem foi capturada antes do início do carregamento ($t=0$, $d=0$) e as demais foram capturadas conforme intervalo de tempo preestabelecido. Assim a primeira imagem ($t=0$, $d=0$) serve como parâmetro de comparação para as imagens subsequentes.

Após o término dos ensaios, as imagens capturadas foram manipuladas em um *software* de tratamento de imagens (*Image J*) em que as imagens foram convertidas para o formato 8 bit e o número de *pixels* das imagens foi reduzido para 25% do original com o intuito de diminuir seu tamanho de armazenamento. Esse procedimento é importante no sentido de viabilizar o processamento das mesmas por meio do algoritmo PIV no *software* livre GNU Octave. Para o processamento da técnica PIV utilizou-se uma janela de interrogação de 32×32 *pixels*, *step size* de 1 *pixel*, braço de busca ao redor da região de análise de 50 *pixels* e limiar de semelhança para correlação das janelas de interrogação de 0,82.

Após o processamento das imagens no algoritmo PIV, foram obtidos os valores de deformação referentes aos locais escolhidos para análise. Nesse caso, as regiões escolhidas foram aquelas próximas aos três relógios comparadores posicionados (esquerda, centro e direita).

Com base na norma ASTM D143-94 (ASTM, 1994) para madeira serrada e nas normas EN 310 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 1993) para painéis Compensado e LVL e a ASTM D1037 (ASTM, 2006) para painéis OSB, utilizou-se os valores de deformação da parte central dos corpos de prova para o cálculo dos respectivos módulos de elasticidade (E).

Para cada corpo de prova analisado foram confeccionados dois gráficos “Carga x deformação”, um deles com as deformações obtidas pela técnica PIV e o outro com as deformações provenientes do relógio comparador. Os valores de carga foram fornecidos pela Máquina Universal de ensaios. Dessa forma,

calculou-se os módulos de elasticidade em cada corpo de prova de cada material por meio da técnica PIV e pelo método convencional (Relógio comparador).

O objetivo com a análise estatística dos dados foi comparar os módulos de elasticidade calculados com os resultados da técnica PIV e com os valores fornecidos pelo relógio comparador.

O procedimento estatístico delineou-se com o cálculo do módulo de elasticidade em todos os corpos de prova. Assim, foi possível ao final dos cálculos obter dois valores médios de módulo de elasticidade (E_{PIV} e $E_{Relógio\ comparador}$) para cada material ensaiado.

A comparação estatística entre os valores de módulo de elasticidade pela técnica PIV (E_{PIV}) e os módulos de elasticidade pelo relógio comparador ($E_{Relógio\ comparador}$) ocorreu por meio de comparação de médias aplicando-se o teste estatístico “t de *Student*”.

Para verificação estatística da igualdade entre os módulos de elasticidade pela técnica PIV e pelo relógio comparador formulou-se a seguinte hipótese H_0 : $\mu_{PIV} = \mu_{Relógio\ comparador}$, ou seja, se as médias dos módulos de elasticidade pelos dois métodos são iguais.

Com a aplicação do teste “t de *Student*” com intervalo de confiança de 99%, determinou-se a aceitação ou rejeição da hipótese H_0 , verificando assim a igualdade ou diferença estatística entre os módulos de elasticidade médios encontrados em cada material pelos dois métodos de análise.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

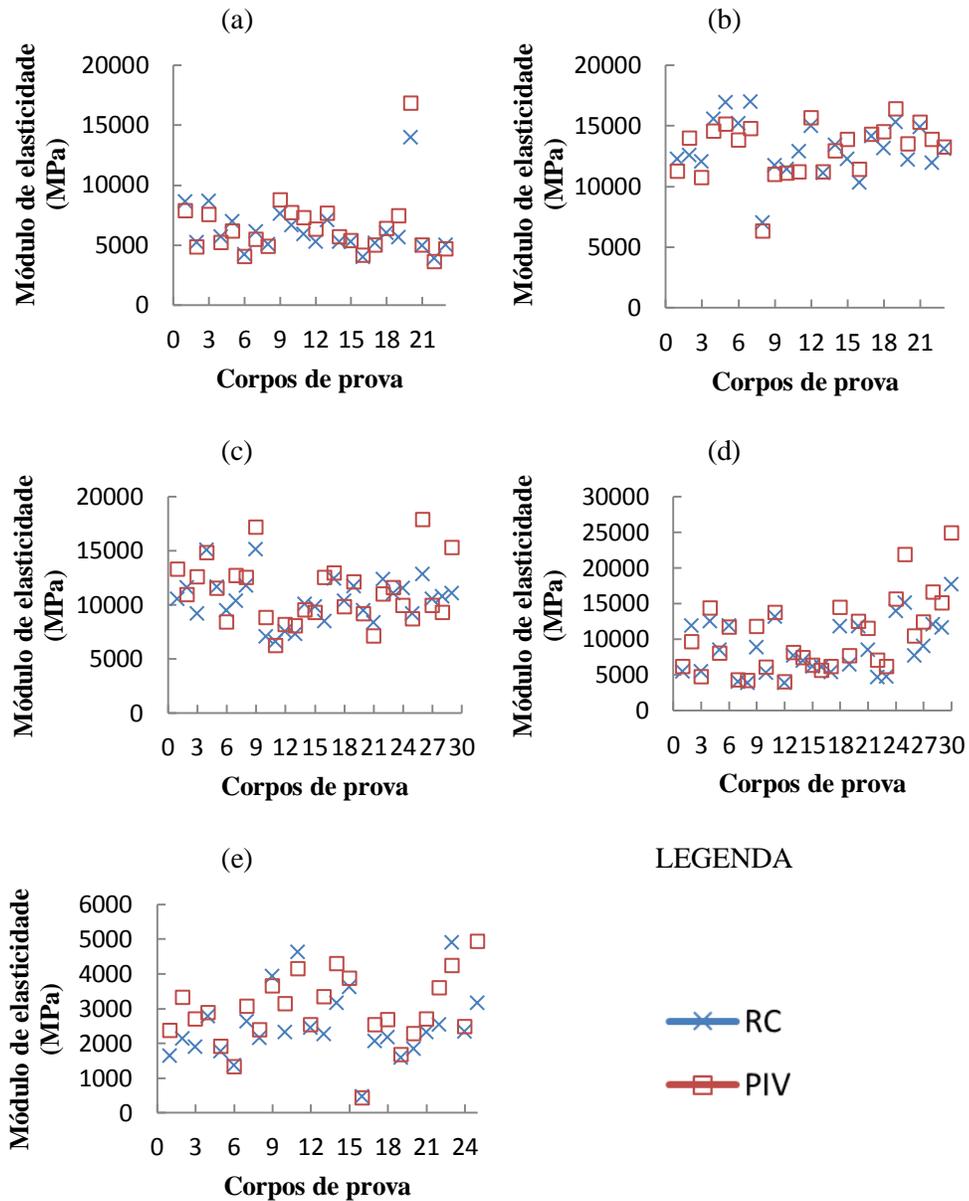
3.1 Comparação do Módulo de elasticidade

A partir dos ensaios de flexão estática foram obtidos os valores de deformação dos corpos de prova dos materiais ensaiados. Cada corpo de prova ensaiado gerou dois conjuntos de valores contendo as deformações do decorrer do ensaio, um pelo relógio comparador e outro pela técnica PIV.

Com base nas normas específicas para cada tipo de material e a partir do gráfico “Força x Deformação” de cada corpo de prova, calculou-se os módulos de elasticidade (E) pelas duas metodologias. A comparação desses valores é representada na Figura 3.

Observa-se pela Figura 3 que em todos os materiais ensaiados a técnica PIV apresentou valores de módulo de elasticidade (E) muito próximos daqueles encontrados por meio das medições com relógios comparadores.

Figura 3 Comparação dos módulos de elasticidade obtidos pela técnica PIV e pelos relógios comparadores.



Legenda: Módulos de elasticidade dos corpos de prova de (a) *Pinus oocarpa*. (b) *Eucalyptus grandis*. (c) Compensado. (d) LVL. (e) OSB.

Fonte: Do autor.

Avaliando a variação entre os valores de módulo de elasticidade (E) entre os corpos de prova de um mesmo material, como exemplo a madeira serrada de *Pinus oocarpa* (FIGURA 3(a)), observa-se que a técnica PIV acompanha sempre os valores de módulo de elasticidade medidos por meio do relógio comparador, mesmo em situações discrepantes das demais, indicando que essa técnica funciona em diferentes situações de carregamentos e deformações.

3.2 Análise estatística

A partir dos módulos de elasticidade de cada corpo de prova foi possível o cálculo de dois valores médios para cada material, um para os valores calculados com o relógio comparador e o outro com a técnica PIV, comparando-se assim as duas metodologias.

A análise estatística ocorreu com a aplicação de um teste “t de *student*” para comparação de médias. Os dados referentes ao tipo de ensaio, norma utilizada, médias dos valores de módulo de elasticidade em cada material e o teste estatístico são verificados conforme Tabela 2.

Tabela 2 Comparação estatística dos módulos de elasticidade obtidos pelo método convencional e pela técnica PIV.

Material	Ensaio	Método	Módulo de elasticidade médio (MPa)	$t_{\text{calc } 0,005, n-1}$	$t_{\text{ctab } 0,005, n-1}$	H_0
						$\mu_{\text{PIV}} = \mu_{\text{RC}}$
<i>Eucalyptus grandis</i>	Flexão estática	RC	13.077,0	0,0730	-2,8187	Aceita
		PIV	13.027,0			
<i>Pinus oocarpa</i>	Flexão estática	RC	6.171,6	-0,4338	-2,8187	Aceita
		PIV	6.418,8			
Compensado	Flexão estática paralelo	RC	10.481,2	-0,9670	-2,7563	Aceita
		PIV	11.094,3			
LVL	Flexão estática paralelo	RC	8.687,4	-1,3395	-2,7563	Aceita
		PIV	10.261,0			
OSB	Flexão estática paralelo	RC	2.480,1	-1,7461	-2,7874	Aceita
		PIV	2.899,0			

Legenda: RC= Relógio Comparador.

Fonte: Do autor.

A partir da comparação estatística (Tabela 2), verificou-se que em todos os materiais ensaiados, os Módulos de elasticidade médios calculados pelos dois métodos foram iguais, segundo o teste “t de Student” com 1% de confiança para comparação das médias. Esse resultado indica a precisão e confiabilidade da técnica PIV frente a um método convencionalmente utilizado.

Outros autores como Melo e Del Menezzi (2016) e Ribeiro et al. (2016) estudaram o módulo de elasticidade por meio de técnicas não destrutivas de ensaio, sendo *Stress wave timer* e Ultrassom, respectivamente. Observaram que essas técnicas foram eficientes na inferência dos Módulos de elasticidade. No entanto, técnicas como o *Stress wave timer* e o Ultrassom dependem de princípios físicos como a densidade, umidade, descontinuidade de fibras e presença de imperfeições no interior dos materiais ensaiados.

Segundo Stangerlin et al. (2011), esse comportamento se deve ao fato de que a tensão induzida durante os ensaios dinâmicos é pequena, ou seja, as medições dinâmicas são baseadas nas propriedades mecânicas apenas no limite elástico.

Nesse sentido, a técnica PIV tem a vantagem de avaliar apenas a superfície do material ensaiado, não dependendo das propriedades físicas e características do interior do material. Sendo assim, conseguiu acompanhar os deslocamentos dos corpos de prova do início ao final do ensaio, inclusive no momento de ruptura.

Os valores encontrados nesta pesquisa podem ser comparados com valores obtidos por outros autores. Trianoski et al. (2014) encontraram um valor de módulo de elasticidade para o *Pinus oocarpa* de 7.993,0 MPa. Os valores de módulo de elasticidade encontrados nesse trabalho, que foi entre 6.171,6 MPa (método convencional) e 6.418,8 MPa (PIV). Essa variação entre os valores pode ser ocasionada pelas condições ambientais onde os indivíduos florestais cresceram, bem como o local de retirada dos corpos de prova do tronco da árvore, próximo da base ou da copa ou ainda com maior quantidade de cerne ou de alburno.

Em relação ao *Eucalyptus grandis*, vários autores determinaram as propriedades mecânicas desse material. Missio et al. (2013), por exemplo, encontraram valores médios de módulo de elasticidade de 7.813,0 e 9.103,0 MPa para ensaios destrutivos e ensaio com a técnica de ultrassom, respectivamente. Esses valores de módulo de elasticidade, quando comparados aos encontrados nesta pesquisa (13.077,0 MPa (método convencional) e 13.027,0 MPa (PIV)) demonstram certa variação, porém ainda são considerados valores semelhantes para esse parâmetro.

Iwakiri et al. (2002) trabalhando com diferentes formulações de adesivo fenol formaldeído em painéis compensado de *Pinus oocarpa*, encontraram

valores médios de módulo de elasticidade de 7.548,5 a 10.366,3 MPa. Sendo tais valores coerentes com os encontrados nesta pesquisa 10.481,2 MPa (método convencional) e 11.094,3 MPa (PIV).

Lima et al. (2013), estudando as propriedades mecânicas de painéis de LVL produzidos com diferentes espécies e configurações das lâminas, encontraram um valor médio de “E” de 5.338,9 MPa em painéis LVL de *Pinus oocarpa*. No entanto, Müller et al. (2015) encontraram valor médio de módulo de elasticidade (E) de 15.270,0 MPa em painéis LVL de *Pinus taeda*. Nesta pesquisa os valores de “E” encontrados foram de 8.687,4 MPa utilizando o método convencional e 10.261,0 MPa pela técnica PIV, ou seja, valores intermediários aqueles encontrados pelos autores supracitados. Isso pode ser explicado pelo número de lâminas utilizadas na confecção dos painéis LVL, Lima et al. (2013) utilizaram 9 lâminas, Müller et al. (2015) utilizaram 5 lâminas e os painéis deste trabalho foram confeccionados com 7 lâminas.

Saldanha e Iwakiri (2009) encontraram para painéis OSB de *Pinus taeda* valores de módulo de elasticidade (E) paralelo de 6.069,0 MPa. Já Mendes (2010) encontrou um valor de (E) paralelo de 8.222,0 MPa. Esses valores são superiores àqueles encontrados neste trabalho. Deve ser considerado que os painéis utilizados nesta pesquisa são comerciais, no entanto os valores encontrados por meio da metodologia convencional foram estatisticamente iguais àqueles encontrados pela técnica PIV, independentemente do valor.

4 CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa permitem concluir que, com base nas análises estatísticas, os valores médios de módulo de elasticidade encontrados pela técnica PIV não apresentaram diferença estatística significativa em comparação com as médias dos módulos de elasticidade obtidos pelo relógio comparador em nenhum dos materiais.

Os valores médios de módulo de elasticidade encontrados com a aplicação do método convencional e pela técnica PIV, respectivamente, foram para o *Eucalyptus grandis* de 13.077 e 13.027 MPA, para o *Pinus oocarpa* de 6.171,6 e 6.418,8 MPa, para o compensado de 10.481,2 e 11.094,3 MPa, para o LVL de 8.687,4 e 10.261,0 MPa e para o OSB de 2480,1 e 2.899 MPa.

A técnica PIV foi capaz de caracterizar todos os materiais ensaiados neste estudo, por meio de seus respectivos módulos de elasticidade com precisão. Dessa forma, a técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) pode ser utilizada para caracterização de materiais em situações de carregamento, com possibilidade de aplicação *in loco* em peças estruturais em uso.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D-1037: standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials. In: ANNUAL book of ASTM standard. Philadelphia, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-143**: standard methods of testing small clear specimens of timber. 1994. part 16, p. 251-254.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9531**: chapas de madeira compensada - classificação. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: informação e documentação - artigo em publicação periódica científica impressa. Rio de Janeiro, 2003.
- CEZARO, J. A.; TREVISAN, R.; BALBINOT, R. (2016). Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Chrysophyllum marginatum*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 86, p. 135-143, 2016.
- DELUCIS, R. A. et al. Propriedades mecânicas da madeira de acácia-negra aos quatro e se-te anos de idade. **Revista Ciência da Madeira**, Curitiba, v. 7, n. 2p. 61-69, 2016.
- DE PAULA, M. H. et al. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). **Biodiversidade**, Rondonópolis, v. 15, n. 2, p. 136, 2016.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 310**: wood based panels – determination of modulus of elasticity and modulus of rupture in static bending. Brussels, 1993.
- FREITAS, A. S.; GONCALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. Tratamento termomecânico e seus efeitos nas propriedades da Simarouba amara (Aubl.). **Floresta Ambiental**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 565-572, Dec. 2016 .
- GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. G. et al. Qualidade de painéis LVL produzidos com madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 307-313, jul./set. 2015.
- IWAKIRI, S. et al. Produção de compensados de *Pinus taeda* e *Pinus oocarpa* com resina fenol-formaldeído. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 92-97, 2002.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

LIMA, N. N. et al. Mechanical and physical properties of LVL panels made from three amazonic species. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 407-413, 2013.

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de Pinus taeda L.** 1997. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Ultrasound nondestructive method to predict physical-mechanical properties of LVL made from *Schizolobium amazonicum*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 263-273, 2016.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MENDES, R. F. et al. Determinação do módulo de elasticidade de painéis aglomerados por Stress Wave Timer. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 2, p. 117-122, 2012.

MISSIO, A. L. et al. Método ultrassônico para estimativa do módulo de elasticidade de madeiras de "Pinus taeda" tratadas termicamente. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 4, p. 616-622, 2013.

MÜLLER, M. T. et al. The influence of different combinations of Eucalyptus saligna and Pinus taeda veneers in LVL panels. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 153-164, 2015.

NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ. **DIN 52362**: testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength. Berlin, 1982. 40 p.

RIBEIRO, E. S. et al. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não- destrutivos. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 2, p. 103-106, 2016.

SALDANHA, L. K.; IWAKIRI, S. Influência da densidade e do tipo de resina nas propriedades tecnológicas de painéis OSB de Pinus taeda. L. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 3, p. 571-576, 2009.

SEGUNDINHO, P. G. D. A. et al. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1155-1162, 2012.

SEGUNDINHO, P. G. D. A. et al. Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 441-449, 2013.

SERVOLO FILHO, H. J. **Propriedades mecânicas da madeira de clones de seringueira (Hevea brasiliensis-RRIM600 E GT1) analisadas em duas épocas do seu ciclo fenológico anual**. 2013. 93 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

STANGERLIN, D. M. et al. Propagação indireta e semidireta de ondas ultrassônicas na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. **Ciência da Madeira**, Curitiba, v. 2, n. 2, p. 85-95, 2011.

TRIANOSKI, R. et al. Avaliação das propriedades mecânicas da madeira de espécies de *Pinus* tropicais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 21-28, mar. 2014.