



**CÁSSIO HUMBERTO LIMA**

**VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS E  
CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS NO ESTUDO DE  
DEFORMAÇÕES EM ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA EM  
MADEIRAS**

**LAVRAS – MG**

**2018**

**CÁSSIO HUMBERTO LIMA**

**VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS E CORRELAÇÃO DIGITAL  
DE IMAGENS NO ESTUDO DE DEFORMAÇÕES EM ENSAIOS DE FLEXÃO  
ESTÁTICA EM MADEIRAS**

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

**Orientador**

**Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes**

**Coorientador**

**Prof. Dr. Rodrigo Allan Pereira**

**LAVRAS – MG**

**2018**

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

Lima, Cássio Humberto.

Velocimetria por imagem de partículas e correlação digital de imagens no estudo de deformações em ensaios de flexão estática em madeiras / Cássio Humberto Lima. - 2018.

66 p.

Orientador(a): Francisco Carlos Gomes.

Coorientador(a): Rodrigo Allan Pereira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Ensaios não destrutivos. 2. Módulo de elasticidade. 3. Mapa de deformações. I. Gomes, Francisco Carlos. II. Pereira, Rodrigo Allan. III. Título.

**CÁSSIO HUMBERTO LIMA**

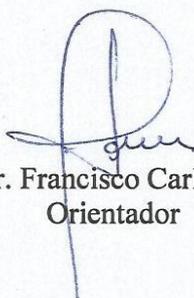
**VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS E CORRELAÇÃO DIGITAL  
DE IMAGENS NO ESTUDO DE DEFORMAÇÕES EM ENSAIOS DE FLEXÃO  
ESTÁTICA EM MADEIRAS**

**PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY AND DIGITAL IMAGES CORRELATION IN  
THE STUDY OF DEFORMATIONS IN TESTS OF STATIC BENDING IN WOODS**

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

APROVADA em 27 de novembro de 2018.

Dr. Rodrigo Allan Pereira	DEG/UFLA
Dr. André Luiz Zangiácomo	DEG/ UFLA
Dra. Denise de Carvalho Urashima	CEFET/ MG



Prof. Dr. Francisco Carlos Gomes  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2018**

*A Deus, que iluminou meu caminho  
durante essa caminhada e a minha  
família por estar sempre ao  
meu lado me apoiando*

**DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

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

Ao professor e orientador Francisco Carlos Gomes, pela orientação, pelo saber que transmitiu, paciência, dedicação e amizade.

Ao professor e coorientador, Rodrigo Allan Pereira, pelo apoio, disponibilidade, pelas opiniões e críticas construtivas, pela total colaboração para solucionar dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo dessa caminhada.

Ao professor Alex de Oliveira Ribeiro, pela ajuda na análise estatística dos dados.

Ao professore André Luiz Zangiácomo e a professora Denise de Carvalho Urashima, por terem aceito o convite para compor a banca de defesa.

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

Aos meus país José Humberto Lima (*in memorian*) e Maria Eunice de Carvalho Lima, pelo amor e apoio incondicional.

Agradeço a Deus, pois sem ele não teria forças para concluir essa jornada.

Agradeço a CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG pelo aporte financeiro dado ao projeto.

*“Nossas virtudes e nossos defeitos são  
inseparáveis, assim como a força e a  
matéria. Quando se separados, o  
homem deixa de existir”*

***Nikola Tesla***

## RESUMO

Os ensaios de caracterização mecânica fornecem dados sobre o comportamento dos materiais. A capacidade de resistir ou transmitir esforços sem deformações excessivas ou falhas mecânicas definem o emprego dos materiais nas diversas áreas da engenharia. A avaliação de um material pode ser feita de forma destrutiva e não destrutiva. Sendo assim é de suma importância conhecer diferentes metodologias de ensaios para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais. As técnicas de ensaios não destrutivos velocimetria por imagem de partícula (PIV) e correlação digital de imagens (DIC), se diferem das técnicas de ensaios convencionais, por elas permitirem medições de forma indireta, sem destruir ou danificar os materiais e ainda por possibilitar a aplicação em estruturas em serviço. No presente trabalho, objetivou-se determinar as deformações, os módulos de elasticidade e o mapa de deformações em vigas de madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*, usando as técnicas de ensaios não destrutivas, PIV e DIC. Para este fim, os materiais em estudo, foram submetidos a ensaios de flexão estática, para obtenção da deformação na viga. Por meio da aplicação dos testes estatísticos “Fisher” e “Scott Knott”, com nível de confiança de 95%, observou-se que em todas regiões de análise de deformação com a técnica DIC foram encontrados valores estatisticamente iguais aos encontrados no método convencional, o que também se verificou em algumas das regiões analisadas pela técnica PIV. Os valores médios de módulo de elasticidade (E) encontrados pelas técnicas DIC, PIV e método convencional, respectivamente, foram para o *Eucalyptus grandis* de 16.693,61 MPa, 15.713,57 MPa e 17.176,63 MPa e para o *Pinus oocarpa* de 7.166,27 MPa, 6.425,54 MPa e 7.224,98 MPa. Concluiu-se que as técnicas de ensaios PIV e DIC são capazes de medirem deslocamentos em ensaio de flexão estática e obterem o módulo de elasticidade em vigas de madeira, apresentando assim, potencial para o uso em estruturas em serviço.

Palavras-chaves: Ensaios não destrutivos, módulos de elasticidade, mapa de deformações.

## ABSTRACT

The mechanical characterization tests provide data on the behavior of the materials. The ability to resist or transmit effort without excessive deformation or mechanical failure defines the use of materials in the various engineering areas. The evaluation of a material can be done in a destructive and non-destructive way. Therefore, it is very important to know different methodologies of tests to evaluate the mechanical properties of the materials. The non-destructive techniques of particle image velocimetry (PIV) and digital image correlation (DIC) differ from conventional test techniques, as they allow indirect measurements without destroying or damaging the materials and structures in service. In the present work, the objective was to determine the deformations, elastic modulus and the deformation map in wood beams of *Eucalyptus grandis* and *Pinus oocarpa* using non-destructive testing techniques, PIV and DIC. For this purpose, the materials under study were subjected to static bending tests to obtain the deformation in the beam. By means of the statistical tests Fisher and Scott Knott, with 95% confidence level, it was observed that in all regions of analysis of deformation with the DIC technique, values were statistically equal to those found in the conventional method, which also occurred in some of the regions analyzed by the PIV technique. The average values of modulus of elasticity (E) found by DIC, PIV and conventional method, respectively, were for *Eucalyptus grandis* of 16,693,61 MPa, 15,713,57 MPa and 17,176,63 MPa and for *Pinus oocarpa* of 7,166, 27 MPa, 6,425.54 MPa and 7,224.98 MPa. It was concluded that the PIV and DIC test techniques are able to measure displacements in a static bending test and obtain the modulus of elasticity in wood beams, thus presenting potential for use in structures in service.

Key words: Non-destructive tests, modulus of elasticity, map of deformations.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das três seções principais da madeira.....	14
Figura 2 – Flexão de uma viga simplesmente apoiada.....	21
Figura 3 – Equipamento <i>Stress Wave Timer 239A</i> .....	25
Figura 4 - Aparato geral utilizado no ensaio de vibração transversal, com detalhe do posicionamento do corpo de prova apoiado nos “quartos” e o microfone unidirecional para a captação da vibração.....	27
Figura 5 – Exemplo de discretização das posições e das intensidades dos <i>pixels</i> .....	29
Figura 6 – Coordenadas das sub-regiões são ilustradas em vermelho, contendo o ponto central.....	30
Figura 7 – Deslocamentos lineares para as coordenadas das sub-regiões.....	32
Figura 8 – Correlação entre matrizes.....	34
Figura 9 – Manipulação das imagens durante a análise PIV.....	36
Figura 10 - Avaliação do vetor de deslocamento no plano de correlação $Rn(s)$ .....	37
Figura 11 – Configuração experimental.....	41
Figura 12 – Corpos de prova com marcadores aleatórios.....	42
Figura 13 – Seleção das janelas de interrogação no <i>pivmake-gui</i> .....	43
Figura 14 – Sequência de capturas de imagens durante ensaio de flexão estática.....	44
Figura 15 – Janela de seleção das imagens pelo <i>ncorr</i> .....	45
Figura 16 – Deslocamentos finais nas três regiões de interesse.....	47
Figura 17 – Deslocamentos ocorridos nas regiões de interesse pelo método DIC.....	48
Figura 18 – Relógios comparadores posicionados nas três regiões de interesse.....	49
Figura 19 – Comparação dos valores de deslocamentos entre os métodos RC, PIV e DIC.....	50
Figura 20 – Mapa de deformação pela técnica PIV.....	56
Figura 21 – Mapa de deformação pela técnica DIC.....	57

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral .....	13
2.2 Objetivos específicos .....	13
3 REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 Madeira .....	14
3.2 Propriedades mecânicas da madeira .....	17
3.3 Ensaios de caracterização mecânica .....	20
3.3.1 Ensaios destrutivos. ....	21
3.3.1.1 Resistência a flexão.....	21
3.3.2 Ensaios não destrutivos (END).....	22
3.3.2.1 Raio X.....	23
3.3.2.2 Ultrassom .....	24
3.3.2.3 <i>Stress wave timer</i> .....	25
3.3.2.4 Espectrofotometria do infravermelho próximo (NIR).....	26
3.3.2.5 Vibração longitudinal e transversal .....	27
3.4 Correlação digital de imagens (DIC) .....	28
3.4.1 Conceitos fundamentais de correlação digital de imagens .....	29
3.4.2 Princípios matemáticos e implementação computacional .....	31
3.5 Velocimetria por imagens de partículas (PIV).....	36
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1 Processamento das imagens nos algoritmos PIV e DIC .....	43
4.2 Análise estatística .....	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
5.1 Deformações obtidas pelo método PIV .....	48
5.2 Deformações obtidas pelo método DIC.....	49
5.3 Comparação entre os métodos DIC, PIV e método convencional.....	50
5.4 Módulo de elasticidade .....	54
5.5 Mapas de deformação fornecidos pelas técnicas DIC e PIV .....	57
6 CONCLUSÕES .....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por novos materiais com diferentes propriedades mecânicas aumenta a necessidade de novos procedimentos e metodologias para o monitoramento e caracterização das estruturas em serviço, de maneira rápida e eficiente. As metodologias e técnicas convencionais utilizadas para a caracterização dos materiais necessitam de equipamentos específicos, normalmente de alto custo, e ambientes controláveis, como laboratórios, além disso, esse tipo de ensaio torna-se inviável, na maioria das vezes, quando se trata de avaliar e monitorar uma estrutura em serviço (PEREIRA, 2017).

Uma alternativa aos ensaios convencionais são as técnicas de ensaios não destrutivos (END). Segundo ABENDI (2002), os END são aqueles realizados em diversos materiais para seu monitoramento, por meio de princípios físicos e mecânicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e não comprometendo o uso do material ensaiado.

Estes ensaios podem ser utilizados em estruturas novas ou antigas, empregados para monitoramento do comportamento ou para esclarecer dúvidas sobre a qualidade do material. Os ensaios em estruturas em serviço visam avaliar a sua integridade e capacidade de resistir às solicitações de carregamentos.

Os métodos de ensaios não destrutivos ópticos vêm sendo desenvolvidos para determinar experimentalmente o mapa de deformação e tensões em estruturas sujeitas a carregamentos em geral, com destaque para as técnicas de correlação digital de imagem (DIC) e velocimetria por imagem de partícula (PIV).

A técnica DIC utiliza o processamento digital de imagens de um objeto e permite obter o mapa de deformação do mesmo em regiões de interesse. O deslocamento pode ocorrer no plano, em duas dimensões, ou fora do plano, em três dimensões, onde há a necessidade de mais de uma câmera. 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 na peça estrutural. Essas imagens são processadas por um algoritmo computacional que rastreia a região de interesse e fornece o seu deslocamento do início ao fim do carregamento.

Considerando-se o crescente aumento do uso da madeira serrada empregada na construção civil habitacional, seja de forma temporária, como na instalação do canteiro de obras, nos andaimes, nos escoramentos e nas fôrmas, ou de forma definitiva, utilizada nas

esquadrias, estruturas de cobertura, forros e nos pisos, por exemplo, torna-se necessária a busca por novas metodologias de ensaios capazes de fornecerem resultados rápidos, seguros e confiáveis.

Portanto, na escolha de metodologias de ensaios, as técnicas correlação digital de imagens (DIC) e velocimetria por imagem de partículas (PIV) são técnicas de ensaios não destrutivos e que podem ser aplicadas em estruturas em serviços (*in loco*), tornando-se opções para a obtenção de resultados confiáveis do comportamento mecânico das madeiras submetidas a carregamentos.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de determinar as deformações, os módulos de elasticidade e o mapa de deformação em vigas de madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* utilizando as técnicas PIV e DIC.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal medir as deformações em estruturas de madeira, submetidas a ensaios de flexão estática, usando as técnicas de velocimetria de imagem de partículas e correlação digital de imagens.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Obter os módulos de elasticidade utilizando as metodologias DIC e PIV.
- Obter os mapas de deformação obtidos pelos métodos DIC e PIV.
- Comparar estatisticamente os métodos DIC, PIV e convencional.

### 3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Madeira

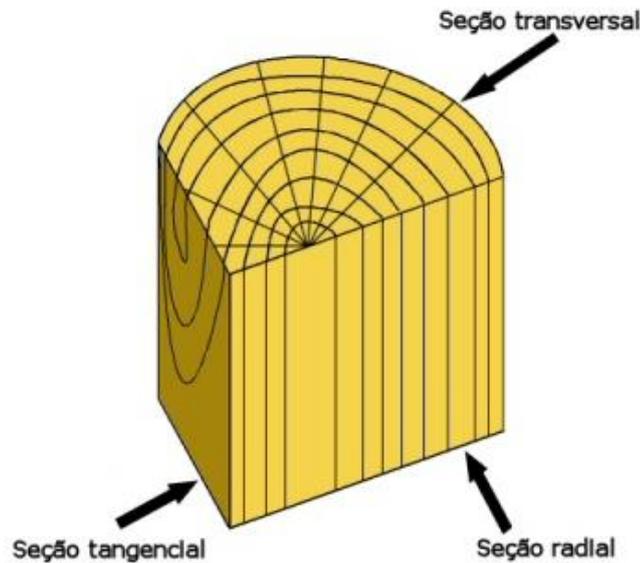
A madeira é constituída por pequenos elementos celulares, com direção predominantemente longitudinal, diferenciados segundo as funções que desempenham. O seu conjunto e arranjo (estrutura anatômica) são característicos de cada espécie florestal, embora variem também, em certa medida, com a idade e as condições de crescimento (solo, clima, altitude, exploração florestal, queimadas, etc.) (CRUZ; NUNES, 2005).

As madeiras normalmente são classificadas em duas categorias: as coníferas e as folhosas. Pinus, Araucária, Abeto e Cipreste são alguns exemplos de coníferas; Eucalipto, Carvalho e Álamo são exemplos de folhosas. As folhosas e as coníferas apresentam várias diferenças quanto às estruturas celulares de seus xilemas. Embora existam exceções, a madeira das folhosas geralmente é mais dura que a das coníferas. Por isso, as folhosas também são conhecidas como madeiras duras, e as coníferas são denominadas madeiras moles (CASTRO E SILVA, 2000).

As folhosas são árvores da subclasse das dicotiledôneas, pertencente à classe angiosperma. Suas sementes são protegidas por carpelos, e suas folhas caem durante o outono e crescem novamente na primavera. Possuem basicamente quatro tipos de células: os vasos, as fibras, o parênquima longitudinal e o parênquima radial. Os vasos, células alongadas com seção transversal vazada e perfurações nas extremidades, atuam na condução de seiva bruta de modo vertical. As fibras são células alongadas e afinadas nas extremidades, possuindo como principal função a sustentação da árvore (TSOUMIS, 1991).

As coníferas pertencem à classe das gimnospermas. Ao contrário das folhosas, suas sementes são nuas (a palavra gimnosperma vem do grego gimno, que significa nu). A composição celular das coníferas é mais simples e uniforme. Os traqueídeos ou fibras constituem a maior parte das células deste tipo de árvore. Estas células possuem formato alongado e orientação vertical (paralela ao eixo do tronco) e são responsáveis por transportar a seiva bruta verticalmente e por dar força e suporte à madeira. O restante das células das coníferas são os raios, células alongadas e achatadas com orientação radial (perpendicular aos anéis de crescimento). O papel dos raios é armazenar e distribuir a seiva bruta horizontalmente (HELLMEISTER, 1973). Dependendo do corte realizado na madeira, podem ser observados as três direções, planos ou seções. A Figura 1 apresenta os três tipos de seções existentes:

Figura 1 – Representação das três seções principais da madeira.



Fonte: adaptado de Quoirin (2004)

A seção transversal pode ser vista ao observar a extremidade de uma tora de madeira. Neste plano, os anéis de crescimento aparecem aproximadamente como circunferências (ou arcos de circunferências) concêntricas, e os raios são vistos como linhas normais aos anéis. O plano radial é gerado ao cortar uma tora segundo a orientação de um raio (ou seja, de maneira perpendicular aos anéis de crescimento).

De acordo com Tsoumis (1991), nesta superfície os anéis aparecem como um conjunto de linhas paralelas. Os raios podem igualmente ser observados como pequenas manchas. Por último, como o próprio nome sugere, a seção tangencial refere-se à superfície que tangencia os anéis de crescimento, com orientação normal aos raios.

A madeira apresenta grande variabilidade de suas propriedades sendo, muitas vezes, penalizada quando submetida a competição com outros materiais estruturais que possuem propriedades mecânicas mais uniformes. (CALIL JUNIOR; MINA, 2003).

Segundo Zenid (2011), mesmo apresentando tal variabilidade, a madeira é um material atraente frente a outros e são comumente citados o baixo consumo de energia para seu processamento, a alta resistência específica, as boas características de isolamento térmico e elétrico, além de ser um material muito fácil de ser trabalhado manualmente ou por máquinas.

O aspecto, no entanto, que distingue a madeira dos demais materiais é a possibilidade de produção sustentada nas florestas nativas e plantadas e nas modernas técnicas silviculturais

empregadas nos reflorestamentos, que permitem alterar a qualidade da matéria-prima de acordo com o uso final desejado (ZENID, 2011).

Nas últimas décadas, observou-se um significativo aumento nas informações básicas sobre as propriedades da madeira. A utilização inicial da madeira como lenha e como peça estrutural simples observou extraordinária evolução, tanto na forma sólida, como na forma de painéis reconstituídos, exigindo-se em todas as situações, profundo conhecimento tecnológico (HILLIS e BROWN, 1978).

De acordo com Oliveira e Silva (2003), devido à anisotropia, as mudanças dimensionais observadas na madeira são diferentes ao longo das três direções estruturais.

Em geral, a contração na direção tangencial é, aproximadamente, duas vezes maior do que na direção radial; a razão entre a contração tangencial e radial (relação T/R), comumente chamada de fator de anisotropia, geralmente varia de 1,5 a 2,5, e tornou-se um índice muito importante nos estudos de contração de madeira; quanto maior essa relação, maior será a tendência ao fendilhamento e empenamento da madeira. Para usos que envolverem estabilidade dimensional da madeira, a mais recomendada é aquela que apresentar a menor taxa T/R (OLIVEIRA e SILVA, 2003).

Segundo Panshin e De Zeeuw (1980), a contração da madeira varia com a sua posição na árvore. Normalmente, as contrações transversais são menores próximo à medula (madeira juvenil), crescendo rapidamente desta para a casca, estando essa mudança relacionada com a rápida redução do ângulo microfibrilar na parede celular, com o aumento do comprimento da célula e do teor de celulose.

Na década de 1970, o governo brasileiro incentivou os reflorestamentos, e com isso grandes áreas foram utilizadas para a plantação de espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*. A maioria dos reflorestamentos se localizou no cerrado brasileiro por causa do preço da terra naquela época. Porém, reflorestamentos situados em Angatuba, SP, e outras regiões alcançaram rendimentos surpreendentes (MOURA; DVORAK; HODGE, 1998).

As espécies de *Pinus* introduzidas no Brasil são provenientes, principalmente, dos Estados Unidos, embora inicialmente fossem oriundas da Europa. Elas ocorrem naturalmente na América do Norte, na América Central, no norte da Europa e na Ásia (LIMA; JARÁ; ALFONSO, 1988).

O gênero *Pinus*, da família das *Pinaceae*, é composto por plantas lenhosas, em geral arbóreas, de altura que varia entre 3 a 50 m. As plantas têm tronco reto, mais ou menos cilíndrico e copa em forma de cone. Possuem folhas em forma de acículas, agrupadas em fascículos. A

cor da madeira do cerne varia do amarelo-claro ao alaranjado ou castanho-avermelhado (LIMA; JARÁ; ALFONSO, 1988). Algumas espécies de *Pinus* se incluem entre as árvores mais utilizadas no mundo.

Segundo Couto (1995), o gênero *Eucalyptus* se destaca entre as espécies utilizadas, devido ao enorme potencial de suprimento de madeira para os mais variados fins. A sua participação no setor industrial de base florestal é importante e decisiva na substituição das madeiras nativas e racionalização do uso, através de produtos renováveis, como chapas, painéis e "produtos engenheirados". A sua utilização contribui, ainda, para diminuir a dependência das reservas de materiais não renováveis, já que é uma fonte natural disponível em todo o mundo e a sua provisão, mediante uma gestão adequada, é praticamente inesgotável.

Segundo Oliveira (1997), a madeira do gênero *Eucalyptus*, é de cor rosa forte ou vermelho-pardacento, leve e macia. O autor encontrou as seguintes características gerais para a espécie *Eucalyptus grandis*: alburno distinto do cerne com coloração pardo-claro, com espessura média de 1,8 cm; cerne de cor rosa-claro; brilho moderado e textura fina na madeira localizada próximo da medula, passando a média, nas demais posições em direção à periferia do tronco; na madeira jovem, a zona medular é pouco saliente e os anéis de crescimento são pouco marcantes, porém visíveis a olho nu; na madeira adulta, a medula é marcante e a zona medular tende a rachaduras; a grã varia de direita a ligeiramente inclinada, o cheiro e o gosto são imperceptíveis ou levemente tendentes a ácido tânico; as camadas de crescimento são pouco distintas, demarcadas por zonas fibrosas mais escuras e com menor frequência vascular.

### **3.2 Propriedades mecânicas da madeira**

As propriedades mecânicas da madeira são influenciadas por diversos fatores, sendo os mais importantes a posição na árvore, a umidade, o tempo de duração da carga e a estrutura da madeira (PFEIL e PFEIL, 2003).

De acordo com Evans, Senft e Green (2000), as propriedades mecânicas da madeira são dependentes, principalmente, da densidade básica, da porcentagem de madeira juvenil, da largura dos anéis, do ângulo das microfibrilas, da inclinação da grã, da quantidade de extrativos, do teor de umidade, da intensidade ao ataque de insetos, do tipo e da localização e quantidade de nós, dentre outros fatores. Green, Winandy e Krestschmann (1999) citaram que essas propriedades mecânicas são afetadas pelas mudanças na umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, diminuindo com o aumento desse teor.

Segundo Latorraca e Albuquerque (2000), as propriedades da madeira variam conforme o crescimento da árvore, com a ressalva de que a porção da madeira correspondente aos primeiros anéis formados apresenta menor massa específica e fibras mais curtas, entre outras características, ou seja, a diferença entre lenho juvenil e adultos. Verificaram ainda que há aumento da massa específica, bem como da espessura da parede celular em anéis sucessivos, a partir do centro para a periferia do tronco da árvore, no sentido medula casca. Também foi verificado que a densidade tende a aumentar com a idade, com conseqüente aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células.

As propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços de natureza mecânica, permitindo compará-la com outras madeiras de propriedades conhecidas e por analogia indicar as provas adicionais necessárias para conhecer sua utilização (STANGERLIN; MELO; DOMINGUES, 2008).

Segundo Panshin e De Zeeuw (1980), a variabilidade da maior parte das propriedades mecânicas da madeira pode ser estimada com base na variação da densidade. Isso pode ser explicado porque as propriedades de resistência à flexão estática e o seu módulo de elasticidade (E) estão correlacionados com a densidade, a qual, por sua vez, também está correlacionada com as dimensões das células. Mencionaram também que a relação entre densidade e as propriedades mecânicas pode ser alterada pela presença de extrativos que se adicionam à massa lenhosa, aumentando, principalmente, a resistência à compressão axial da madeira.

O módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca do material e depende tanto da rigidez das ligações atômicas como da densidade das ligações (FERRANTE, 2002), o qual pode ser obtido tanto a partir do ensaio de flexão estática como a partir dos ensaios de tração e compressão (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968). Os valores encontrados para compressão paralela e tração, são muito similares entre si, enquanto que no ensaio de flexão os valores são um pouco menores.

Segundo Matos (1997) o módulo de elasticidade (E) pode ser definido como o esforço necessário para que um corpo de 1 cm<sup>2</sup> 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.

O módulo de elasticidade também está associado à rigidez, ou melhor, expressa a rigidez. A rigidez da madeira é uma medida da aptidão da madeira resistir a deformação imposta pela carga. Desta forma, e em termos práticos, um material de difícil deformabilidade pode ser

chamado de rígido e quanto menor for esta deformabilidade, melhor é a aptidão da madeira para fins estruturais (TSOUMIS, 1991).

O módulo de ruptura e o módulo de elasticidade (E) são dois parâmetros normalmente avaliados em testes de flexão estática, sendo o módulo de elasticidade de maior importância na caracterização tecnológica da madeira, representando a resistência do material quando submetido a uma carga aplicada (SCANAVACA JÚNIOR; GARCIA, 2004).

De acordo com Matos (1997), 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.

De acordo com a Norma Brasileira NBR 7190 – Projetos em Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997), a resistência da madeira à flexão ( $f_{WM}$  ou  $f_M$ ) é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo de prova no ensaio de flexão simples, calculado com a hipótese de a madeira ser um material elástico, sendo dado por:

$$f_m = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} \quad (1)$$

Onde:  $M_{m\acute{a}x}$  é o máximo momento aplicado ao corpo de prova, em newtons-metro;  $W_e$  é o módulo resistente elástico da seção transversal do corpo de prova, dado por  $\frac{bh^2}{6}$ , em metros cúbicos. A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado no trecho linear do diagrama carga x deslocamento.

Para esta finalidade o módulo de elasticidade deve ser determinado pela inclinação da reta secante à curva carga x deslocamento no meio do vão, definida pelos pontos ( $F_{10\%}; v_{10\%}$ ) e ( $F_{50\%}; v_{50\%}$ ) correspondentes, respectivamente, a 10% e 50% da carga máxima de ensaio estimada por meio de um corpo de prova gêmeo, sendo dado por:

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) * L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) * 4 * b * h^3} \quad (2)$$

onde:

$F_{M,50\%}$  e  $F_{M,10\%}$  são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao corpo de prova, em *newtons*,  $v_{10\%}$  e  $v_{50\%}$  são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada  $F_{M,est}$ , em metros; b e h

correspondem, respectivamente, à largura e à altura da seção transversal do corpo de prova, em metros.

De acordo com a norma ASTM D143 (ASTM, 1994) o módulo de elasticidade é determinado pela Equação 3:

$$E = \frac{P * L^3}{(48 * d * I)} \quad (3)$$

onde:

$E$  = é o módulo de elasticidade, em MPa,

$P$  = carga, em *newtons*,

$L$  = comprimento, em metros,

$d$  = deformação, em metros,

$I$  = momento de inércia, em  $m^4$

### 3.3 Ensaios de caracterização mecânica

Segundo Pereira (2017), a necessidade por materiais com as mais diversas características tem crescido significativamente 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. Aliada 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.

De acordo com Ross (1999) as avaliações destrutivas são, em geral, os principais métodos utilizados para o conhecimento das propriedades mecânicas da madeira. A obtenção dos resultados a partir dessa metodologia é por vezes onerosa, em razão do tempo consumido com a confecção dos corpos de prova e custo de material.

Por sua vez, as avaliações não destrutivas permitem a obtenção de informações mais precisas e mais amplas, medindo-se um número maior de amostras, em função da rapidez dos testes. Diversas técnicas, como raios-X, análise química, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras, vêm sendo empregadas na avaliação não-destrutiva da madeira (ROSS, 1999).

### **3.3.1 Ensaios destrutivos.**

Os ensaios destrutivos são os mais utilizados para determinar ou verificar as propriedades dos materiais. São também adequados para medir a capacidade de suportar esforço de uma peça.

De acordo com Zolin (2010), ensaios destrutivos são ensaios mecânicos que necessitam de procedimentos que provocam inutilidade nos materiais ou nos corpos de prova, mesmo que o dano seja pequeno. O ensaio de dureza, em certos casos, produz um pequeno dano. Esse efeito (marcas) não chega a destruir a peça ensaiada, porém deixa sinais que serão pontos de concentração de tensão e fonte de possíveis falhas.

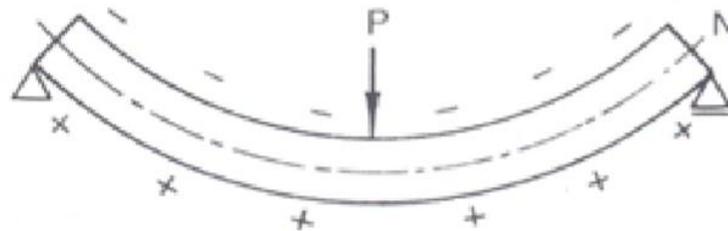
O conhecimento das propriedades dos materiais, muitas vezes, só é possível pela aplicação de ensaios que levam a destruição dos materiais. Nesses casos, na maioria das vezes, são usados corpos de prova do mesmo material das peças que serão utilizadas para determinadas aplicações.

#### **3.3.1.1 Resistência a flexão**

Dentre os ensaios mecânicos realizados para caracterização da madeira, pode-se citar como um dos principais o ensaio de flexão estática. Segundo Martins (2010), a maior parte das aplicações estruturais, como por exemplo estruturas de coberturas, suportes de pisos e pontes, estão sujeitas à ação de cargas de flexão.

Ainda de acordo com Martins (2010), nestes casos desenvolvem-se três tipos de tensões básicas: tensões de tração, compressão e de cisalhamento. A Figura 2 ilustra as regiões tracionadas e as comprimidas, representadas pelos sinais positivos (+) e negativos (-), respectivamente. A resistência da madeira à flexão é mais baixa do que a dos metais, no entanto é mais elevada do que a resistência à flexão da maioria dos restantes materiais não metálicos. Como material estrutural, a madeira, beneficia do fato de ter uma relação resistência-peso mais favorável.

Figura 2 – Flexão de uma viga simplesmente apoiada.



Fonte: adaptado de Martins (2010).

De acordo com Moreschi (2010), o ensaio de flexão estática na madeira, tem como objetivo monitorar o comportamento que a madeira possui ao ser submetida a uma carga aplicada em sua face. Para fins práticos, a madeira, até determinado ponto, apresenta uma característica elástica, onde se cessa a força que a deforma, ela ainda apresenta capacidade de voltar ao seu estado original. A partir do ponto em que a madeira deixa a fase elástica e para a fase plástica, ela não apresenta mais a capacidade em retornar ao seu estado original, mesmo quando a força que a deforma é cessada.

Diversos fatores podem influenciar as propriedades mecânicas, dentre as quais se pode citar: a forma e as dimensões das peças, o ângulo de inclinação das fibras, a massa específica, o teor de umidade, a temperatura, as propriedades anatômicas, a composição química e a deterioração do material (STANGERLIN, 2010).

### 3.3.2 Ensaios não destrutivos (END).

A avaliação não destrutiva é conceituada como sendo a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material, sem alterar suas capacidades de uso. Tais avaliações devem fornecer informações precisas das propriedades e do desempenho do material (ROSS et al.,1998).

De acordo com Ross e Pellerin (1994), as primeiras pesquisas relativas à aplicação de ensaios não destrutivos na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira foram realizadas na década de 1950, nos Estados Unidos. Ainda que detenham a primazia de

conhecimentos nessa área específica, alguns países como Suíça, Romênia, Alemanha, Japão e Reino Unido, entre outros, também já se destacam nesse cenário.

Segundo Carreira (2003), no ano de 1958, institutos de pesquisas em madeira descobriram que a sua resistência e rigidez à flexão são altamente correlacionadas. Verificaram que a rigidez, módulo de elasticidade (E) de uma peça de madeira serrada pode ser forte indicador de sua resistência, módulo de ruptura. É possível, assim, uma caracterização eficaz por meio de métodos não destrutivos, nos quais não é necessária a extração de corpos de prova, pois a avaliação é feita na própria peça ou estrutura.

### 3.3.2.1 Raio X

Segundo Quoirin (2004), o método do raio X, é baseado no fato de que a penetração deste tipo de radiação depende, entre outros fatores, da densidade e espessura do material. O ataque por agentes biológicos, ao provocar perda de massa, origina zonas de menor densidade, o que é revelado pelo raio X. No caso de o ataque permanecer ativo, este método poderá permitir a identificação do agente em causa.

Existem diversos tipos de tomografias. Cada tipo baseia-se em um princípio físico diferente. A tomografia de raios X, por exemplo, tem como fundamento a atenuação sofrida por um feixe de raios X ao atravessar um objeto (HERMAN, 1996).

A tomografia tem como objetivo apresentar uma imagem da estrutura interna de um corpo ou objeto. Em tomografia de raios X, a imagem interna obtida ao final de uma reconstrução representa a distribuição bidimensional dos coeficientes de atenuação do objeto (QUOIRIN, 2004).

Silva (2002) utilizou a densitometria de raios X em madeiras de árvores de *Eucalyptus grandis*, com quatro diferentes idades, concluindo que houve aumento da densidade aparente da madeira no sentido medula-casca. Para as árvores com 10 anos, a densidade aparente média foi de  $0,46 \text{ g.cm}^{-3}$ , sendo 50% da seção radial próxima da medula formada por madeira juvenil; aos 25 anos, a densidade aparente média foi de  $0,63 \text{ g.cm}^{-3}$ . Sette Júnior et al. (2009) estudaram o efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*. Eles concluíram que o modelo de variação radial da densidade aparente do lenho utilizando a técnica de raios X não demonstrou diferenças significativas nas árvores de eucalipto dos três tratamentos utilizados, sendo os perfis radiais de densidade aparente característicos de madeira juvenil de árvores de eucalipto.

### 3.3.2.2 Ultrassom

O ultrassom é uma técnica não-destrutiva baseada em propagação de ondas que apresenta muitas aplicações, tanto em árvores quanto em peças estruturais. A determinação das propriedades mecânicas da madeira usando propagação de ondas ultrassônicas é baseada na relação entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a densidade.

A técnica não-destrutiva por meio de ultrassom apresenta diversas finalidades, permitindo desde a determinação da existência de nós, presença de ataque de microrganismos ou insetos, direcionamento das fibras, decomposição, passando pela avaliação de elementos estruturais de madeira em uso, até a estimativa de alguns parâmetros como o módulo de elasticidade (GORNIAK; MATOS, 2000).

De acordo com González, Valle e Costa (2001), classificam-se como ondas de ultrassom aquelas de frequência superior a 20 kHz. O método ultrassonoros se baseia na análise da propagação das ondas ultrassonoras e sua relação com as constantes elásticas da madeira. Calegari (2006) cita que a propagação de ondas ultrassônicas se dá por meio de um circuito eletrônico que emite pulsos elétricos. Esses pulsos são conduzidos por cabos coaxiais e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoeletrico, localizado nos transdutores. As vibrações mecânicas se deslocam pelo material que atenua o sinal emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado por outro cristal piezoeletrico, sendo então amplificado e transformado em pulsos elétricos novamente, de modo a permitir a medição do tempo de propagação. A partir da distância e do tempo de percurso da onda sonora, calcula-se a velocidade da mesma.

A velocidade das ondas ultrassônicas transitando pela madeira está relacionada à raiz quadrada do módulo de elasticidade ( $E$ ) sobre a massa específica. Portanto, diretamente relacionada ao ( $E$ ) e inversamente relacionada à massa específica. Uma vez que essas propriedades são sensivelmente afetadas pela umidade, alterações dessa variável influenciam significativamente a propagação das ondas (CARRASCO e AZEVEDO JÚNIOR, 2003).

Bucur et al. (2002) descreveram que as madeiras de conífera, por apresentarem estruturas anatômicas contínuas e uniformes, favorecem ao aumento da velocidade das ondas quando comparada às folhosas. Segundo Oliveira e Sales (2006), a menor velocidade da onda encontrada para a madeira de pinus em relação à madeira de eucalipto pode ser explicada pela menor massa específica do pinus, ou seja, é mais porosa, o que favorece a menor velocidade de propagação da onda. Já as madeiras mais densas, no caso do eucalipto, são as que apresentam

maior teor de substância madeira, portanto, menores espaços vazios, propiciando maior velocidade de propagação das ondas.

Ballarin e Palma (2003), durante um estudo de determinação do módulo de elasticidade pelos métodos de ensaio ultrassom e método convencional destrutivo de compressão paralela as fibras da madeira de *Pinus taeda*, obteve valores médio de 14.865 MPa e 13.376 MPa, respectivamente. Os resultados obtidos utilizando a técnica ultrassom demonstraram que a técnica pode ser utilizada para caracterização mecânica.

Oliveira, Hellmeister e Tomazello (2005) avaliou as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliotti*, utilizando a técnica de ultrassom para o estudo das propriedades desses materiais. Os valores médios do módulo de elasticidade estático e dinâmico para madeira de *Pinus elliotti* foram de 13.246 MPa e 13.080 MPa, respectivamente. Já para madeira de *Eucalyptus grandis*, os valores médios encontrados foram 21.612 MPa para módulo de elasticidade estático e 20.501 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 dos materiais em estudo.

Ruy (2016) com a proposta de avaliar o módulo de elasticidade por meio de ensaios de ultrassom da madeira de *Eucalyptus cloeziana*, obteve valor médio de 24.247 MPa, valor próximo ao encontrado por Calil Junior e Brito (2010) através de método convencional de ensaios, indicando módulo de elasticidade de 24.660 MPa.

### **3.3.2.3 Stress wave timer**

Neste tipo de ensaio não destrutivo, são geradas ondas através de uma vibração produzida por impacto na peça em estudo. Mede-se a velocidade do som, cujo valor utilizado na determinação da constante dinâmica (C) (BODIG; JAYNE, 1958).

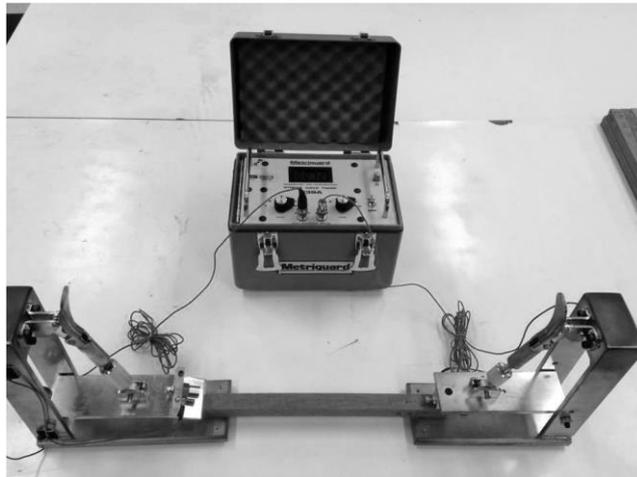
As técnicas de *stress wave timer* utilizam baixos movimentos moleculares de tensão para medir duas diferentes propriedades fundamentais dos materiais: a energia armazenada e a dissipação. A energia armazenada manifesta-se pela velocidade com a qual a onda percorre o material. Em constante, a taxa sob a qual a onda é atenuada é uma indicação de dissipação de energia (ROSS e PELLERIN, 1994).

Bodig e Jayne (1958), colocou como hipótese que estas propriedades são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento mecânico do material. Como uma consequência, seria possível estabelecer relações matemáticas entre as ondas de tensão e

as propriedades mecânicas estáticas do material, através das técnicas de análise de regressão estática.

Paula et al. (2016) realizou um estudo de ondas ultrassônicas do qual utilizou corpos de prova de madeira *Dipteryx odotara* com dimensões de 2 cm x 2 cm x 30 cm. O equipamento utilizado foi o da marca Metriguard, modelo 239A (Figura 3).

Figura 3 Equipamento *Stress Wave Timer* 239A.



Fonte: adaptado de Paula et al. (2016).

Os valores para módulo de elasticidade dinâmico encontrados no estudo foram de 26.242 MPa utilizando o ultrassom e 18.359 MPa utilizando o stress wave timer. Segundo o IPT (1989) o módulo de elasticidade da madeira de *Dipteryx odotara* é de 18.547 MPa, valor inferior ao encontrado nesse estudo e mais próximo ao obtido pelo stress wave.

#### 3.3.2.4 Espectrofotometria do infravermelho próximo (NIR)

A região espectral do infravermelho é usualmente em dividido em infravermelho próximo (NIR), infravermelho médio (MIR) e infravermelho distante (FIR). O método NIR tem como base a espectroscopia vibracional, tendo como princípio a exposição de várias amostras à radiação eletromagnética na região de comprimento de onda (780 a 2.500 mmz) para se obter os espectros de absorbâncias. A partir desse princípio pode ser realizada a correlação destes resultados com os obtidos em análises laboratoriais convencionais e desse modo gerar um modelo estatístico de forma a explicar a maioria das informações contidas nos espectros (WILLIAMS e NORRIS, 2001).

Por sua vez Ribeiro (2009), em estudo que utilizou técnicas não-destrutivas para caracterizar madeiras de *Pinus caribea* e *Eucalyptus grandis*, utilizou dentre as técnicas o Infravermelho Próximo. Para realizar seu trabalho o autor executou as análises laboratoriais de referência, para massa específica e para flexão estática e obteve correlações satisfatórias para todas as características

### 3.3.2.5 Vibração longitudinal e transversal

Metodologias não destrutivas de ensaios têm sido amplamente utilizadas na obtenção do módulo de elasticidade longitudinal em peças de madeira de dimensões estruturais, ressaltando-se o uso do ultrassom e da vibração transversal, enfatizando a simplicidade e eficiência do emprego de tais metodologias, justificadas pela possibilidade de uso da peça depois de ensaiada (ROSS et al., 1998; ERIKSON et al., 2000; OLIVEIRA e SALES, 2002).

Burdzik e Nkwera (2002) avaliaram os módulos de elasticidade longitudinal e transversal em vigas de madeira da espécie *Eucalyptus grandis* pelo método de vibração transversal de ondas. Os resultados demonstraram que o método proposto é empregável na determinação dos módulos de elasticidade, apresentando coerência nos resultados, quando comparados com as propriedades da madeira advindas de documento normativo.

Cossolino et al. (2011) realizaram ensaios para determinação do módulo de elasticidade do *Pinus oocarpa* utilizando ensaios de flexão estática e vibração transversal somente para peças com teores de umidade na faixa de 12% e não encontraram diferenças significativas nos valores de MOE determinados.

Targa et al. (2005) realizaram ensaios com peças dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e encontraram diferença entre os valores médios determinados pelos métodos da vibração transversal (FIGURA 4) e da flexão estática na ordem de 12% para as espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus grandis*, já para o *Eucalyptus saligna* a diferença foi igual a 28%. Zangiácomo (2003) trabalhando com madeiras tropicais (com teor de umidade igual a 12%) realizou ensaios para determinação do E pelos métodos da flexão estática e da vibração transversal em 81 peças de madeira e encontrou forte correlação, próxima de 1, entre os valores encontrados.

Figura 4 - Aparato geral utilizado no ensaio de vibração transversal, com detalhe do posicionamento do corpo de prova apoiado nos “quartos” e o microfone unidirecional para a captação da vibração.



Fonte: adaptado de Targas (2005).

### 3.4 Correlação digital de imagens (DIC)

Segundo Zhou et al. (2014), a Correlação Digital de Imagens (DIC) é uma técnica óptica sem contato para medição de deformação de toda a superfície do material. Dado um par de imagens capturadas antes e após a deformação, a técnica DIC extrai os deslocamentos da imagem, por meio da otimização da correlação entre as intensidades das localizações correspondentes

Segundo Silva et al. (2007), as imagens digitais são codificações, com um formato determinado, reconhecidas por um computador e que podem ser obtidas mediante uma câmera fotográfica digital. A imagem digital surgiu para satisfazer a necessidade de transmitir imagens entre pontos distantes, sendo que cada unidade da imagem é denominada de *pixel*, o qual é transformado em valores numéricos e depois em pulsos elétricos, posteriormente transmitidos.

Uma das primeiras aplicações da técnica de processamento de imagens foi o melhoramento de imagens digitalizadas para jornais, do qual eram enviadas por meio de cabo submarino de Londres a New York. A introdução do sistema Bartlane de transmissão de imagens via cabo no início dos anos 20 reduziu o tempo requerido de mais de uma semana para de três horas no transporte de imagens através do oceano Atlântico. Um equipamento especializado de impressão codificava as imagens para transmissão a cabo, as quais eram então reconstruídas no terminal receptor (GONZALEZ; WOODS, 2009).

Ainda segundo os autores Gonzalez & Woods (2009) melhoramentos nos métodos de processamento para transmissão de figuras digitais continuaram a ser feitos ao longo dos 35 anos que se seguiram. Entretanto, foi necessária a combinação do surgimento de computadores digitais de grande porte com o programa espacial para chamar atenção ao potencial dos conceitos de processamento de imagem. O emprego de técnicas de computação para o melhoramento de imagens produzidas por uma sonda espacial iniciou-se em 1964, quando imagens da Lua, transmitidas pelo satélite Ranger 7, foram processadas por um computador para corrigir vários tipos de distorção de imagem inerentes à câmera de televisão a bordo.

De 1964 até hoje, a área de processamento de imagens vem crescendo vigorosamente. Além de aplicações no programa espacial, técnicas de processamento de imagens digitais são atualmente utilizadas para resolver uma variedade de problemas nas diversas áreas da engenharia.

### **3.4.1 Conceitos fundamentais de correlação digital de imagens**

Diferentes de modelos convencionais, como a extensometria do qual as deformações são calculadas localmente segundo a direção em que se coloca o extensômetro (por exemplo, no estudo das propriedades de um material anisotrópico cujas propriedades físicas variam com a direção em que são medidas), a correlação digital de imagem é uma alternativa vantajosa, uma vez que analisa globalmente a deformação na superfície de um determinado material, sem necessitar de contato e com procedimentos mais acessíveis (ROSSI; BROGGIATO; PAPALINI, 2008).

O método DIC, assenta na análise de imagens consecutivas (obtidas antes e após a deformação de um objeto) através de um algoritmo de correlação. A imagem inicial é dividida em várias secções denominadas blocos ou *subsets* e esses blocos são procurados na imagem seguinte. Cada bloco é um conjunto de *pixels* e o objetivo do algoritmo é determinar a sua nova posição, procurando os valores de intensidades desses *pixels*. O algoritmo calcula o movimento que o bloco realizou de uma configuração para outra, dentro de uma área (que é a zona de procura do algoritmo) denominada Região de Interesse (ROI), obtendo assim os deslocamentos e, através destes, calcula posteriormente as deformações (BELEZA, 2017).

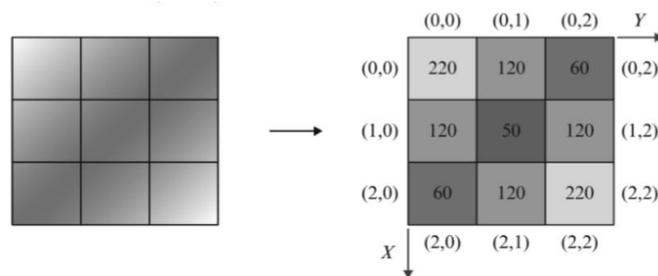
De acordo com Beleza (2017), para que não exista mais do que uma correspondência para um bloco, a superfície do objeto a analisar é preparada convenientemente ao aplicar sobre ela um padrão aleatório, *speckle*, de alto contraste. Este padrão pode ser facilmente aplicado

com tinta, o que torna a preparação do procedimento experimental relativamente simples. Além do mais, em alguns casos, poderá não ser necessária uma preparação da superfície do material se este já exibir estas propriedades, como por exemplo num material poroso.

Segundo Luo et al. (1993), aquisição de imagens pode ser feita com uma câmera digital relativamente comum, uma vez que com a tecnologia atual é possível obter uma câmera fotográfica com boa qualidade a um preço razoável. Também é utilizada iluminação do material durante a aquisição de imagens para garantir uma melhor precisão. O método DIC é capaz de fazer a medição de deformações no plano (DIC-2D) e fora do plano (DIC-3D), sendo que, a três dimensões é necessária mais do que uma câmara e consequente configuração e calibração

De acordo com Moreira (2015), as imagens digitais são a base do funcionamento do método DIC e para poderem ser utilizadas pelo algoritmo tem de haver uma discretização dos seus elementos unitários – os *pixels* (Figura 5). A cada *pixel* será então associada uma posição  $(x, y)$  e um valor de intensidade  $f(x, y)$ , considerando a imagem como se fosse uma função bidimensional. A ideia fundamental deste método é extrair de cada imagem a matriz de intensidade de um bloco de  $N \times N$  *pixels* e procurar essas intensidades na imagem seguinte.

Figura 5 – Exemplo de discretização das posições e das intensidades dos *pixels*



Fonte: adaptado de Moreira (2015)

As intensidades de cada *pixel* são definidas com base numa escala. Por exemplo, considerando uma imagem monocromática, numa escala representada por 8 bits existem 28 combinações possíveis de cores. Ou seja, a escala varia em níveis de cor cinza (*gray level*) de 0 (preto) a 255 (branco), bastando por isso uma matriz para a definir. Já num formato de imagem RGB (*Red-Green-Blue*), são necessárias três matrizes para definir a intensidade de um único *pixel*, sendo que cada uma delas define cada uma das três cores: vermelho, verde e azul. A combinação das três matrizes corresponde a uma intensidade que define uma cor (MOREIRA, 2015). A nível computacional é mais prático a utilização de imagens monocromáticas por exigir

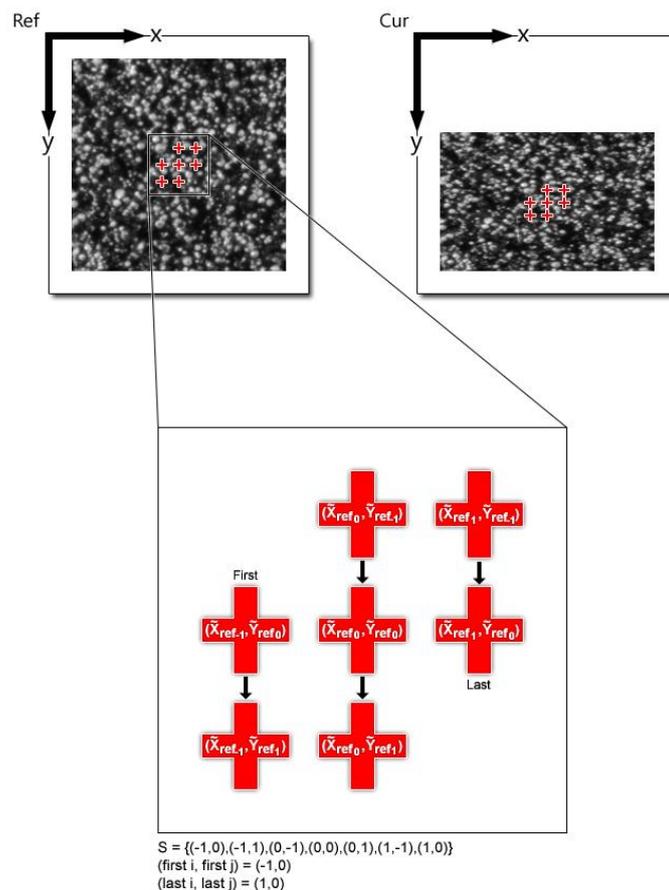
cálculos menos extensos. Por esta razão alguns *softwares* só aceitam como entrada imagens monocromáticas, sendo que outros fazem a conversão antes de iniciar a análise da imagem.

### 3.4.2 Princípios matemáticos e implementação computacional

O DIC faz a obtenção da correspondência entre os pontos na superfície do material pegando pequenas sub-regiões da imagem de referência, sem a aplicação de carregamento e determinando seus respectivos locais nas imagens capturadas durante os ensaios.

Os subconjuntos são essencialmente um grupo de pontos de coordenadas  $(x,y)$  sendo ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Coordenadas das sub-regiões são ilustradas em vermelho, contendo o ponto central. S representa o conjunto de coordenadas



Fonte: Antoniu (2015)

As coordenadas do subconjunto são mostradas como cruces vermelhas. A notação na parte inferior é usada em todo o restante deste documento. O subconjunto não precisa ser

quadrado, como mostrado acima; a forma pode ser arbitrária desde que contenha um ponto central.

A transformação dos pontos do subconjunto de referência inicial para a configuração atual é tipicamente restrita a uma transformação linear de primeira ordem, como mostrado nas Equações 4 e 5:

$$\bar{x}_{cur i} = x_{ref i} + u_{rc} + \frac{du}{dx_{rc}} (x_{ref i} - x_{ref c}) + \frac{du}{dy_{rc}} (y_{ref i} - y_{ref c}) \quad (4)$$

$$\bar{y}_{cur j} = y_{ref j} + v_{rc} + \frac{dv}{dx_{rc}} (x_{ref i} - x_{ref c}) + \frac{dv}{dy_{rc}} (y_{ref j} - y_{ref c}) \quad (5)$$

Em que (i, j) pertence ao conjunto S e,  $x_{ref i}$ ,  $y_{ref j}$  são coordenadas x e y de um ponto da sub-região da referência inicial;  $x_{ref c}$ ,  $-y_{ref c}$  são coordenadas x e y do centro da sub-região de referência inicial;  $\bar{x}_{cur i}$ ,  $\bar{y}_{cur j}$  são coordenadas x e y de um ponto final da sub-região deformado; (i, j) são índices utilizados para posição relativa dos pontos de sub-região, referente ao centro da sub-região; S é o conjunto que contém os pontos da sub-região; rc indica o deslocamento que vai da referência até atual sistema de coordenadas; u é a variável de deslocamento dos pontos da sub-região S referente ao eixo x; v é a variável de deslocamento dos pontos da sub-região S referente ao eixo y. Na Equação 6, representa-se a forma geral da deformação do vetor p (ANTONIU, 2015).

$$p = \left\{ u \ v \ \frac{du}{dx} \ \frac{du}{dy} \ \frac{dv}{dx} \ \frac{dv}{dy} \right\}^T \quad (6)$$

Em que T é a transposta do vetor p. As Equações 4 e 5 podem ser escritas na forma de matriz (Equação 7).

$$\varepsilon_{ref c} + w(\Delta \varepsilon_{ref}; p_{rc}) = \begin{Bmatrix} T \\ x_{ref c} \\ T \\ y_{ref c} \\ 1 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 + \frac{du}{dx_{rc}} & \frac{du}{dy_{rc}} & u_{rc} \\ \frac{dv}{dx_{rc}} & 1 + \frac{dv}{dy_{rc}} & v_{rc} \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} * \begin{Bmatrix} T \\ \Delta x_{ref} \\ T \\ \Delta y_{ref} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Em que,  $\varepsilon$  é o vetor que contém as coordenadas x e y dos pontos das sub-regiões; dx e dy são as distâncias entre um ponto e o centro da sub-região.

Para efeitos de processamento, considera-se a sub-região de referência deformando dentro da configuração de referência, a qual é representada pelas Equações 8 e 9.

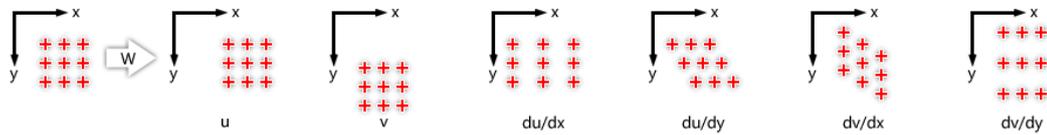
$$\bar{x}_{ref i} = x_{ref i} + u_{rr} + \frac{du}{dx_{rr}}(x_{ref i} - x_{ref c}) + \frac{du}{dy_{rr}}(y_{ref j} - y_{ref c}) \quad (8)$$

$$\bar{x}_{ref j} = x_{ref j} + v_{rr} + \frac{dv}{dx_{rr}}(x_{ref i} - x_{ref c}) + \frac{dv}{dy_{rr}}(y_{ref j} - y_{ref c}) \quad (9)$$

sendo  $(i, j)$  pertencente ao conjunto  $S$  e,  $\bar{x}_{ref i}, \bar{x}_{ref j}$  são coordenadas  $x$  e  $y$  de um ponto da sub-região referencial final;  $rr$  representa o deslocamento da referência do sistema de coordenadas para o sistema de coordenadas de referência.

O propósito é identificar o melhor  $P_{rc}$  (deformação que vai da referência até a atual) quando a deformação em  $P_{rr}$  é 0. Um dos métodos para identificar é o método de composição inversa, ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Deslocamentos lineares para as coordenadas das sub-regiões.



Fonte: adaptados de Antonius (2015).

### 3.4.3 Critérios de correlação

Para estabelecer os parâmetros de comparação entre a sub-região de referência final e a sub-região atual final, estes podem ser comparados pelos valores de escala de cinza nos pontos de sub-região de referência finais com os valores de escala de cinza nos pontos de sub-regiões atual finais.

Os parâmetros utilizados no DIC são:

1. Critério de correlação cruzada normalizada, representado pela Equação 10.

$$C_{cc} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{ref i}, \tilde{y}_{ref j}) - fm)(g(\tilde{x}_{cur i}, \tilde{y}_{cur j}) - gm)}{\sqrt{\sum_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref i}, \tilde{y}_{ref j}) - fm]^2 \sum_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{cur i}, \tilde{y}_{cur j}) - gm]^2}} \quad (10)$$

2. Critério normalizado de mínimos quadrados, representado pela Equação 11.

$$C_{LS} = \Sigma_{(i,j) \in S} \left[ \frac{f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - fm}{\sqrt{\Sigma_{(i,j) \in S} [f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}) - fm]^2}} - \frac{g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - gm}{\sqrt{\Sigma_{(i,j) \in S} [g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}) - gm]^2}} \right]^2 \quad (11)$$

Onde,  $f$  e  $g$  são funções da imagem de referência e da imagem atual respectivamente, que representa o valor da escala de cinza correspondente a cada ponto  $(x, y)$ ;  $fm$ ,  $gm$  são valores médios de escala de cinza da sub-região de referência final e sub-região atual (Equações 12 e 13). Logo,

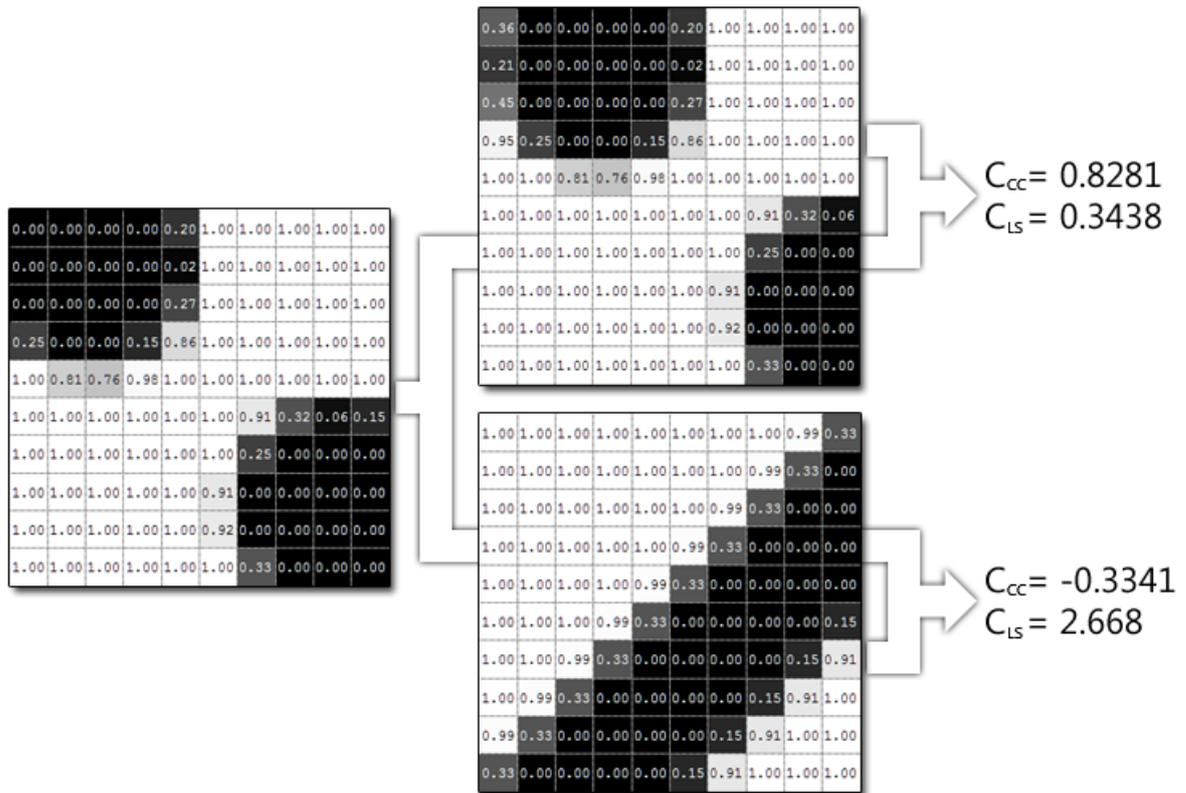
$$fm = \frac{\Sigma_{(i,j) \in S} (f(\tilde{x}_{ref\ i}, \tilde{y}_{ref\ j}))}{n(S)} \quad (12)$$

$$gm = \frac{\Sigma_{(i,j) \in S} (g(\tilde{x}_{cur\ i}, \tilde{y}_{cur\ j}))}{n(S)} \quad (13)$$

sendo  $n(S)$  o número de elementos em  $S$ .

A divisão da quantidade do denominador permite a invariância referente aos valores de escala de cinza. O resultado é um critério de correlação que são invariantes as mudanças nos valores de escala de cinza. A correlação se calcula entre pares de sub-regiões pertencentes à imagem de referência e à imagem deformada, procurando um valor mais próximo da deformação. Um exemplo prático do uso dos critérios pode ser ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Correlação entre matrizes



Fonte: Antoniu (2015).

Os valores de escala de cinza (FIGURA 8) na parte esquerda se comparam com as duas imagens à direita. Os critérios de correlação mostram que os valores de escala de cinza da direita são semelhantes à sub-região da imagem superior da esquerda, onde  $C_{cc}$  está perto de 1 e  $C_{ls}$  está perto de 0.

Wu et al. (2015) utilizaram a técnica DIC, baseada no modelo Newton Raphson em peças de turbinas eólicas e concluíram que a técnica por não ser destrutiva e não invasiva fornece assistência importante para o monitoramento de condições e a detecção de falhas em peças de turbinas eólicas em etapa inicial.

Chousal e Moura (2006) validaram a medição de deformações por DIC em compósitos laminados de matriz polimérica, sendo que os resultados apresentaram boa concordância com as medições realizadas por extensometria relativamente às deformações longitudinais em ensaios de tração de corpos de prova ( $0^\circ$ ) e ( $90^\circ$ ), do qual concluíram que a aplicabilidade do método à realização de medições de deslocamentos e deformações nas mais variadas situações, nomeadamente em peças de compósitos de matriz polimérica em serviço.

Icardi (2003) usou a correlação de imagem para medir o deslocamento ao longo da espessura em materiais compósitos, e constatou que a técnica é adequada para medir com a precisão pretendida para as suas experiências.

A técnica DIC está se tornando cada vez mais uma ferramenta analítica para aplicações mecânicas e estruturais, em razão do baixo custo e fácil disponibilidade de equipamentos e *software* (XIE; KANG, 2015).

### 3.5 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)

A técnica conhecida como velocimetria por imagem de partículas, também amplamente conhecida por sua terminologia em inglês *particle image velocimetry*, ou mesmo pela sigla que representa tal terminologia, PIV, vem sendo muito empregada em áreas como a da medição de fluxo de partículas (RAFFEL et al., 2007).

A técnica foi originalmente desenvolvida na área experimental da mecânica dos fluidos (ADRIAN, 1991). Foi inicialmente implementada usando fotografias duplas instantâneas de um fluxo de tal forma que cada partícula possui um par de imagens. Em análises PIV a fotografia é dividida em uma malha de áreas de interrogação. O vetor de deslocamento em um dado intervalo de tempo é encontrado localizando o pico da função de auto correlação de cada uma dessas áreas de interrogação. O pico de uma função de auto correlação indica que as duas imagens de cada partícula capturadas estão se sobrepondo uma a outra. A correlação do *offset* é igual ao vetor de deslocamento.

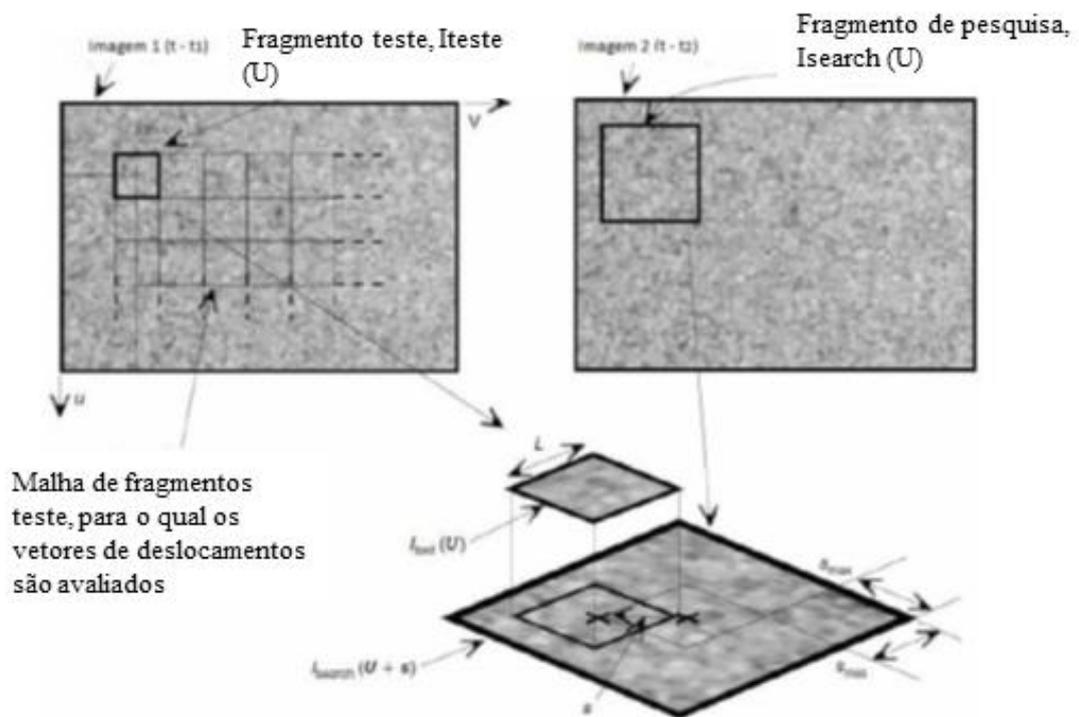
Segundo Raffel et al. (2007), na maioria das aplicações, partículas traçadoras, que devem ser adicionadas ao escoamento ou demarcações em um corpo sólido, são iluminadas e seu posicionamento é registrado entre curtos intervalos de tempo. Os registros de imagens, através de câmeras convencionais ou digitais, podem ocorrer em um único frame ou numa sequência de frames. O intervalo de tempo de exposição na aquisição da imagem deve ser pequeno o suficiente para congelar o movimento das partículas e evitar o efeito "*blurring*" - excesso de exposição em escoamentos rápidos.

Para a avaliação do campo de velocidades, um par de imagens PIV é dividido em pequenas subáreas chamadas de "áreas de interrogação". O vetor 'deslocamento local' para as imagens das partículas é determinado para cada área de interrogação por meio de métodos de correlação, assume-se que todas as partículas dentro de uma área de interrogação se movam de

forma relativamente homogênea entre as áreas de interrogação da primeira e segunda imagem (RAFFEL et al, 2007).

O processamento das imagens conduzido em uma análise de PIV consiste em comparar imagens digitais capturadas em diferentes instantes de tempo, de forma a medir o deslocamento entre um par de imagens digitais como é mostrado na Figura 9. A imagem é dividida em uma malha de áreas de interrogação, onde área de interrogação  $I_{test}(U)$  consiste de uma amostra da matriz da imagem  $I(U)$ , de tamanho  $L \times L$  pixels.

Figura 9 - Manipulação das imagens durante a análise PIV

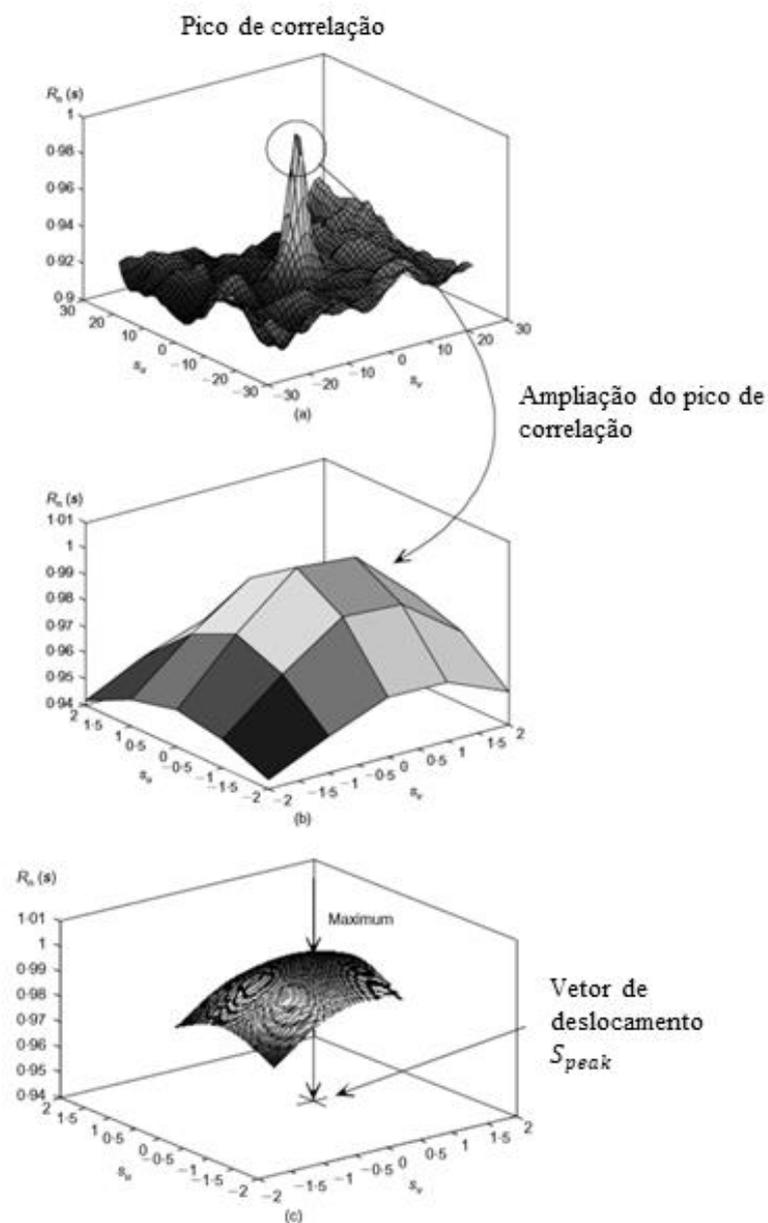


Fonte: adaptado de White et al. 2003.

Para encontrar o deslocamento das áreas de interrogação entre duas imagens, um fragmento de pesquisa  $I_{search}(U+s)$  é extraído da segunda imagem e é estendido até uma distância  $S_{máx}$ , nas direções  $u$  e  $v$ , definindo a zona que o fragmento será pesquisado. Posteriormente é avaliada a correlação cruzada de  $I(U)$  entre as matrizes  $I_{teste}(U)$  e  $I_{search}(U+s)$ . O plano resultante da correlação normalizada é chamado de  $Rn(s)$ , e indica o grau de coincidência entre a área de interrogação e área de busca sobre o grau de deslocamento no domínio de  $(s)$ .

O pico mais alto no plano da correlação cruzada normalizada,  $R_n(s)$  (FIGURA 10), indica o vetor de deslocamento da área de interrogação, chamado de  $(s)$  e calculado tomando como origem o centro da área de interrogação ( $u_i$  e  $v_i$ ) da Imagem 1 somados aos deslocamentos médios calculados ( $u_i+D_u$  e  $v_i+D_v$ ).

Figura 10 - Avaliação do vetor de deslocamento no plano de correlação  $R_n(s)$



Fonte: adaptado de White et al. (2003)

O plano da correlação normalizada  $Rn(s)$  é avaliado sobre uma resolução de *pixel*. Por esta razão se executa um ajuste através de uma função de interpolação cúbica ou gaussiana sobre a região em torno do pico. Ao realizar este processo o vetor de deslocamento passa a ter uma resolução de *pixel* para uma de *sub-pixel* produzindo uma resolução do sistema de 0,005 *pixels* ou mais de acordo com a função de interpolação alcançando assim uma maior precisão no valor de deslocamento.

Esse procedimento se repete para cada área de interrogação da malha definida inicialmente, gerando um campo de vetores a qual mostra o campo de deslocamentos no intervalo das duas imagens. Esse processo pode se repetir para várias imagens quantificando um campo de deslocamentos de um processo a ser estudado em um intervalo de tempo definido. Para reduzir o requisito computacional, as operações de correlação são realizadas no domínio da frequência ao tomar a transformada rápida de Fourier (FFT) de cada área e seguindo o teorema de convolução.

A técnica velocimetria por imagens de partículas vem se desenvolvendo substancialmente a nível mundial, sendo que já existem sistemas amplamente consolidados (SZELIGA; ROMA, 2009). Um exemplo de aplicação foi realizado por Urban e Mungal (2001) que aplicaram a técnica PIV em túnel de vento para obtenção de campos de velocidades bidimensionais em escoamento de alta velocidade. Yang e Rockweel (2002) estudaram as interações de ondas na superfície livre com um cilindro vertical. Smith e Glazer (2002) investigaram o escoamento de jatos de ar através de orifícios empregando um sistema PIV com câmeras de alta resolução (10 MP) e exposição de 1 $\mu$ s.

Considerada como uma técnica de medição de velocidade, PIV foi desenvolvida originalmente para mecânica dos fluidos, porém pode-se ver algumas aplicações em elementos sólidos, onde os vetores, originalmente adotadas para medir a velocidade das partículas em um líquido, são usadas para medir o deslocamento dos pontos de referência (MAGALHÃES; BRAGA JUNIOR; BARBOSA, 2015).

Hajjalilue-Bonab et al. (2011) investigaram a técnica de PIV para padrões tridimensionais (3D) de deformação do solo, obtendo as deformações que ocorreram ao longo do carregamento. Mais recentemente, a capacidade da técnica de PIV em investigações de comportamento da resistência de concreto com fibras de polímeros adicionadas em sua composição, foi demonstrada pelos autores (HOSSEINI E MOSTOFINEJAD, 2013).

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.

Ao investigar o fluxo de partículas de Politeftalato de 3 mm de diâmetro em um silo com tremonha de 15° com a vertical, Ostendorf e Schwedes (2005) utilizaram a técnica PIV. Segundo os autores, foi possível definir o modelo de fluxo formado e os perfis de velocidade assumidos.

Ao aplicar a mesma técnica PIV, Slominski, Niedostatkiewicz e Tejchman (2007), puderam medir a deformação sofrida no produto, em função da rugosidade da parede do silo durante o descarregamento enquanto Sielamowicz, Blonski e Kowalewski (2005) obtiveram uma sequência de 315 imagens do descarregamento de sementes de amaranto em que foi observada a evolução de um tipo intermediário de fluxo, o fluxo misto, durante a descarga por gravidade.

Kapogianni e Sakellariou (2017), em um estudo sobre a avaliação de taludes em diferentes situações, concluiu que as técnicas de análise de imagem, como PIV e DIC, podem fornecer informações úteis sobre o comportamento geotécnico dos modelos e os métodos reais utilizados e podem ser complementares entre si. Além dos modelos de taludes, as técnicas apresentadas pelo autor podem potencialmente ser utilizadas em outros tipos de estruturas geotécnicas submetidas a cargas sísmicas e / ou centrífugas.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

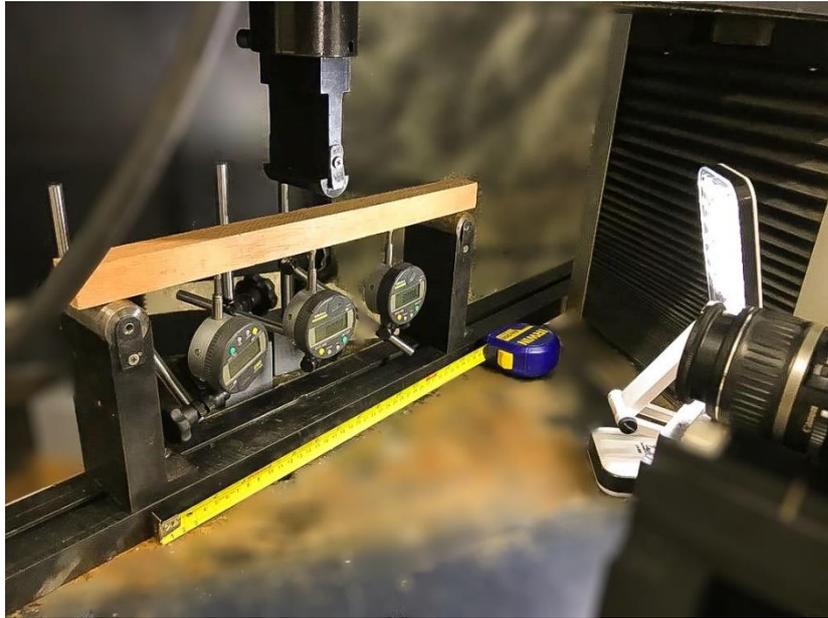
Os ensaios necessários para a realização deste estudo foram feitos no Laboratório de Resistência dos Materiais do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, situada na cidade de Lavras, Minas Gerais.

Os ensaios de flexão estática foram realizados em máquina universal de ensaios (AROTEC®) com capacidade de carga de 300 kN. Para os ensaios foram utilizados 60 corpos de prova, sendo 30 de madeira *Pinus oocarpa* e 30 de madeira *Eucalyptus grandis*. A confecção de todas os corpos de prova ocorreu na empresa especializada em estruturas de madeira RENC situada no município de Lavras – Minas Gerais, de acordo com os padrões presentes na norma ASTM D143 (ASTM, 1994).

Para os ensaios, foram utilizados uma câmera fotográfica digital profissional marca CANON EOS Rebel t3, jogo de lentes para ajuste de foco e zoom, carimbo para a marcação dos corpos de prova, paquímetro, luminária e a Máquina Universal de Ensaios. Os corpos de prova para os ensaios de flexão estática foram confeccionados conforme descrito pela norma ASTM D143 (ASTM, 1994), com as dimensões de 41 x 2,5 x 2,5 cm (comprimento, largura e espessura).

Inicialmente foram posicionados três relógios comparadores, um no centro do corpo de prova e outros dois na metade da distância entre os apoios e o ponto de aplicação das cargas, a câmera profissional digital (CANON EOS Rebel t3) foi posicionada perpendicularmente a superfície das amostras, com 30 centímetros de distância (Figura 11). A captura das imagens foi realizada com o auxílio de um controle remoto para evitar qualquer contato direto com a câmera fotográfica, não alterando assim sua posição.

Figura 11 – Configuração experimental



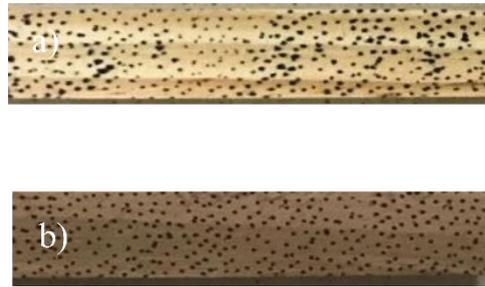
Fonte: Do autor (2018).

O tempo médio de duração de cada ensaio de flexão estática para corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* foi de 600 e 400 segundos, respectivamente, com velocidade de carregamento de  $1,3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  de acordo com a norma ASTM D143 (ASTM, 1994).

Antes de iniciar os ensaios foram feitas marcações ao longo da superfície de interesse do corpo de prova. Essas marcações são importantes para que durante o processamento das imagens pelos métodos PIV e DIC, os algoritmos possam identificar as regiões de interesse para que possa ser medido os deslocamentos dessas regiões, denominadas de janelas de interrogação.

Em cada janela de interrogação, os pares de imagens de partículas são procurados, no caso ideal, as imagens de partículas das duas imagens devem combinar perfeitamente. No presente trabalho a distribuição adotada para os marcadores foi a distribuição aleatória, com uma densidade de pontos igual a  $8,5 \text{ pontos} \cdot \text{cm}^{-2}$ . O diâmetro médio dos pontos foi de 2 mm, conforme é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Corpos de prova com marcadores aleatórios



Legenda: a) *Eucalyptus grandis* b) *Pinus oocarpa*

Fonte: Do autor (2018).

Para a aplicação das técnicas PIV e DIC, a primeira imagem foi capturada antes do início do carregamento ( $t=0$ ,  $d=0$ ) e as demais foram capturadas conforme intervalo de tempo preestabelecido de 30 segundos. Assim, a primeira imagem ( $t=0$ ,  $d=0$ ) serve como parâmetro de comparação para as imagens subsequentes. As técnicas PIV e DIC foram realizadas concomitante ao ensaio de flexão estática.

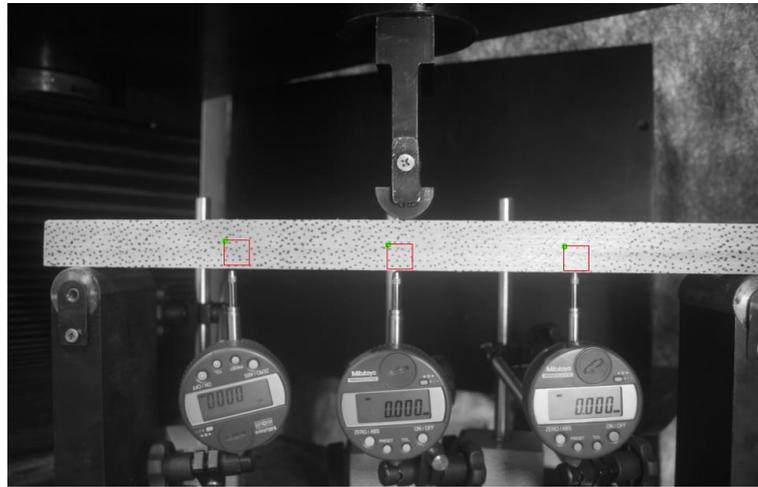
Posteriormente aos ensaios, as imagens capturadas foram processadas em um *software* de tratamento de imagens, *Image J*. Conforme metodologia adotada por Pereira (2017), as imagens tiveram seu tamanho reduzido para 25% do tamanho original (3888 x 2592 *pixels* para 972 x 948 *pixels*) e também cada imagem foi convertida para 8 *bits* na escala de cinza. Todas essas conversões tiveram como objetivo reduzir o tamanho da imagem, para que o tempo de processamento das imagens fosse menor.

Durante os ensaios, a máquina universal de ensaios, registra sensivelmente 4 entradas por 60 milésimos de segundos de parâmetros como: tempo, força, posição da mesa e deformação. Para um ensaio de aproximadamente 7 minutos, a máquina registra cerca de 7500 dados por cada parâmetro, ao passo que através da análise das imagens capturadas, se obtêm cerca de 15 dados (no caso de captura de imagem de 30 em 30 segundos).

#### 4.1 Processamento das imagens nos algoritmos PIV e DIC

Posteriormente à realização dos ensaios, as imagens foram processadas nos algoritmos. Esse procedimento visa os cálculos dos deslocamentos de janelas de interrogação posicionadas na imagem sem carregamento em relação às fotos subsequentes, conforme é apresentado na Figura 13.

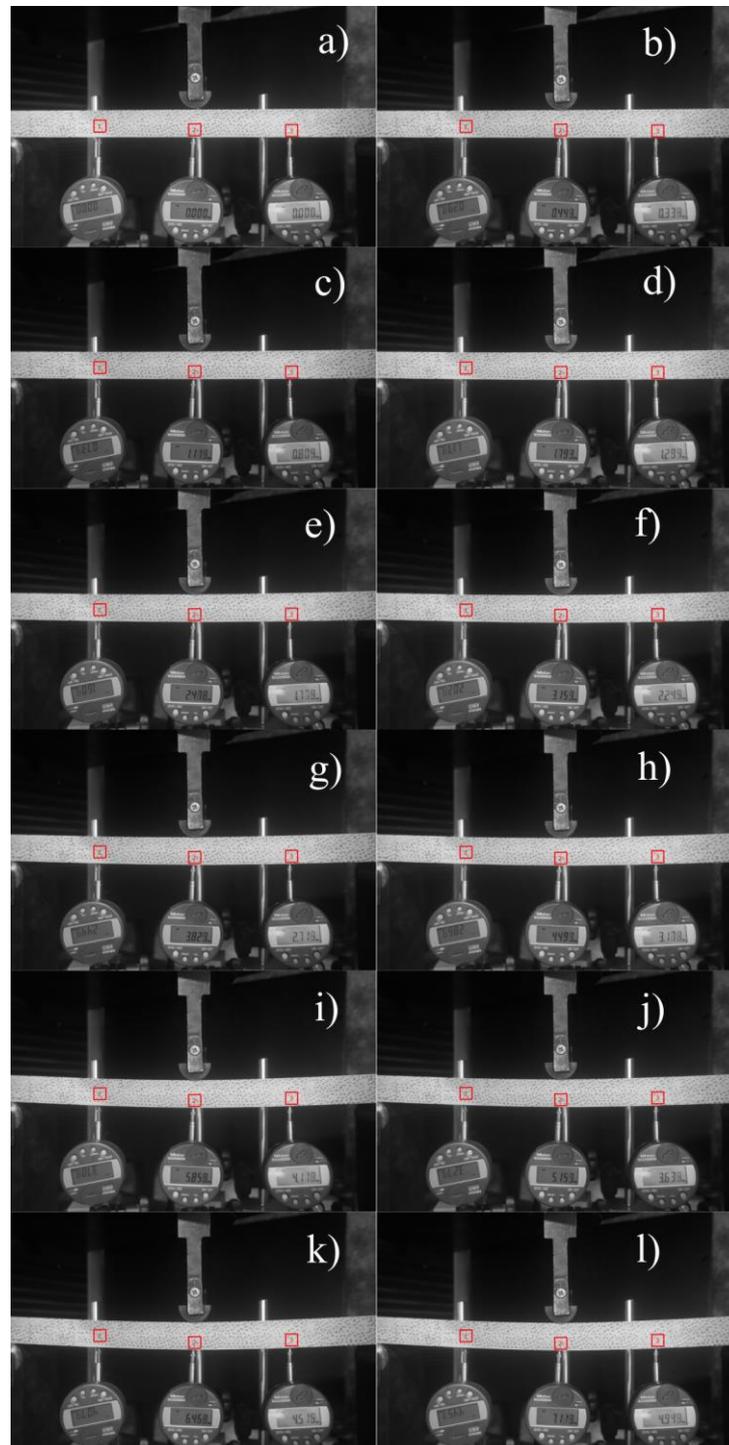
Figura 13 – Seleção das janelas de interrogação no *pivmake-gui*



Fonte: Do autor (2018).

O processo completo consiste em subdividir a imagem em células de interrogação; calcular o campo de intensidade no tempo de  $t+\Delta t$  para uma célula de interrogação; calcular a correlação entre imagens a partir dos campos de intensidade e repetir o processo para cada célula de interrogação. É então iniciado o ensaio são capturadas as imagens em um intervalo regular de tempo, a cada 30 segundos, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Sequência de capturas de imagens durante ensaio de flexão estática.

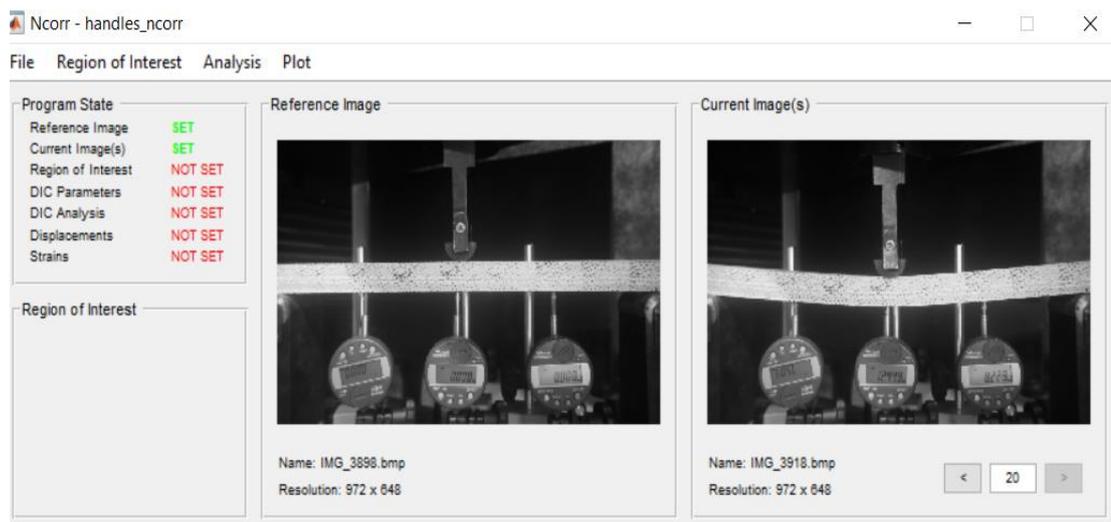


Legenda - a) imagem de referência; b) imagem no instante de 30s c) imagem no instante de 60s d) imagem no instante de 90s e) imagem no instante de 120s f) imagem no instante de 150s g) imagem no instante de 180s h) imagem no instante de 210s i) imagem no instante de 240s j) imagem no instante de 270s k) imagem no instante de 300s l) imagem no instante de 330s

Fonte: Do autor (2018).

Com o objetivo de processar todas imagens pela técnica DIC, foi utilizado o *software* Matlab®. Este processo utiliza um programa desenvolvido pela Ncorr, que tem como objetivo obter o deslocamento em cada uma das regiões das imagens em estudo, por meio da comparação das imagens coletadas (após aplicação dos carregamentos) com as imagens de referência respectivamente como é apresentado pela Figura 15.

Figura 15 – Janela de seleção das imagens pelo programa ncorr.



Fonte: Do autor (2018).

Para a estimativa do deslocamento em cada região, as imagens foram divididas em conjuntos diferentes de forma uniforme, geralmente quadrada, denominada por sub-região. Cada sub-região foi processada para calcular o valor médio da escala de cinza, existente em cada uma delas. Para o processo de correlação da imagem deformada, uma área de análise foi definida, a qual é indicada pelo número de *pixels* em que os centros das sub-regiões se sobrepõem.

Para avaliar cada uma das sub-regiões da imagem de referência e a imagem deformada, um critério de correlação já existente na biblioteca do programa *Ncorr*® v2.0 foi utilizado para a execução dos cálculos.

## 4.2 Análise estatística

Após a comparação dos resultados obtidos pelo método convencional, relógios comparadores (RC), e pelas técnicas DIC e PIV houve-se a necessidade de uma verificação

estatística dos valores encontrados pelas metodologias em estudo. Optou-se em realizar a análise de variância (ANOVA), por ser um procedimento estatístico que permite comparar os três métodos em estudos, DIC, PIV e método convencional (RC).

Procedeu-se a análise de variância, comparando-se a técnica convencional (RC) e as técnicas DIC e PIV, aplicando-se o teste  $F$  com nível de significância de 5%, e partindo do pressuposto de que as médias de deformação são estatisticamente iguais ao nível de 5% de confiança, formulando assim a hipótese:

$H_0$ : as médias dos métodos são iguais;

$H_1$ : ao menos uma das médias dos métodos são diferentes.

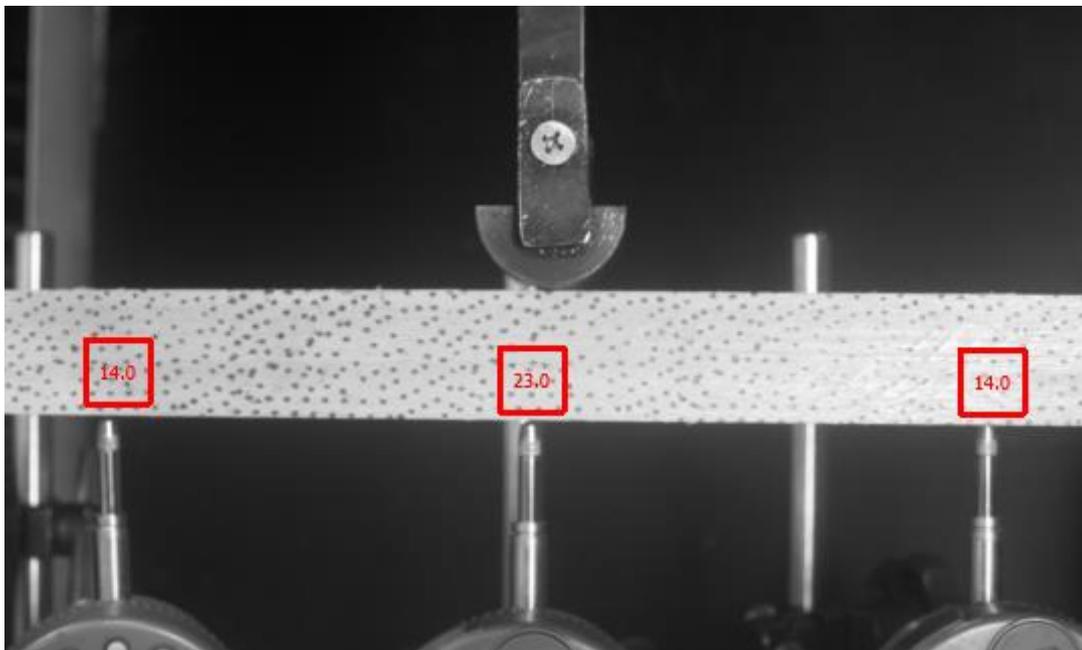
Sendo chamado de hipótese  $H_0$  de hipótese nula, e  $H_1$  de hipótese alternativa. A análise de variância detecta se existe diferença entre os valores médios obtidos entre os métodos; se rejeita a Hipótese nula, é necessário aplicar o teste *Scott Knott*, ao nível de 5% de significância, para identificar qual método apresentou diferença entre os demais métodos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Deformações obtidas pelo método PIV

Na figura 16, são ilustrados os resultados das deformações ocorridas nas três regiões de interesse, região esquerda, região central e região direita, de um corpo de prova de *Eucalyptus Grandis*. observa-se os valores de deformação final em *pixel*, em cada uma das janelas de interrogação sendo que o mesmo procedimento se repetiu para os demais corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*.

Figura 16 – Deslocamentos finais nas três regiões de interesse.



Fonte: o autor (2018).

Souza (2014), durante um estudo sobre deformações em madeira de *Hymenolobium sericium* e *Eucalyptus sp*, observou que os resultados obtidos pela técnica PIV podem ser aplicados com eficiência no estudo de deformação de sólidos, não havendo assim perda de correlação durante os ensaios.

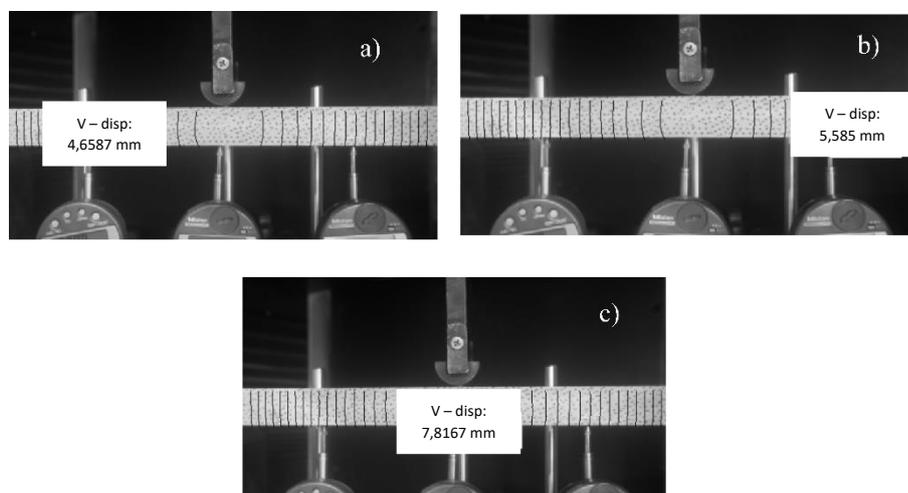
Em situação semelhante, Pereira (2014) observou que próximo ou após à ruptura da amostra, a técnica PIV associada ao *sunset laser* apresentou perda total de correlação, não configurando assim respostas adequadas em situações de maiores deformações.

Em contrapartida Pereira (2017), durante um estudo de análise das deformações e da elasticidade em madeiras, verificou que não houve perda de correlação devido ao estudo detalhado dos parâmetros da técnica PIV feito pelo autor. O mesmo ocorreu no presente estudo, não havendo perda de correlação, devido as melhorias que ocorreram no algoritmo da técnica PIV.

## 5.2 Deformações obtidas pelo método DIC

Na figura 17, são apresentados os resultados dos deslocamentos ocorridas nas três regiões de interesse, região esquerda, região central e região direita, de um corpo de prova de *eucalyptus grandis*. Observa-se os valores de deformação final em milímetros, diferente do método PIV, a conversão do deslocamento de *pixel* para milímetros no algoritmo DIC, ocorre antes de iniciar o processamento das imagens, o mesmo procedimento se repetiu para os demais corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*.

Figura 17 – Deslocamentos ocorridos nas regiões de interesse pelo método DIC.



Legenda - a) deslocamento a esquerda 4,6587mm, carga de 2,97kN; b) deslocamento a direita de 5,585 mm, carga de 2,97 kN; c) deslocamento central de 7,816, carga de 2,97 kN.

Fonte: Do autor (2018).

A configuração experimental proposta por Picoy (2016) mostrou-se satisfatória, podendo ser aplicado para medir deslocamentos de vigas (Aço A36) em balanço baseado na técnica DIC. Foram encontrados pela autora valores de deformações para a técnica DIC e método analítico de 1,2 mm e 0,9 mm, respectivamente, sendo assim, obteve-se uma diferença

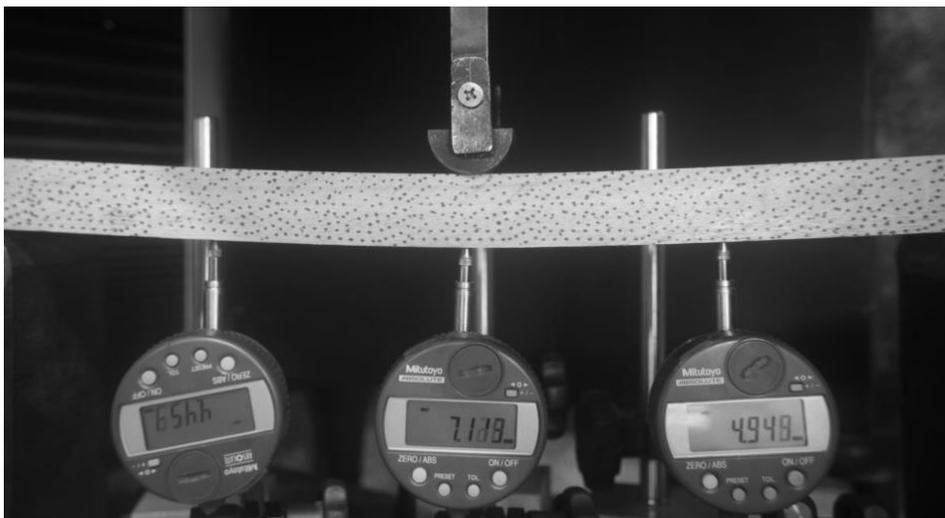
de aproximadamente 0.3 milímetros, entre os resultados teóricos (Teoria de Elasticidade) com a DIC e ambos seguem uma linearidade.

Resultados semelhantes foram obtidos por Chousal e Moura (2006), que apresentaram boa concordância com as medições realizadas por extensometria, concluindo que a aplicabilidade do método DIC à realização de medições de deslocamentos e deformações nas mais variadas situações, apresentaram resultados precisos. O mesmo ocorreu no presente estudo, não havendo perda de correlação, quando comparado ao método convencional, apresentando igualdade estatística ao nível de 5% de probabilidade.

### 5.3 Comparação entre os métodos DIC, PIV e método convencional

Após a etapa de processamento dos dados obtidos em cada ensaio de DIC e PIV, os resultados dos métodos em estudo foram comparados com os resultados obtidos pelo método convencional, dos relógios comparadores (RC), do qual foi tomado como o valor real, como é ilustrado na Figura 18. Durante os ensaios de flexão estática foi possível registrar a deformação encontra a cada 30 segundos, pelos três relógios comparadores instalados nas regiões de interesse, como é apresentado na Figura 18.

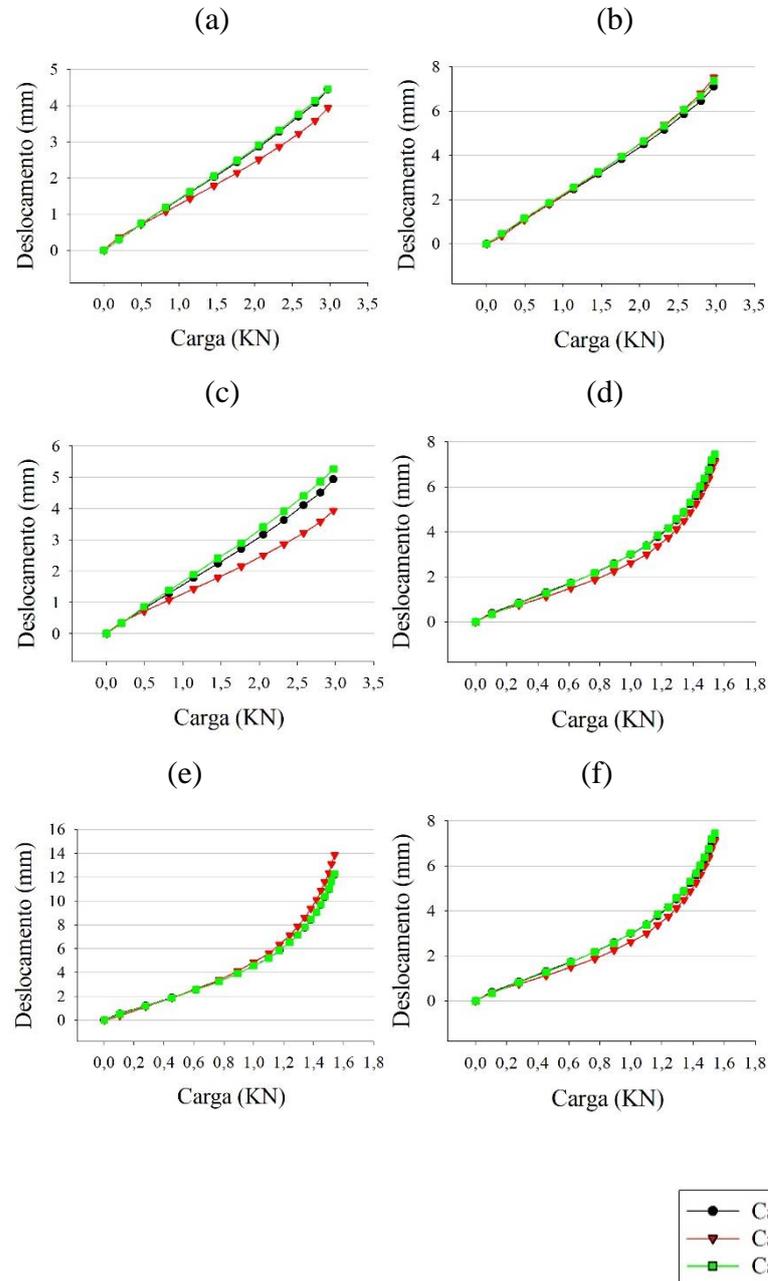
Figura 18 – Relógios comparadores posicionados nas três regiões de interesse.



Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 19, são apresentados os gráficos comparando os métodos DIC, PIV e RC, ao longo do carregamento aplicado em um corpo de prova de *Eucalyptus grandis* e um corpo de prova de *Pinus oocarpa*.

Figura 19- Comparação dos valores de deslocamentos entre os métodos RC, PIV e DIC



Legenda: a) Corpo de prova *Eucalyptus grandis*, região esquerda. b) Corpo de prova *Eucalyptus grandis*, região centro. c) Corpo de prova *Eucalyptus grandis*, região direita. a) Corpo de prova *Pinus oocarpa*, região esquerda. b) Corpo de prova *Pinus oocarpa*, região central. c) Corpo de prova *Pinus oocarpa*, região direita.

Fonte: Do autor (2018).

De forma geral, as curvas de deslocamento-carregamentos obtidas pelos resultados dos valores de deformações das técnicas DIC e PIV oferecem uma boa aproximação às obtidas pelo método convencional.

Rodrigues (2015), durante um estudo de deformações do aço A36 submetidos a ensaio de flambagem, obteve valores de deformações estatisticamente iguais pelos métodos PIV e método dos elementos finitos, 1,6 mm.

Em situação semelhante a este trabalho, Pereira (2017) observou 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.

A análise de variância e o teste *Scott Knott* apresentados na Tabela 1, permitiu analisar cada região de interesse, para as médias dos corpos de prova das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*. Nota-se na Tabela 1 que os coeficientes de variação encontrados ficaram dentro dos limites aceitáveis, ou muito próximos, para ensaios mecânicos, De acordo com a Norma Brasileira NBR 7190 – Projetos em Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997), para as resistências a esforços normais, admite-se um coeficiente de variação de 18% e para as resistências a esforços tangenciais um coeficiente de variação de 28%.

Tabela 1 – Análise de variância e teste *Scott Knott* para comparação das deformações, entre os métodos DIC, PIV e relógios comparadores ao nível de significância de 5%.

Material	Região de análise	Métodos	Análise de variâncias entre os métodos			Média deslocamento (mm)	Teste Scott Knott**
			cv (%)	Fc	Pr>Fc*		
<i>Eucalyptus Grandis</i>	Esquerda	PIV	19,24	3,919	0,0235*	4,0989	a1
		DIC				4,7076	a2
		RC				4,4863	a2
	Centro	PIV	15,56	3,085	0,0508	7,9249	b1
		DIC				7,4019	b1
		RC				7,1988	b1
	Direita	PIV	14,69	13,597	0,0000*	4,1463	c1
		DIC				5,0607	c2
		RC				4,8453	c2
<i>Pinus oocarpa</i>	Esquerda	PIV	8,38	1,528	0,2229	7,3142	d1
		DIC				7,5937	d1
		RC				7,4990	d1
	Centro	PIV	8,83	18,517	0,0000*	14,2875	e1
		DIC				12,8683	e2
		RC				12,5626	e2
	Direita	PIV	8,85	10,509	0,0001*	7,3367	f1
		DIC				8,1498	f2
		RC				7,8361	f2

\* Teste F significativo ao nível de 5% de significância.

\*\* Teste de *Scott Knott*: médias seguidas de mesma letra e número, correspondem a métodos estatisticamente iguais. Seguidas por letras e números diferentes, correspondem a métodos estatisticamente diferentes ao nível de significância de 5%.

Os resultados da análise de variância e teste *Scott Knott* demonstram que para a técnica DIC, aplicada nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* e para as três regiões de análise, as amostras tiveram a hipótese nula aceita, ou seja, os valores apresentaram igualdade estatística com o método convencional dos relógios comparadores, ao nível de significância de 5%.

A técnica PIV também apresentou regiões de análise com hipótese nula aceitas, sendo na madeira *Eucalyptus grandis* na região “centro” e na madeira de *Pinus oocarpa* na região “esquerda”.

A técnica DIC foi capaz de apresentar melhores resultados em comparação com a técnica PIV, sendo que a técnica DIC já é uma metodologia de ensaios de deformações para sólidos consagrada, diferente da técnica PIV que foi desenvolvida inicialmente para o campo dos gases e fluídos. Sendo necessário assim, estudos para melhorias do algoritmo e uma melhor escolha dos parâmetros de entrada no algoritmo PIV, como o tamanho da janela de interrogação, passo de busca (*step size*) e limiar de semelhança (*Threshold*).

#### **5.4 Módulo de elasticidade**

Após a realização dos ensaios de flexão estática, foram obtidos os valores dos deslocamentos para os corpos de prova de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*. Cada corpo de prova gerou três conjuntos de dados contendo as deformações ao decorrer do ensaio. Partindo dos valores de deformações gerados pelos relógios comparadores, PIV e DIC, foi possível calcular o módulo de elasticidade (E) para cada um dos métodos.

A Tabela 2, apresenta os resultados médios obtidos pelos três métodos, nos ensaios de flexão estática nas madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa*. Os resultados gerados partiram de um conjunto para cada material de 30 repetições, a análise de variância, mostrou, que não houve diferença entre os módulos de elasticidade ao nível de 5% de significância.

Tabela 2 – Análise de variância e teste *Scott Knott* para comparação do módulo de elasticidade (E) entre os métodos DIC, PIV e relógios comparadores ao nível de significância de 5%.

Material	Métodos	Análise de variância entre os métodos			Média Módulo Elasticidade (MPa)	Teste Scott Knott**
		CV(%)	FC	Pr>Fc*		
<i>Eucalyptus grandis</i>	PIV				15.713,5716	a1
	DIC	23,44	1,111	0,3339	16.693,6143	a1
	RC				17.176,6319	a1
<i>Pinus oocarpa</i>	PIV				6.425,5499	b1
	DIC	23,98	2,143	0,1235	7.166,2757	b1
	RC				7.224,9821	b1

\* Teste F significativo ao nível de 5% de significância.

\*\* Teste de *Scott Knott*: médias seguidas de mesma letra e número, correspondem a métodos estatisticamente iguais. Seguidas por letras e números diferentes, correspondem a métodos estatisticamente diferentes ao nível de significância de 5%.

Silva (2002), caracterizou a madeira de *Eucalyptus grandis* com idades de 120, 168, 240 e 300 meses, encontrou valor médio para o módulo de elasticidade de 10.131,3 MPa, 13.592,6 MPa, 14.912 MPa e 13.055,9 MPa, respectivamente, valores próximos aos encontrados no presente trabalho, 15.713,57 Mpa por PIV e 16.693,61 MPa por DIC; assim como Targa et al. (2005) durante os ensaios de flexão estática da madeira de *Eucalyptus grandis* obteve valor médio do modulo de elasticidade estático de 15.306 MPa.

Os resultados encontrados por Ballarin e Palma (2003) mostrou que o valor médio do módulo de elasticidade da madeira de *Eucalyptus grandis* mais externa (adulta) foi sensivelmente maior que o da madeira interna, 16.730 MPa e 10.894 MPa respectivamente.

Valores de módulo de elasticidade próximos aos encontrados através de ensaios convencionais por Ballarin e Palma (2003), da madeira de *Eucalyptus*, avaliado por meio de ensaio de compressão, tem valor médio 16.980 MPa; O módulo de elasticidade na direção longitudinal da madeira, avaliado por meio de ensaio de tração, tem valor médio 16.580 MPa, podendo ser assumido como estatisticamente igual ao nível de 5% de probabilidade ao obtido no ensaio de compressão.

A madeira do gênero *Eucalyptus sp.*, pesquisada por Segundinho et al. (2012), teve módulos de elasticidade, obtidos por vibração longitudinal, de 17.150 MPa; por vibração transversal de 18.810 MPa e por flexão estática de 16.370 MPa. Estes valores são próximos aos obtidos nesta pesquisa, 15.713,57 Mpa por PIV e 16.693,61 MPa por DIC.

Os módulos de elasticidade encontrados por Lopes et al. (2017), pelos métodos destrutivo e não-destrutivo (técnica de vibração transversal), 15.610 MPa e 17.250 MPa, respectivamente, apresentaram uma boa correlação ( $R^2= 0,82$ ). A correlação entre o modulo de elasticidade estático e o dinâmico é satisfatória, o que possibilita a utilização do método de vibração transversal para determinação do E da madeira, assim como foi encontrado por Burdzik e Nkwera (2002). Verificou-se que o módulo de elasticidade dinâmico foi cerca de 10,5% maior que o estático, conforme observado por Targa et al. (2005) para as espécies de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*.

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade estático da madeira condizem com àqueles apresentados na Norma Brasileira NBR 7190 – Projetos em Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997) para o gênero *Eucalyptus*, que vão de 12.813 a 19.881 MPa.

Em referência a espécie *Pinus oocarpa*, o resultado encontrado foi de 7.404,12 MPa para o módulo de elasticidade a flexão em árvore de 14 anos. Já E à compressão paralela, o

resultado foi de 7.893,32 MPa para a respectiva idade (KLOCK, 1989). Em relação aos resultados obtidos por este autor, nota-se resultados similares para o presente estudo.

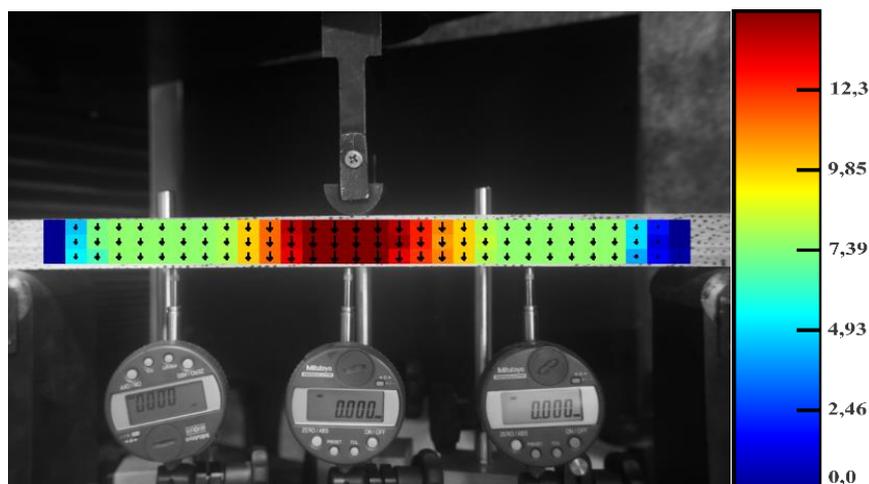
Zangiácomo (2003) em um estudo de elementos estruturais roliços de madeira, encontrou o valor médio do módulo de elasticidade para o *Pinus elliottii* de 7.724 MPa nos ensaios de flexão estática realizados de acordo com a Norma Brasileira NBR 7190 – Projetos em Estruturas de Madeira, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997), valor semelhante aos valores obtidos no presente estudo.

Stangerlin (2008) realizou um estudo com a função de correlacionar os módulos de elasticidade obtidos por métodos destrutivos e não destrutivos das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliotti*, foi observado valor médio de módulo de elasticidade pelo método do ultrassom de 15.698 MPa e 10.501 MPa, respectivamente e por meio de ensaio de compressão paralela as fibras das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliotti*, 13.119 MPa e 8.739 MPa.

### 5.5 Mapas de deformação fornecidos pelas técnicas DIC e PIV

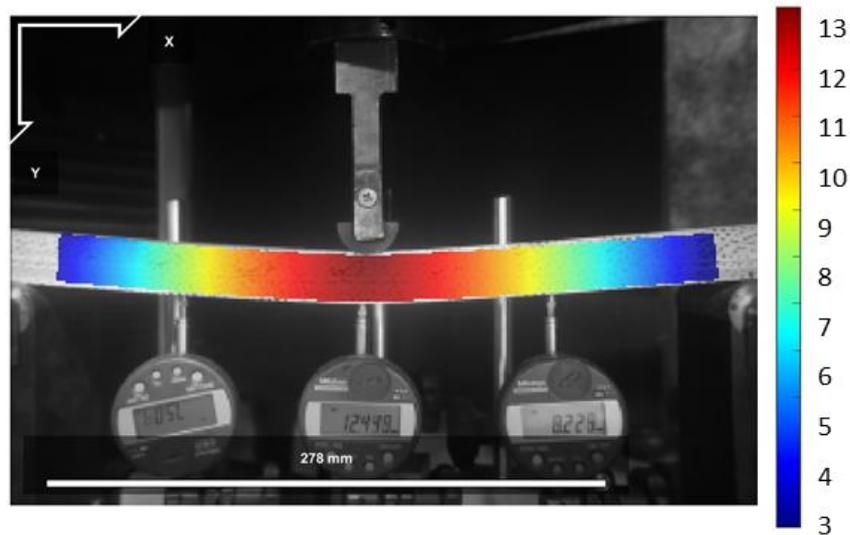
Nas Figuras 20 e 21, são ilustrados os mapas de deformação, obtidos pelos métodos DIC e PIV, respectivamente, referente aos ensaios de flexão estática, em que os pontos deslocam verticalmente ao longo da peça ensaiada. O corpo de prova apresentado nas Figuras 10 e 11, é da madeira de *Pinus oocarpa*, onde foi escolhido ao acaso no conjunto de dados com 30 amostras.

Figura 20 – Mapa de deformação pela técnica PIV



Fonte: Do autor (2018).

Figura 21 – Mapa de deformação pela técnica DIC



Fonte: Do autor (2018).

As regiões centrais, foram as que apresentaram um maior valor de deslocamento de um corpo de prova de *Eucalyptus grandis*, para o método PIV é possível observar no mapa esse valor de aproximadamente 14,82 mm e para a metodologia DIC, na mesma região de análise essa valor é de 12,97 mm, o método de medição convencional, relógios comparadores obteve um valor de 12,44 mm.

Analisando a deformação obtidas pelas metodologias PIV e DIC, nota-se que o mapa de deformação ao longo do corpo de prova, tiveram comportamentos parecidos, sendo que nas regiões onde está apoiada, os dois mapas apresentam valores próximos a zero e onde ocorreu o maior deslocamento, ambos os métodos detectaram tal ocorrido.

Rodrigues (2015), afirma que os mapas gerados pela técnica PIV, associada aos pontos demarcados na coluna, gerou mapas de deformação bidimensional nas regiões de interesse, apresentando uma melhor definição do comportamento da estrutura durante o ensaio realizado pelo o autor, visto que os vetores de deslocamentos obtidos pelo método PIV, equivaleram aos veltres obtidos pelos métodos dos Elementos Finitos.

De acordo com Santos et al. (2016), o resultado encontrado pelo método DIC, forneceram valores de módulo de elasticidade no espécime em estudo equivalentes aos valores obtidos usando *strain gages*, 31.541 MPa e 30.763 MPa, DIC e *strain gages* respectivamente. Apresentado como vantagem o fato do DIC poder ser aplicado em estudos nos quais o métodos dos *strain gage* mecânico não são possíveis.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos dos módulos de elasticidade, mostraram ser estatisticamente equivalentes. A análise de variância não detectou diferenças significativas ao nível de 5% de significância entre os valores obtidos pelos métodos PIV, DIC e o método convencional, para *Eucalyptus grandis*, foram encontrados os valores de 15.713 MPa, 16.693 MPa e 17.176 MPa, respectivamente, e para *Pinus oocarpa* foram encontrados os valores de 6.425 MPa, 7.166 MPa e 7.224 MPa.

As técnicas DIC e PIV podem ser utilizadas para a caracterização das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus oocarpa* e apresentam potencial de aplicabilidade para estruturas em serviços.

As técnicas DIC e PIV, foram capazes de gerar mapas de deformação nas superfícies de interesse e forneceram valores de deslocamentos estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância para técnica DIC e algumas regiões de interesse para técnica PIV. Verificou-se para técnica PIV, que mesmo as regiões de interesse que não apresentaram igualdade estatística de deformações, os valores encontrados apresentaram pequenas diferenças quando comparados aos valores do método convencional de ensaios destrutivos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- ANTONIOU, A. DIC algorithms. Ncoor, Georgia, 2015. Disponível em: <<http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms>>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS**. Disponível em: <[http://www.abende.org.br/analise\\_vibracoes.html](http://www.abende.org.br/analise_vibracoes.html)> Acesso em: 10 mar. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- BALLARIN A. W.; PALMA, H. A. L. **Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de pinus taeda**. R. Arvore, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.371-380, 2003.
- BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de correlação digital de imagem**. 101p. Dissertação (Mestre Engenharia Mecânica). Faculdade de Ciencia e Tecnologia- Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2017.
- BLABER, J.; ADAIRI, B; ANTONIOU, A. **Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software**. Experimental Mechanics, Brookfield, v. 55, n. 6, p. 1105-1122, 2015.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.
- BUCUR, V.; LANCELEUR, P.; ROGE, B. **Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces**. Ultrasonics, v. 1 a 8, n. 40. p.537-541, 2002.
- BURDZIK, W.M.G.; NKWERA, P.D. **Transverse vibration tests for prediction of stiffness and strength properties of full size Eucalyptus grandis**. Forest Products Journal, v.52, n.6, p.63-67, 2002.
- CALEGARI, L. **Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira**. Santa Maria: UFSM, 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2006.
- CALIL JUNIOR, C.; BRITO, L. D. **Manual de Projeto e Construção de Estruturas com Peças Roliças de Madeira de Reflorestamento**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2010, 332p.
- CALIL JUNIOR, C.; MINA, A. J. S. **Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira**. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 335-338, ago. 2003.
- CARRASCO MANTILLA, E. V; JÚNIOR AZEVEDO, A. P. **Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som fundamentos físicos e**

**resultados experimentais.** Cerne, v. 9, n. 2, 2003.

CARREIRA, M. R. **Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp.** 2003. 182f. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CASTRO E SILVA, A. **Anatomia da madeira.** Disponível em: <http://www.geocities.com/adcastro2000/inicio/principal.html>. Acesso em: 16 maio. 2018.

CHOUSAL, J. A. G; DE MOURA, M. F. S. F. **Validação da medição de deformações por correlação digital de imagem em compósitos laminados de matriz polimérica.** Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, v. 11, n 2, p. 23-34, 2006.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; ICIMOTO, F. H.; FERRO, F. S.; SEGUNDINHO, P. G. A.; CALIL JR., C. **Avaliação da coerência entre três métodos de determinação do módulo de elasticidade da madeira de Pinus oocarpa.** In: ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 3, 2011, São Carlos. Anais... São Carlos: IBRAMEM, 2011. p. 118-128.

COUTO, H. T. Z. **Manejo de florestas e sua utilização na serraria.** in: **seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria**, 1995, São Paulo. Anais. São Paulo: IPEF/IPT/ IUFRO/ LCF/ ESALQ/ USP, 1995. p. 21-30.

CRUZ, H.; NUNES, L. **A madeira como material de construção.** Lisboa: LNEC, 2005. 27 p.

ERIKSON, R.G. et al. **Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter Lodgepole pine, ponderosa pine, and grand fir trees from northern Idaho.** Forest Products Journal, v.50, n.7-8, p.59-65, 2000.

EVANS, J.L.W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. **Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones.** Forest Products Journal, v.50, n.7/8, p.75-87, 2000.

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**, 2ª edição, São Carlos, EDUFSCA, 2002, 286p.

GONÇALEZ, J.C.; VALLE, A.T.; COSTA, A.F. **Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som).** Cerne, Lavras, v.7, n.2, p.81-92, 2001

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens.** 3. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 69 p.

GORNIK, E.; MATOS, J. L. M. **Métodos Não Destrutivos para Determinação e Avaliação de Propriedades da Madeira.** ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA EM ESTRUTURA DE MADEIRA, 7., 2000, São Carlos. Anais... São Carlos, 2000.

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

HAJIALILUE-BONAB, M. et al. **“Soil deformation pattern around laterally loaded piles.”** Int. J. Phys. Model. Geotech., 11(3), 116–125. 2011.

- HELLMEISTER, J. C. **Sobre a determinação das características físicas da madeira.** São Carlos, 1973. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- HERMAN, G. T. **Image reconstruction from projections.** Orlando: Academic Press, 1996.
- HILLIS, W. E.; BROWN, A. G., ed. **Eucalyptus for wood production.** Melbourne: CSIRO, 1978. cap.12.
- Hosseini, A., and Mostofinejad, D. “**Experimental investigation into bond behavior of CFRP sheets attached to concrete using EBR and EBROG techniques.**” *Composites Part B*, 51, 130–139. 2013.
- ICARDI U., “**Through-the-thickness displacements measurement in laminated composites using electronic speckle photography**”, *Mechanics of Materials*, 35, 35-51 (2003).
- KAPOGIANNI, E., SAKELLARIOU, M. **Application of Particle Image Velocimetry (PIV) and Digital Image Correlation (DIC) techniques on scaled slope models.** 2017.
- KLOCK, U. **Qualidade da madeira de Pinus oocarpa Schiede e Pinus caribaea var. hondurensis** Barr e Golf. 1989. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.
- KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. **Principles of wood science and technology.** Berlim: Springer Verlag, v. 1, 1968. 592 p.
- LATORRACA, J.V.; ALBUQUERQUE, C.E.C. **Efeito de rápido crescimento sobre as propriedades da madeira.** *Revista Floresta e Ambiente*, v.7, n.1, p.279-291, 2000.
- LIMA, A.F.; JARÁ, E. R. P.; ALFONSO, V. A. **Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica.** In: PHILIPP, P.; D’ALMEIDA, M. L.O. *Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica.* 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. p.129-167.
- LOPES, C. B. da Silva. **Determinação do módulo de elasticidade de *Eucalyptus sp.* por método destrutivo e não destrutivo.** III CBCTEM. 6 p. 2017.
- LUO, P. F., et al. (1993). **Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision.** *Experimental Mechanics*, 33(2), 123–132.
- MAGALHÃES, R. R.; BRAGA JUNIOR, R. A.; BARBOSA, B. H. G. **Young's Modulus evaluation using Particle Image Velocimetry and Finite Element Inverse Analysis.** *Optics and Lasers in Engineering*, Austria, v. 70, n. 1, p. 33-37, 2015.
- MARTINS, T. F. R. M. **Dimensionamento de estruturas em madeira.** 2010. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado–outubro 2010–Instituto Superior Técnico.
- 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.

- MOREIRA, P. **Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação Digital de Imagem para Avaliação de Grandes Deformações**. Tese de Mestrado. FCT-UNL, 2015.
- MORESCHI, J.C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Setor de Ciências Agrárias/UFPR, 2010. 176 p.
- MOURA, V. P. G.; DVORAK, W. S.; HODGE, G. R. **Provenance and family variation of *Pinus oocarpa* grown in the Brazilian cerrado**. *Forest Ecology and Management*, v.109, p. 315-322, 1998.
- OLIVEIRA, F.G.R. de; SALES, A. **Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods**. *Bioresource Technology*, v. 97, p. 2443-2446, 2006.
- OLIVEIRA, J. T. da S; SILVA, J. de C. **Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm.** 2003.
- OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. São Paulo, 1997. 2v., 429p. Tese (Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo).
- OLIVEIRA, J. T. S. **Ultrasonic measurements in Brazilian hardwood**. *Materials Research*, v.5, n.1, p.51-55, 2002.
- OLIVEIRA, J. T. S; HELLMEISTER, J. C; TOMAZELLO FILHO, M. **Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto**. 2005.
- OSTENDORF, M.; SCHWEDES, J. **Application of particle image velocimetry for velocity measurements during silo discharge**. *Powder Technology*, v.158, p.69-75, 2005.
- PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4.ed. New York: Mc-Graw-Hill, 1980.,
- PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4 ed. New York: 1980. 722p.
- PAULA, Marcella Hermida et al. **Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd)**. *Biodiversidade*, v. 15, n. 2, 2016.
- 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) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.
- PEREIRA, R. A. **Velocimetria por imagens de partículas aplicada ao estudo de deformações em madeira serrada e painéis de madeira**. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224p.
- PICOY, Y. M. **Correlação digital de imagens para medições de deslocamentos em vigas em balanço**. 2016. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Automação)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

IPT INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO. **Fichas de Características das Madeiras Brasileiras**. 2a ed. São Paulo: IPT, 1989a. 418p.

QUOIRIN, N. S. R. **Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios x**. 142p. Dissertação (Mestrado Engenharia de Materiais e Processo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

RAFFEL, M. et al. **Particle image velocimetry: a practical guide**. 2 ed. New York: Ed. Springer Verlag, 2007.

RIBEIRO, P. G. **Utilização de Técnicas não Destrutivas para Caracterização de madeiras de Pinus Caribaea Var. Hondurensis e de Eucalyptus grandis**. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Universidade de Brasília. Brasília. 2009.

RODRIGUES, M. C. **Estudo de flambagem em colunas utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV)**. 2015. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. **Nondestructive testing for assessing wood members in structures: a review**. Madison: Department of Agriculture - Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. p.28.

ROSS, R.J. **Using sound to evaluate standing timber**. International Forestry Review. v.1, n.1, p.43-44, 1999.

ROSS, R.J. et al. **Nondestructive evaluation of wood**. Forest Products Journal, v.48, n.1, p.14-19, 1998.

ROSSI, M., BROGGIATO, G. B., & PAPALINI, S. (2008). **Application of digital image correlation to the study of planar anisotropy of sheet metals at large strains**. Meccanica, 43(2), 185–199.

RUY, M. **Classificação da madeira roliça de eucalipto por ultrassom**. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SANTOS, A. H. A et al. **Concrete modulus of elasticity assessment using digital image correlatio**. Belo Horizonte, v.9, p. 587-594, 2016.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de Eucalyptus urophylla**. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 65, p. 120 - 129, 2004.

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

SETTE JÚNIOR, C.R. et al. **Efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de Eucalyptus grandis w.hill**, aos 24 meses de idade. Floresta, v.39, n.3, p.535-546, 2009.

SIELMAMOWICZ, I.; BLONSKI, S.; KOWALEWSKI, T. A. **Optical technique DPIV in**

**measurements of granular material flows, Part 1 of 3 – Plane hoppers.** Chemical Engineering Science, v.60, p.589-598, 2005.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de E. grandis de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira.** 2002. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, M. J. A.; ALVES, M. C. A.; COSTA, I. F. **Imagem: uma abordagem histórica.** Curitiba: Editora da UFPR, 2007. 10 p.

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

SMITH, B.L.; GLEZER, A. **Jet vectoring using synthetic jets.** Journal of Fluid Mechanics, v. 458, p. 1-34, 2002.

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. **Propriedades de flexão estática da madeira de Carya illinoensis em duas condições de umidade.** Ciência da Madeira, Pelotas, v. 01, n. 02, p. 70-79, Novembro de 2010

STANGERLIN, D. M; MELO, R. R.; DOMINGUES, J. M. X. **Determinação da resistência ao impacto para as madeiras de Eucalyptus dunnii, Corymbia citriodora e Pouteria pachycarpa.** In: Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira. Anais... [CD-ROM], 2008, Londrina.

SZELIGA, M. R.; ROMA, W. N. L. **Estudos de Reaeração com Velocimetria por Imagens de Partículas – Sistema S-PIV-3D.** Eng Sanit Ambient, Ponta Grossa, v. 14, n. 4, p. 499-510, 2009.

TARGA, L. A. et al. **Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de métodos não-destrutivos de vibração transversal.** Jaboticabal, v.25, n.2, p.291-229, 2005.

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

URBAN, W.D.; MUNGAL, M.G. **Planar velocity measurements in compressible mixing layers.** Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v. 431, n. 1p. 189-222, 2001.

WHITE, D. et al. 2003. **"Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry"**. Geotechnique, vol. 53(7), pp. 619–631.

WILLIAMS, P. AND NORRIS, K. (2001) **Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries.** American Association of Cereal Chemists, USA.

WU, R. et al. **Determination of three-dimensional movement for rotary blades using digital image correlation.** Optics and Lasers in Engineering, London, v. 65, p. 38-45, Feb. 2015.

XIE, H.; KANG, Y. **Digital image correlation technique.** *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 65, p. 1-2, Feb. 2015.

YANG, Y.; ROCKWELL, D. **Wave interaction with a vertical cylinder: spanwise flow patterns and loading.** *Journal of Fluid Mechanics*, v. 460, p. 93-129, 2002.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada.** 2003, 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ZENID, J. G. **Madeira na construção civil.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2011.

ZHOU, Y. et al. **Image pre-filtering for measurement error reduction in digital image correlation.** *Optics and Lasers in Engineering*, London, v. 65, p. 46-56, Feb. 2014.

ZOLIN, I. **Ensaio mecânicos e análise de falha.** Universidade Federal de Santa Maria, p. 1 – 102, 2010.