



TOMÉ MOREIRA DE SOUZA

**ANÁLISE DO MECANISMO DE RUPTURA EM
FLEXÃO ESTÁTICA EM MADEIRA POR MEIO
DA TÉCNICA VELOCIMETRIA POR IMAGEM
DE PARTICULAS**

LAVRAS – MG

2013

TOMÉ MOREIRA DE SOUZA

**ANÁLISE DO MECANISMO DE RUPTURA EM FLEXÃO ESTÁTICA
EM MADEIRA POR MEIO DA TÉCNICA VELOCIMETRIA POR
IMAGEM DE PARTICULAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. José Tarcísio Lima

Coorientadores

Dr. Roberto Alves Braga Junior

Dr. Giovanni Francisco Rabelo

LAVRAS – MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Souza, Tomé Moreira de.

Análise do mecanismo de ruptura em flexão estática em madeira
por meio da técnica de velocimetria por imagem de partículas /
Tomé Moreira de Souza. – Lavras : UFLA, 2013.

85 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: José Tarcísio Lima.

Bibliografia.

1. Madeira. 2. *Sunset laser*. 3. PIV. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.

CDD – 674.1

TOMÉ MOREIRA DE SOUZA

**ANÁLISE DO MECANISMO DE RUPTURA EM FLEXÃO ESTÁTICA
EM MADEIRA POR MEIO DA TÉCNICA VELOCIMETRIA POR
IMAGEM DE PARTICULAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 16/05/2013.

Dra. Luciana Barbosa de Abreu	UFLA
Dr. Roberto Alves Braga Júnior	UFLA
Dra. Ellem Waleska Nascimento da Fonseca Contado	UFLA
Dr. José Reinaldo Moreira da Silva	UFLA

Dr. José Tarcísio Lima
Orientador

**LAVRAS – MG
2013**

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas graças recebidas, sou agraciado, sou feliz.

A minha esposa, Márcia, e aos meus filhos, André e Diogo, meus mais preciosos bens, obrigado pelo carinho e incentivo.

Ao meu professor orientador, incentivador e acima de tudo, meu amigo, professor Dr. José Tarcísio Lima, pela sábia e dedicada orientação, pelo apoio e compreensão em todos os momentos, requisitos que contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos meus coorientadores, Dr. Giovanni Francisco Rabelo e Dr. Roberto Alves Braga Junior, pela colaboração, amizade e dedicação.

Aos professores José Reinaldo, Paulo Trugilho, Fábio Akira, Lorival e Luciana muito obrigado pelos ensinamentos e principalmente pela ajuda.

À Cris, ao Carlos, Hernani e Selma pela amizade e grande ajuda.

Aos Colegas do programa de pós-graduação pela convivência e amizade. Aos amigos do Laboratório CEDIA, Luis Flavio, Daniel, Henrique, Lucas, Ellem, Murilo, Pauliane, Diego, David, Dona Josélia e Sr. Antonio, pela amizade.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Ciências Florestais, e ao Departamento de Engenharia, pela oportunidade concedida para a realização do doutorado.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos tudo de melhor, boa sorte e que Deus os abençoe.

RESUMO

Todo corpo sólido sofre deformações quando determinada força é aplicada sobre ele. A análise de qualquer estrutura sólida somente é possível conhecendo-se os esforços que o material suporta. Para isso, são feitos testes com máquina universal de ensaios mecânicos que possibilitam observar quando o material começa a se deformar. Porém, por meio destes testes não é possível avaliar com clareza quais partes do material começam a sofrer as primeiras deformações, como no caso de materiais heterogêneos. Entre as tecnologias não destrutivas para análises de materiais, em especial de materiais biológicos, existem ou estão disponíveis as ferramentas de iluminação e captura de imagens, entre elas a *particle image velocimetry* (PIV), que utiliza um *speckle laser*. Objetivou-se, neste trabalho, avaliar, de forma qualitativa, a elasticidade da madeira por meio da técnica óptica do *sunset laser*. De forma específica, objetivou-se a proposição de um protocolo para a sua adoção em estruturas de madeira, sem a necessidade de desmontá-la, buscando testar técnicas diversas de análise de imagens. O *laser* iluminou as superfícies dos corpos de prova paralelamente às superfícies, de forma similar ao fenômeno do por do sol em cadeias de montanhas, a fim de observar suas irregularidades. Essa técnica foi denominada de *sunset laser*. Após a captura, as imagens foram implementadas no software *image j* (*software* livre). As imagens foram transformadas em matrizes de frequências *red*, *green* e *blue* e utilizou-se uma frequência *green* para análise da PIV. A escolha foi feita pelo fato de os fenômenos em estudo se encontrarem presentes nessa faixa de frequência. Para o estudo da deformação em sólidos, utilizou-se uma série de testes de deformação em madeiras de *Hymenolobium sericium*, *Eucaliptus* e *Pinus*, e com a máquina universal de ensaios mecânicos e a PIV, simultaneamente. A cada imagem adquirida para a PIV, observou-se a força correspondente na máquina universal. Analisando-se as imagens resultantes, observou-se que a PIV foi consistente e pode, inclusive, mostrar em quais partes a madeira estava sujeita a uma maior força e, conseqüentemente, em que sofreu maior deformação.

Palavras-chave: madeira, *sunset laser*, PIV

ABSTRACT

Solid material present deformations when a certain force is applied on it, and those deformations are related to many characteristics of the material. Particularly in wood the knowledge of the deformations is relevant to evaluate the behavior of that complex material. In order to characterize the behavior of a wood piece under some forces the Universal Testing Machine is considered the standard method. However, by means of these tests it is not possible to identify the different deformations within the material since wood is a part of the heterogeneous body. Among the non destructive technologies for materials analysis, especially the biological ones, there are available optical tools. The objective of this study was to evaluate, in a qualitative way, the map of deformation of the wood through the technique of optical laser sunset associated with the particle image velocimetry technique. In addition, it aimed to propose a protocol for its adoption in wooden structures, without the need to disassemble, or destroy it. The laser lightened the sample surfaces of the specimens parallel to the surface, similar to the sunset phenomenon on mountain chains, in order to observe their irregularities of the surface creating many artificial grains. The images were splitted into red, green and blue outputs adopting green the frequency analyses of PIV. For the study of deformation in wood, we used a series of tests in three species *Hymenolobium sericium*, *Eucalyptus* and *Pinus*, with Universal Mechanical testing Machine and PIV simultaneously. To each image acquired, it was observed a corresponding force in the Universal Machine. Analyzing the resulting images, it was seen that the PIV was consistent, and could even show which parts of wood was subject to higher deformation creating an output map of wood deformation.

Keywords: Wood, Sunset Laser PIV

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
2.1	Madeira.....	11
2.2	Propriedades comuns a todas as madeiras.....	11
2.3	Propriedades específicas de certas espécies.....	12
2.4	Extensão da variabilidade dentro de uma espécie.....	13
2.5	Determinação das propriedades da madeira.....	13
2.6	Madeiras estudadas	18
2.6.1	<i>Hymenolobium sericium</i> pedra (<i>Hymenolobium sericium</i>).....	18
2.6.2	<i>Eucalyptus</i> sp	19
2.6.3	<i>Pinus taeda</i>	20
2.7	Cultura do <i>Eucalyptus</i> no Brasil	21
2.8	<i>Laser</i>	22
2.8.1	Qualificação pelo <i>laser</i>	24
2.9	PIV.....	25
2.10	Alguns trabalhos utilizando a PIV.....	28
2.10.1	Fluxo do Fluido	28
2.10.2	Fluxo biológico.....	30
2.10.3	Medições com a técnica PIV de velocidades e concentrações de fibras de madeira em transporte pneumático.....	32
2.11	Técnica Sunset	32
2.12	Mecanismos físicos de deformação e ruptura da madeira.....	34
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	39
4.1	Velocimetria de imagem de partícula	39
4.1.1	Madeira de <i>Hymenolobium sericium</i> Pedra.....	39
4.1.2	Madeira de Eucalipto sp.....	47
4.1.3	Madeira de <i>Pinus</i>	55
4.2	Relação força x deformação da madeira 3.....	63
5	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS.....	66
	ANEXOS.....	70

1 INTRODUÇÃO

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

A decisão de proceder à reabilitação de construções existentes, em alternativa à substituição por estruturas totalmente novas, é frequentemente ditada por razões econômicas. Em certas circunstâncias, porém, é a necessidade de preservar o patrimônio histórico ou cultural que impõe a recuperação da construção degradada, situação que, geralmente, determina o tipo de intervenção a realizar. No caso de estruturas ou elementos de madeira, que poderão apresentar patologias, a identificação dos problemas, a avaliação da sua gravidade e a definição da metodologia a seguir para a reabilitação e/ou reforço dos elementos afetados podem revelar alguma especificidade, em face da natureza deste material, da localização dos elementos nas estruturas, da função estrutural, etc.

Desse modo, assumem papel relevante a identificação e o conhecimento das características da madeira utilizada, a avaliação da qualidade dos diversos elementos presentes, em termos de nós e de outros defeitos que exibam, assim como a avaliação da secção residual resistente. Impõe-se, ainda, um especial cuidado no dimensionamento estrutural, em que se deve prestar particular atenção às diferentes propriedades físicas e mecânicas da madeira nas três direções principais: longitudinal, tangencial e radial. Cabe ainda salientar a necessidade de inspeção periódica em estruturas, visando à sua conservação e, principalmente, à segurança dos usuários. A inspeção e a avaliação das características estruturais dos elementos *in-situ* formam apenas uma pequena,

ainda que importante, parte do processo de reabilitação e conservação da estrutura.

Para a determinação das propriedades mecânicas da madeira, têm-se os métodos de ensaios já consagrados e normatizados, porém, em muitos casos, destrutivos. Ensaios alternativos, em especial os não destrutivos, tomam espaço nas pesquisas, agregando outros valores aos ensaios, como a ausência de contato com o material ensaiado.

Os ensaios não destrutivos (END) são aqueles realizados em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Os END recentes utilizam o ultrassom, a radiografia, a análise de vibrações e a emissão acústica, entre outros. As avaliações não destrutivas, utilizando vibrações e ultrassom, por exemplo, são empregadas para a determinação das propriedades físicas e mecânicas de materiais, como os metais e as ligas metálicas, uma vez que se podem detectar defeitos e vazios internos. Todavia, no caso da madeira, como esses problemas são característicos, os END são utilizados, quase sempre, para verificar como essas ocorrências afetam as suas características físicas e mecânicas.

Apesar de já existirem muitos métodos de análise não destrutiva da madeira, ainda se faz necessária a busca por técnicas que permitam seu uso de forma a compreender como um corpo submetido a esforços mecânicos se comporta nas diversas seções que compõem este material.

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

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o potencial uso da

técnica de velocimetria por imagem de partículas associada à técnica do *sunset laser* para criar mapas de deformação em corpos de prova de madeiras de *Hymenolobium sericium*, *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. sob deformação controlada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Madeira

O homem sempre utilizou a madeira para suprir suas necessidades de abrigo, fabricação de armas, fogo para cozimento de alimentos, aquecimento no frio e transporte flutuante (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980). Atualmente, com a madeira são produzidos diversos materiais e seu consumo mundial *per capita* é tanto maior quanto maior for o desenvolvimento de um país. Muita informação sobre a madeira é empírica e, sendo esta um material de natureza complexa, seu uso torna-se prejudicado, competitivamente (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

Por ser um material orgânico produzido por várias espécies, as madeiras apresentam anisotropia. Sua composição química e anatômica é complexa.

No estudo da madeira devem ser considerados (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980):

2.2 Propriedades comuns a todas as madeiras

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

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

Estas características proporcionam à madeira:

- a) resistência à oxidação;
- b) possibilidade de ser montada e moldada;
- c) boas propriedades acústicas e isolamento elétrico.

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

As desvantagens da madeira são:

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

2.3 Propriedades específicas de certas espécies

Panshin e De Zeeuw (1980) afirmam que as propriedades mais reconhecidas da madeira são cor, textura e forma. Afirmam, ainda, que estas propriedades devem-se ao padrão celular de cada espécie, provocado por diferentes combinações de tipos, tamanho, arranjo e alinhamento de células, como também são encontrados diferentes tipos de substâncias em diferentes tipos de madeira.

Outras diferenças entre as espécies de madeira são: massa específica, dureza, resistência, grau de mudança de dimensões, penetrabilidade,

propriedades de acabamentos e colagem, durabilidade, reação com produtos químicos e capacidade de fixar peças de união de madeiras (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

Estas diferenças de propriedades devem-se às estruturas anatômicas, à densidade e à quantidade de materiais estranhos que variam entre cada espécie e são importantes para a escolha da madeira para cada tipo de utilização (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

2.4 A extensão da variabilidade dentro de uma espécie

A variabilidade dentro de uma mesma espécie pode ser maior que a variabilidade entre espécies diferentes.

A variabilidade pode ocorrer:

- a) de árvore para árvore;
- b) em lugares diferentes de uma mesma árvore;
- c) em uma peça de madeira.

Estas variações são provocadas por influências ambientais que afetam o crescimento de uma árvore, como clima, solo, espaçamento e umidade, além de fatores genéticos.

As características mais marcantes são a aparência, a taxa de crescimento, densidade e o alinhamento da grã (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

2.5 Determinação das propriedades da madeira

A madeira pode ser considerada um excelente material estrutural, reconhecida por sua resistência elevada e sua baixa densidade, quando comparada a outros materiais, como o aço para construção (KOLLMANN; COTÊ JUNIOR, 1968). Conhecer as propriedades físicas e mecânicas da

madeira é de grande importância para determinar com segurança sua aplicação, desempenho e resistência. Arganbright (1971) afirma que, entre as suas propriedades físicas mais importantes, estão a densidade e a retratibilidade e, entre as propriedades mecânicas, a resistência a esforços de compressão, flexão, tração, cisalhamento e fendilhamento. Matos (1997) relata que as propriedades mecânicas são as principais variáveis na determinação da sua utilização para fins estruturais.

Qualquer característica de um elemento de madeira depende da espécie lenhosa a que pertence. Desse modo, é indispensável identificar a espécie a que pertence determinado elemento, recordando-se de que não são raros os casos em que numa estrutura existem diferentes espécies. Em determinados tipos construtivos é comum utilizarem-se espécies lenhosas tendo em conta o tipo de esforços que solicitam os elementos. Um caso que se encontra frequentemente nas construções antigas monumentais é a utilização de folhosas de elevada massa volumétrica nas linhas fortemente solicitadas à compressão transversal enquanto as peças solicitadas na direção longitudinal são realizadas em madeira com menor resistência (FEIO; LOURENÇO, 2005).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 7190:1997 (ABNT, 1997), estabelece três alternativas para se proceder à caracterização da resistência e da rigidez das espécies de madeiras a serem empregadas na construção de estruturas. São elas: caracterização completa para espécies desconhecidas, caracterização mínima para espécies pouco conhecidas e caracterização simplificada para espécies bem conhecidas. Métodos de ensaios já consagrados para determinar as propriedades mecânicas da madeira são estabelecidos por esta norma.

Morales (2002), avaliando os procedimentos metodológicos propostos pelo anexo B da NBR 7190:1997, concluiu que, no que concerne à comparação entre os três ciclos de carregamento, é análogo analisar o intervalo de confiança

das médias das deformações específicas e que os módulos de elasticidade no segundo e no terceiro ciclos de carregamento são estatisticamente equivalentes. Este resultado foi constatado para quatro classes de resistência de dicotiledôneas e três classes de resistência de coníferas. Portanto, fica evidenciado que o terceiro ciclo de carregamento pode ser suprimido dos ensaios de compressão normal às fibras, compressão paralela às fibras, flexão estática e tração paralela às fibras, sem qualquer prejuízo da significância dos resultados.

A elasticidade é a propriedade de um material que possibilita que ele retorne à forma original, após a remoção da carga aplicada que o deformou. A madeira é um material elástico e, quando é solicitada por carregamentos compatíveis, deforma-se sem se quebrar.

As técnicas de avaliação não destrutiva aplicadas à madeira diferem muito das técnicas utilizadas em materiais homogêneos e isotrópicos, como os metais, os plásticos e as cerâmicas. Em tais materiais, cujas propriedades mecânicas são conhecidas e rigorosamente controladas por processos de produção, as técnicas de avaliação não destrutiva são utilizadas somente para detectar a presença de descontinuidade, vazios ou impurezas. Entretanto, na madeira, estas irregularidades ocorrem naturalmente e são induzidas por agentes da natureza (CARREIRA et al., 2003).

Para avaliar as características físico-mecânicas da madeira, existe um conjunto de técnicas, umas expeditas outras mais complexas, que permitem, em muitos casos, fazer a apreciação do som obtido por percussão de martelo sobre os elementos, avaliar a resistência à penetração (resistógrafo), esclerômetro para madeiras (Pilodyn), raios X, análise termográfica da superfície, análise da velocidade de propagação de ondas de tensão e a amplitude da onda sonora ou ultrassônica etc. No entanto, é de realçar que a eficiência e a eficácia destes tipos de ensaios podem ser aumentadas se forem empregados conjuntamente para

estudar a variabilidade das características mecânicas dos elementos da madeira (UZIELLI, 1992; CRUZ et al., 1994, citados por FEIO; LOURENÇO, 2005).

Significativos esforços vêm sendo direcionados para o desenvolvimento de uma tecnologia consistente de avaliação não destrutiva (END) capaz de prever com eficácia propriedades intrínsecas da madeira (WANG et al., 2007 citados por STANGERLIN et al., 2008).

Os aparelhos de ultrassom baseiam-se, no geral, na relação entre a velocidade de propagação de uma onda ultrassônica na madeira e as propriedades mecânicas da peça. O equipamento pode ser utilizado para classificar lotes de madeira em diferentes categorias de rigidez e para estimar a resistência mecânica de uma peça individual. Oliveira et al. (2005) concluíram que é necessário adequar a frequência do equipamento com as dimensões das peças, ou seja, a geometria do corpo de prova é essencial para a determinação correta da velocidade ultrassônica em madeira.

Altas correlações têm sido observadas entre os módulos de elasticidade obtidos a partir das técnicas de ondas acústicas (E_d) e flexão estática (MOE). É mais difícil relacionar MOR com E_d , pois a presença de defeitos e a inclinação das fibras têm efeito mais significativo no MOR do que na velocidade longitudinal da onda (MAC DONALD et al., 1990). Como alguns defeitos na madeira afetam a inclinação das fibras, qualquer método que seja sensível a isso terá alto potencial para determinar a resistência da madeira (MAC DONALD et al., 1990 citados por MINÁ et al., 2004).

Pesquisas têm sido realizadas, a fim de buscar alternativas sem que haja contato entre o elemento medidor e a superfície do objeto. Esses métodos devem ter rapidez e eficiência. Entre várias alternativas, as técnicas ópticas de medição de perfis têm se mostrado eficientes e eficazes para materiais biológicos ou heterogêneos, como a madeira. Estas técnicas são aplicadas em estudos com materiais estáticos e, mais recentemente, impostos à situação dinâmica. As

técnicas mais utilizadas são a holografia, a fotoelasticidade clássica, a interferometria *speckle* e as técnicas de Moiré. Derivações destas técnicas podem utilizar as características de coerência e alta direcionalidade do *laser* para obter informações por meio do padrão de *speckle*, como sugerido por Silva et al. (2005), bem como por efeitos de sombra na superfície (SORAGI, 2009).

Na busca por tecnologias não destrutivas para as análises de materiais, em especial de materiais biológicos, o uso de técnicas ópticas ganha espaço a cada dia, como apresentado por Paliwal et al. (2003), Hernandez Sanches et al. (2006), Park e Chen et al. (1996) e Blasco et al. (2003), citados por Faria et al. (2008). Essas técnicas fazem uso das mais diversas ferramentas de iluminação e captura de imagens, entre elas o *laser*.

Uma aplicação na caracterização de parâmetros de amostras vegetais associou o *laser* com técnicas ópticas e análise de imagens, sendo apresentada em distintas versões por Hu, Tanada e Ohtami (2004), Simonaho et al. (2004) e Faria et al. (2008), para a medição da orientação das fibras, de forma não destrutiva e com potencial de ser automatizada.

Silva et al. (2006) avaliaram a técnica de captura das imagens de superfícies de madeira de *Eucalyptus* sp. por meio de iluminação com *laser* de baixa potência aplicada em diferentes ângulos. As imagens foram processadas tomando como base os padrões formados na superfície do material, usando as sombras provenientes das irregularidades durante a iluminação da madeira. Os resultados de distintos ângulos foram comparados e uma análise espectral foi conduzida para caracterizar as frequências em cada perfil. Os autores concluíram que a iluminação aproximadamente paralela entre a madeira e o *laser* foi a que apresentou imagens mais bem definidas, possibilitando a visualização das cristas. Neste caso, as irregularidades periódicas da superfície iluminada resultaram em padrões de sombras que foram tratadas por técnicas de

processamento e análise de imagens e, de forma numérica, comparadas com os parâmetros resultantes do processamento (SORAGI, 2009).

Soragi (2009), iluminando a superfície usinada da madeira de forma que o feixe de luz ficasse paralelo à superfície, similar ao fenômeno do por do sol em cadeias de montanhas, conseguiu observar e medir as irregularidades periódicas causadas pela plaina na superfície iluminada. A autora denominou a técnica apresentada por Silva et al. (2006) de *sunset laser*.

2.6 Madeiras estudadas

Neste trabalho procurou-se estudar três madeiras de resistências diferentes, sendo uma de alta resistência, *Hymenolobium sericium*; uma de média resistência, *Eucalyptus* sp. e uma de baixa resistência, *Pinus taeda*.

2.6.1 *Hymenolobium sericium*-pedra (*Hymenolobium sericium*)

O *Hymenolobium sericium* é árvore de grande altura e seu porte pode atingir o teto da floresta da região; seu tronco grosso pode chegar a medir até 340 cm de diâmetro, com casca cinzenta-escura. As folhas são compostas, alternas, imparipinadas com 9-17 folíolos de 3 a 5,5 cm de comprimento e 1,5 a 2,5 cm de largura; as flores, em panículas esparsas, nas extremidade dos ramos, róseas com nuances violáceas, aromáticas, cálice de 4-7 mm de comprimento e frutos, vagens aladas, indeiscentes de cor sanguínea, contendo uma, raro duas sementes muito pequenas. A época de floração é nos meses de agosto a janeiro e a frutificação no decorrer do verão, só excepcionalmente até o começo do inverno, quando perde as folhas e cobre-se de frutos. Na estação chuvosa, perde completamente a sua folhagem para se cobrir de flores.

O nome científico do angelim pedra é *Hymenolobium sericium*, da família Fabaceae, conhecida pelos nomes comuns de *Hymenolobium sericium*-vermelho, *Hymenolobium sericium*-verdadeiro, *Hymenolobium sericium*-pedra verdadeiro, fava-grande, faveira-dura e faveira-ferro, *Hymenolobium sericium*-falso e faveira-preta, e tem origem nas florestas de terra firme, em toda a Amazônia brasileira. Seu hábitat é nas florestas altas de terra firme e também nos campos altos, onde o porte, embora reduzido, prevalece sobre o das demais árvores.

Como características gerais, apresenta cerne marrom-amarelado-claro, distinto do alburno marrom-pálido; grã revessa, textura grossa, brilho ausente e cheiro imperceptível; secagem muita rápida em estufa, apresentando pequena tendência a torcimento e arqueamento médios; relativamente fácil de trabalhar; acabamento de regular a bom na plaina, torno e broca; durabilidade do cerne, de muito durável a durável, quando exposto a fungos da podridão-branca e parda, e moderadamente resistente a brocas marinhas; é resistente a cupins de madeira seca; o alburno é de preservação muito fácil e cerne difícil de preservar com creosoto e com CCA-A, em tratamento sob pressão. É utilizado na construção civil e naval, e também em marcenaria, dormentes, estacas, tacos de assoalhos, vigamentos e esteios.

A madeira de *Hymenolobium sericium*-pedra é de alta resistência, sendo a sua tensão de ruptura à flexão de 1.350 kgf/cm².

2.6.2 *Eucalyptus* sp

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae e tem mais de 600 espécies, variedades e híbridos. Ocorre em uma gama de condições ambientais que vão desde áreas pantanosas até muito pobres. Além disso, ocupa ambientes altamente variáveis, tanto em termos de precipitação quanto de temperaturas.

Toda essa diversidade ambiental concentra-se, principalmente, no continente australiano, apresentando também ocorrências na Indonésia e em ilhas adjacentes (Assis, 1996).

O eucalipto vem sendo utilizado, na indústria de serraria, em países como Austrália, África do Sul, Argentina e Chile. Nestes países, onde os recursos florestais são abundantes, principalmente as florestas plantadas, habitações são construídas inteiramente com madeira e seus derivados. No Brasil utiliza-se madeira serrada de eucalipto há cerca de cem anos, mas em pequena quantidade. Por volta dos anos 1990, iniciou-se a produção em escala mais ampla (Lima, 1999). De acordo com Flynn (2003), o Brasil aparece como o segundo fornecedor, com 19% do mercado mundial, de madeira serrada de eucalipto (a Austrália é o principal fornecedor com 53% do mercado mundial). Parte da madeira explorada pelo Brasil se destina a pisos. A madeira serrada de eucalipto (*solid wood*) representa menos de 2% do mercado mundial de serrados (Flynn, 2003).

2.6.3 *Pinus taeda*

A espécie *Pinus taeda* é oriunda das planícies adjacentes ao Golfo do México e à costa atlântica do sudeste dos Estados Unidos. Cresce, em geral, em altitudes de até 800 m, embora, coincidente com a área original do *Pinus elliotii*, apresente uma distribuição mais ampla, alcançando os estados do Texas, do Arkansas, do Tennessee e da Virgínia. É conhecido por *loblolly pine* e trata-se da espécie madeireira mais importante dos Estados Unidos, na atualidade (MARCHIORI 1995).

No sul do Brasil, é cultivado, sobretudo, nas terras mais altas das serras gaúcha e catarinense. As árvores alcançam cerca de 20 m de altura e 100 cm de DAP, produzindo copa densa, casca gretada e ramos acinzentados. As folhas

aciculares e verde-escuras reúnem-se em grupos de três por fascículo e medem de 15 a 20 cm de comprimento. Apresentam, com frequência, 2 canais resiníferos, raramente 3 a 4, dispostos no meio do colênquima.

Ainda segundo Marchiori (1995), a espécie assemelha-se ao *Pinus elliottii*, diferindo, entretanto, em vários aspectos de fácil reconhecimento. As acículas de *Pinus taeda*, mais curtas e de cor mais escura, têm seção transversal triangular e cones praticamente sésseis, tendentes à cor acinzentada.

O *Pinus taeda* apresenta tensão de ruptura à flexão média de 680 kgf/cm². A madeira é indicada para construções, móveis e caixotaria; as fibras são longas e adequadas à fabricação de papel e produzem bastante resina.

2.7 Cultura do *Eucalyptus* no Brasil

A introdução da cultura do eucalipto no Brasil, para a produção de madeira, partiu da iniciativa privada, no início do século XX, procurando resolver, principalmente, seus problemas de origem energética. A expansão da eucaliptocultura originou-se das informações resultantes dos estudos desenvolvidos pela Companhia Paulista de Estradas de Ferro (Costa, 1961). O Dr. Edmundo Navarro de Andrade, trabalhando no departamento florestal dessa companhia, testou diversas espécies de *Eucalyptus* de origem australiana, nos hortos florestais de Jundiá e Rio Claro, SP.

Segundo Gaiotto (1993), em 1960, era estimado que as plantações de eucalipto no Brasil ocupavam uma área de 560.000 ha, com 447.000 ha em São Paulo, 60.000 ha em Minas Gerais, 34.000 ha no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná e 19.000 ha distribuídos entre outros estados. Estas plantações destinavam-se à produção de lenha, carvão para siderurgia, postes, moirões de cerca, estacas para fundações de edifícios, dormentes, escoras de minas, chapas de fibras, pasta celulósica e papel.

Com pouco tempo de pesquisa, a história do eucalipto no Brasil começa a ser mudada. Sua madeira, que era considerada de péssima qualidade, sendo o eucalipto responsável por extenuar os solos e consumir grande quantidade de água, passou a ser considerado uma alternativa de madeira de qualidade que pode ser aplicada em pisos, móveis e na construção civil em geral.

Em 2011, a área de plantios de *Eucalyptus* totalizou 4.873.952 ha, representando crescimento de 2,5% (119.617 ha) frente ao indicador de 2010 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, ABRAF, 2011). O principal fator que alavancou esse crescimento foi o estabelecimento de novos plantios para atender à demanda futura dos projetos industriais do segmento de papel e celulose.

2.8 Laser

Poucos feitos científicos modernos tiveram a abrangência conquistada pelo *light amplified by stimulated emission radiation*, ou *laser*.

Este instrumento, que tem seu funcionamento baseado nas leis fundamentais da radiação luminosa e da matéria, tem encontrado, desde sua descoberta, uma vasta aplicabilidade, cobrindo desde as pesquisas científicas mais fundamentais até aplicativos na área médica. Embora suas aplicações sejam importantes, o estudo desse instrumento está longe de ser concluído e constitui uma das mais ativas áreas de investigação científica (BAGNATO, 2008).

À primeira vista, parece difícil acreditar que o *laser* seja uma luz como todas as outras, apenas com propriedades particulares. Porém, é isto mesmo que ele é: uma fonte de luz muito peculiar que, devido à forma com que gera radiação eletromagnética, acaba tendo propriedades que o caracterizam de forma muito específica.

As características de um *laser*, monocromaticidade, direcionalidade, coerência e potência, é que fazem dele um instrumento de utilização tecnológica. A propriedade monocromática é caracterizada pelo fato de a luz ser emitida em uma estreita faixa de frequência (ou comprimento de onda) que, na faixa de luz visível, apresenta apenas uma cor para o feixe (BAGNATO, 2008).

A intensidade de um *laser* é consequência da amplificação controlada, proposta por Einstein, em 1914 e só conseguida por Mainman, em 1960, e esta amplificação só é conseguida com baixa eficiência energética (HECHT, 1998).

A propriedade de direcionalidade de um *laser*, ao contrário da luz comum, é o fato de ela ser capaz de se propagar numa única direção, com uma baixa abertura do feixe. Esta propriedade é conseguida durante a amplificação da luz na cavidade onde os elétrons são estimulados e é esta propriedade que permite várias aplicações na engenharia, em especial na mira *laser* para alinhamento de máquinas, uso em topografia e termografia, bem como para a aplicação do *sunset laser* (SORAGI, 2009).

Essas e outras propriedades é que fazem do *laser* um dos instrumentos de grande aplicabilidade. Cada propriedade é interessante dentro de uma certa modalidade de aplicação.

Apesar das inúmeras aplicações tecnológicas do *laser*, não há dúvidas de que foi dentro da própria ciência que esse tipo de instrumento causou os maiores impactos. É praticamente impossível um campo das ciências experimentais que não tenha um uso para ele (BAGNATO, 2008).

Na indústria, os aplicativos para o *laser* crescem vertiginosamente. Devido às suas características de baixa divergência e muita energia concentrada, aliadas ao fato que os materiais absorvem relativamente bem esta energia, o *laser* mostra-se como um excelente instrumento de corte, servindo para fazer peças de precisão, dispositivos à base de metais ou, mesmo, como elemento de marcação. Já é comum nas indústrias brasileiras a existência de centros de

usinagem a *laser*. Inúmeros instrumentos utilizados na parte de metrologia das indústrias são, hoje, igualmente operados a *laser* (BAGNATO, 2008).

Além do seu uso como instrumento robusto de corte, o *laser* encontra também aplicação na confecção de moldes de peças. Hoje é possível programar, por meio do computador, a peça desejada, e um *laser* acoplado a um sistema de varredura produz o modelo em apenas alguns minutos. Também na indústria gráfica, por meio de impressoras de alta qualidade, o *laser* tem promovido um avanço sem precedentes (BAGNATO, 2008). Por isso, há quem diga que o *laser* é solução à procura de problemas (BAGNATO, 2001).

2.8.1 Qualificação pelo *laser*

Na busca por metodologias não destrutivas para as análises de materiais, em especial de materiais biológicos, o uso de técnicas ópticas ganha espaço a cada dia, como apresentado por Paliwal et al. (2003), Hernández-Asínchez et al. (2006), Park e Chen (1996) e Blasco et al. (2003), citados por Faria et al. (2008), fazendo uso das mais diversas ferramentas de iluminação e captura de imagens, entre elas o *laser*.

O *laser* é um tipo de luz que permite o uso de características importantes, como o caso de sua quase monocromaticidade e de sua coerência, além da capacidade de ser uma luz concentrada e altamente direcionável (Hecht, 2001).

Uma aplicação que associou o *laser* com técnicas ópticas e análise de imagens foi apresentada em distintas versões por Hu, Tanada e Ohtami, (2004), Simonaho et al. (2004) e Faria et al. (2008), para a medição da orientação das fibras (grã) da madeira de forma não destrutiva e com potencial de ser automatizada.

Silva et al. (2006) avaliaram a técnica de captura das imagens de superfícies de madeira de *Eucalyptus* sp. por meio de iluminação com *laser* de baixa potência aplicada em diferentes ângulos. As imagens foram processadas tomando como base os padrões de interferência formados na superfície do material, usando as sombras formadas pela iluminação da madeira. Os resultados de distintos ângulos foram comparados e uma análise espectral foi conduzida para caracterizar as frequências em cada perfil. Os autores concluíram que a iluminação aproximadamente paralela entre a madeira e o *laser* foi a que apresentou imagens mais bem definidas, possibilitando a visualização das cristas e relacionando-as aos distintos avanços por dentes (fz). Dessa forma, a potencialidade da técnica ficou comprovada como viável, sendo necessários desenvolvimentos para seu aprimoramento e robustez, bem como tratamento das imagens para sua mensuração. Neste caso, o melhor resultado foi explicado como sendo possível por causa das sombras produzidas pela iluminação paralela à superfície da madeira. As irregularidades periódicas da superfície iluminada resultaram em padrões de sombras que foram tratadas por técnicas de processamento e análise de imagens e de forma numérica comparadas com os parâmetros desejados.

2.9 PIV

A técnica conhecida como velocimetria por imagem de partículas, também amplamente muito referida por sua terminologia em inglês *particle image velocimetry*, ou mesmo pela sigla que representa essa terminologia, PIV, é muito empregada em áreas como a da medição de fluxo de partículas, em particular utilizando o *laser* para iluminar as partículas injetadas no fluxo em estudo. Em 1964, Yeh e Cummins utilizaram técnica do *laser doppler velocimetry* (LDV) ou *laser doppler anemometry* (LDA), que consistia em um

feixe simples dividido em outros dois de igual intensidade, os quais são focados em um mesmo ponto no campo do fluxo. Uma interferência padrão é formada no ponto onde os feixes se cruzam, definindo uma região cujo volume é conhecido. Partículas em movimento pelo volume espalham a luz que é coletada por um fotodetector. A frequência resultante da saída do fotodetector está diretamente relacionada à velocidade da partícula. Foi uma das primeiras utilizações do *laser* para a medição de propriedades do fluxo, particularmente a velocidade (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

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

Adrian e Yao, em 1985, utilizaram as técnicas de PIV e *laser speckle velocimetry* (LSV). Assentaram as bases do espalhamento de vários tipos de partículas em dois modos de velocimetria por *laser* pulsado: imagem de partícula (PIV) e *speckle* (LSV – no caso, com grande concentração de partículas semeadas no fluxo). A técnica LSV foi, à época, deixada de lado, pela grande exigência de processamento que extrapolava os equipamentos disponíveis (RODRIGUES, 2003).

O PIV teve grande desenvolvimento, sendo altamente utilizado em diversos campos, como a aeronáutica. A técnica é de grande interesse de entidades como a NASA, principalmente pela sua propriedade de ser uma técnica de medição de fluxo que não interfere no mesmo (KROTHAPALLI, 1991). Ela utiliza pequenas partículas que são adicionadas a um fluxo, e seus movimentos são medidos pela comparação de duas imagens capturadas, com um curto intervalo de tempo, de um campo do fluxo, utilizando correlação cruzada. A segunda imagem é parecida com a primeira, mas com o deslocamento das

partículas introduzidas. Com esse deslocamento e conhecendo-se o intervalo de tempo entre as duas imagens, pode-se calcular a velocidade das partículas envolvidas (MIRANDA, 2004).

a) Janelas de interrogação

As chamadas janelas de interrogação (Figura 1) são as áreas da imagem que são utilizadas para a medição do deslocamento das partículas. Elas devem ser pequenas o bastante para que o gradiente de velocidade não tenha influência significativa nos resultados, pois é nos pequenos quadrados considerados na imagem que será definido o vetor velocidade, que pode variar de 16 x 16 pixels até 64 x 64 pixels, de acordo com o problema (DOMINGOS; HACAMO; ALMEIDA, 1991).

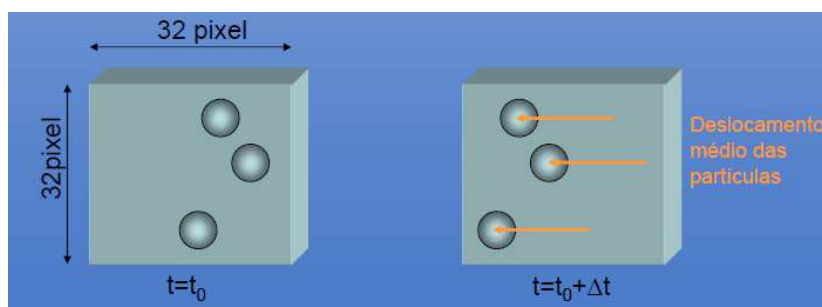


Figura 1 Janela de interrogação

b) Correlação

A operação de correlação cruzada é dada por

$$C(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N I_1(i, j) I_2(i + x, j + y)$$

em que $C(x, y)$ é a correlação no pixel (x, y) ; $I(i, j)$ é a intensidade luminosa do pixel de coordenada (i, j) e os índices 1 e 2 indicam a imagem.

Utiliza-se a transformada rápida de Fourier (FFT) da intensidade e calcula-se a correlação no domínio da frequência, tornando o cálculo da correlação mais eficiente (RAFFEL; WILLERT; KOMPENHANS, 1998).

2.10 Alguns trabalhos utilizando a PIV

A seguir, apresentam-se alguns trabalhos desenvolvidos com a técnica PIV.

2.10.1 Fluxo do fluido

Soares et al. (2012), em trabalho utilizando *biospeckle* PIV para analisar o fluxo de fluido, apresentaram um protocolo alternativo para uso da técnica PIV no líquido, controlando o fluxo de partículas externas semeadas como alvos de correlação cruzada das imagens de fluxo.

Na Figura 2, é possível observar os vetores de deslocamento/velocidade relacionados com a PIV sobre a imagem *biospeckle* na gama de 13. Os vetores apareceram sobre toda a imagem, em vez de apenas no interior do tubo e, particularmente, no meio do tubo. Esse fenômeno também era esperado, uma vez que o tubo translúcido e o fundo branco receberam a projeção do salpico do tubo, que foi o mesmo comportamento que a sombra no interior do tubo. Esse fenômeno também pode ser observado em outras aplicações na literatura, como na medição do fluxo sanguíneo, usando imagens de ultrassom (Medição de Vazão e Instrumentação, 2008) (Soares et al., 2013).

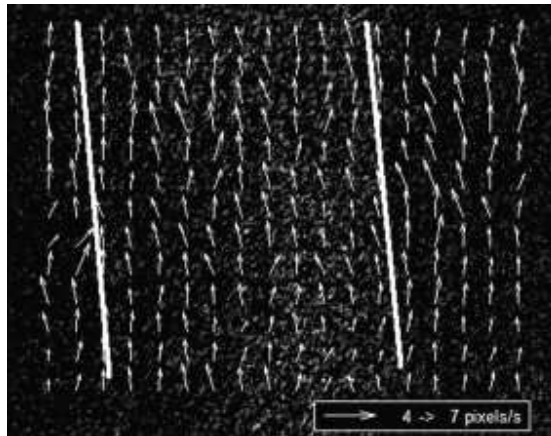


Figura 2 Vetor de velocidade do fluxo de água em um tubo após a aplicação PIV, na faixa 13
Fonte: Soares et al. (2013)

Os vetores alinhados são apresentados na Figura 3, em que é possível observar a variação dos ângulos que são restritos a uma gama de $90^\circ (\pm 30^\circ)$ em torno da direção principal). Apesar do grande alinhamento nos ângulos, uma grande variação foi observável nos vetores de velocidade, principalmente relacionada com o baixo fluxo produzido e, por conseguinte, a baixa expressão da tradução, se comparado com a turbulência causada pela pressão do fluido.

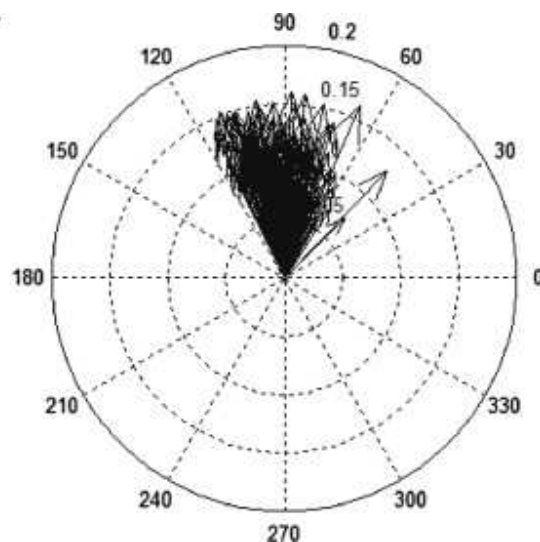


Figura 3 Ângulos de vetores de velocidade de fluxo de água em um tubo de referência para o mesmo ponto no espaço
 Fonte: Soares et al. (2013)

2.10.2 Fluxo biológico

A proposta de um protocolo para avaliar o fluxo de sinal utilizando *biospeckle* PIV foi encontrada, aqui, como o desafio principal, uma vez que o fluxo observado era extremamente pequeno, como resultado de um processo transitório apenas após a remoção de uma folha a partir da árvore. Durante a estabilização, o fluxo esperado deve ir na direção do pecíolo. Os resultados só apareceram após os três passos do protocolo, com a PIV sendo aplicada na faixa de 9 (32-34 Hz), na qual existe maior atividade observada na veia principal. A taxa de tempo de aquisição foi de 0,01 s, de modo que a maior frequência observada foi de 50 Hz (Soares et al. 2012).

O procedimento de PIV foi aplicado utilizando-se janelas de interrogação de 64×64 pixels e uma correlação cruzada foi efetuada com os

pares de imagens da faixa 9. Pode-se observar, nesta análise, que a direção de um fluxo deve ser relacionada com a regulação do fluido durante o processo de estabilização após o arrancar da folha (Figura 4). Apesar do fluxo fraco esperado, o protocolo proposto foi capaz de obter esse movimento (Soares et al. 2012).

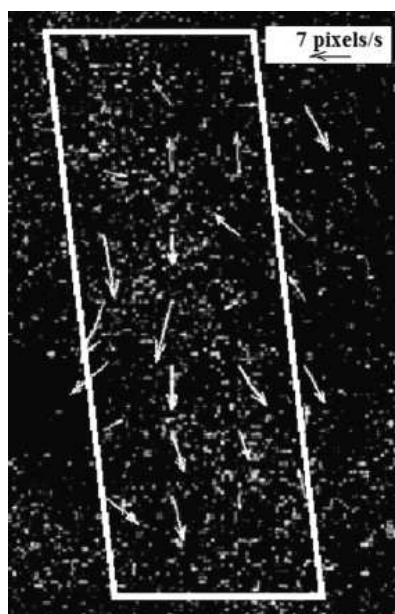


Figura 4 Resultados do fluxo biológico dentro da veia principal, com o principal vetor de velocidade com um valor de 7 pixels/s

O potencial de aplicação deste protocolo no fluxo de sangue ainda é um desafio desde o acotovelamento de corpos humanos e animais cria uma situação de perigo para adotar um acompanhamento maior tempo do que LASCA faz e,

portanto, a abordagem de frequência é usada, no entanto, nos vegetais a proposta apresenta viabilidade, que abre espaço para novas conquistas.

Os resultados confirmam essa hipótese sobre o uso de *biospeckle* associado a uma técnica PIV e ilustra um protocolo para lidar com o efeito de ebulição que enfraquece as informações de translação nos padrões do *speckle*.

2.10.3 Medições com a técnica PIV de velocidades e concentrações de fibras de madeira em transporte pneumático

Olof e Anders desenvolveram um método para medição simultânea da concentração e velocidade de fibras de madeira em suspensão no ar. A velocidade das fibras de madeira foi medida através da utilização da técnica PIV. A concentração de fibras de madeira foi medida utilizando as imagens partir da técnica PIV como dados de entrada. Uma técnica de processamento de imagem foi usada para determinar a fração de volume das partículas de fibra nas imagens. O método deu bons resultados qualitativos e quantitativos para frações de baixo volume de fibras, para frações de maior volume os resultados quantitativos foram insatisfatórios.

2.11 Técnica Sunset

Soragi (2009), em trabalho para avaliar a qualidade da superfície usinada da madeira de *Toona ciliata* M. Roem, com diferentes padrões de usinagem, e para relacionar os percentuais de qualidade por região radial da tora, utilizou o *laser* de He-Ne de comprimento de onda de 638 nm (vermelho). A iluminação e a captura de imagens foram realizadas de acordo com a configuração experimental, composta por lente de dispersão, *laser*, espelho, câmera de alta resolução para a captação das imagens e um computador (Figura 5).

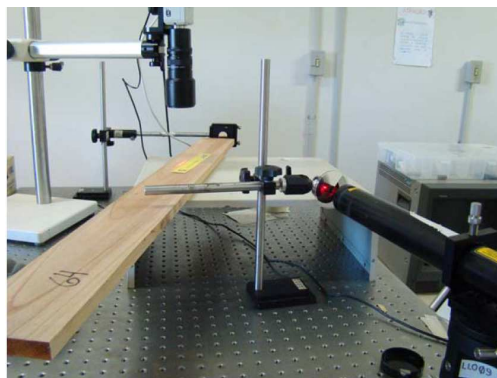


Figura 5 Configuração experimental composta pelo *laser*. Lente de dispersão, espelho, câmera e corpo de prova

O *laser* iluminava as superfícies dos corpos de prova, de forma que o feixe ficava paralelo às superfícies, similar ao fenômeno do pôr do sol em cadeias de montanhas. Assim, foi possível observar as irregularidades das superfícies iluminadas e, dessa forma, essa técnica foi denominada de *sunset laser*.

O *laser* era direcionado para o espelho que reflete a luz sobre a superfície do corpo de prova, realizando ajustes no espelho para garantir o paralelismo para obter maior definição das irregularidades na superfície iluminada. Após a captura e o tratamento das imagens, elas foram transformadas em matrizes de intensidades de cinza (8 bits).

Na Figura 6, observa-se que os pontos mais claros e mais escuros na linha do *laser* sobre a madeira representam os picos e os vales do perfil observado.

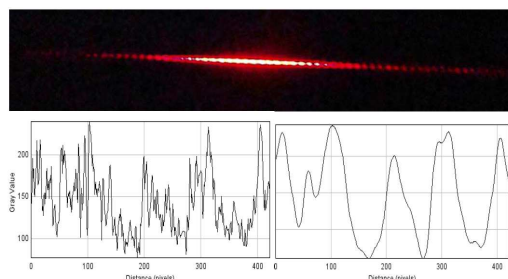


Figura 6 Iluminação da superfície usinada com o *laser* e o gráfico correspondentes sem filtro e após filtragem
 Fonte: Soragi (2009)

Apesar das imagens do *sunset laser* servirem para a determinação do perfil da usinagem, elas apresentam uma série de grãos escuros, relativos às irregularidades na superfície da madeira, que podem ser utilizados como partículas na análise da técnica de velocimetria por imagem de partículas, evitando, assim, a necessidade de pintura da madeira com as partículas. Este processo de aproveitamento das partículas do *sunset laser* permite a implementação da técnica de forma não invasiva e destrutiva.

2.12 Mecanismos físicos de deformação e ruptura da madeira

A madeira é também um meio multifase, porém de natureza orgânica, cuja estrutura básica é formada pelo arranjo de células. As paredes celulares são, por sua vez, formadas por feixes de celulose (fase cristalina) unidos pela lignina (fase não cristalina) (LEMAITRE; CHABOCHE, 1990; LEMAITRE, 1992).

No caso da madeira, as deformações elásticas são devido às deformações reversíveis das células, fortemente influenciadas pelas taxas de umidade. Como no caso do concreto, também nas madeiras é difícil separar os

mecanismos de deformação permanente dos de ruptura, seja porque as deformações permanentes macroscópicas resultam de microrupturas, seja porque, muitas vezes, a ruptura macroscópica aparece antes que deformações apreciáveis sejam produzidas (MOFFATT; PEARSALL; WULFF, 1969; LEMAITRE; CHABOCHE, 1990; LEMAITRE, 1992).

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

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira, no Departamento de Ciências Florestais, e no Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA), ambos da Universidade Federal de Lavras.

Os equipamentos do Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira foram máquina universal de ensaios mecânicos e máquinas de usinagem da madeira. Os equipamentos necessários para a execução do experimento do CEDIA foram *laser* de He-Ne (632 nm e de 5 a 17 mW), câmara CCD digital e lente com filtro.

O experimento foi realizado utilizando-se corpos de prova de dimensões 2,5 x 2,5 x 42,0 cm (COPANT 555), que foram iluminados na face radial que representava a altura (na qual ocorreu a usinagem na face radial controlada, captando as imagens com as devidas ondulações).

Os dados da Tabela 1 mostram que foram analisados 90 corpos de prova, divididos em três espécies (*Hymenolobium sericium*, *Eucalyptus* sp. e *Pinus taeda*), gerando 679 imagens (Anexo 2).

Tabela 1 Relação do experimento com quantidades de corpos de prova, imagens captadas e variações das forças aplicadas nos corpos de prova.

Espécie	<i>Hymenolobium</i>	<i>Eucalyptus sp.</i>	<i>Pinus taeda</i>	Total
	<i>sericum</i>			
Nº de corpo de prova	30	30	30	90
Nº de imagens geradas	216	253	210	679
Força aplicada (kgf)	13 a 420	2 a 352	7 a 196	

O *laser* iluminou as superfícies dos corpos de prova de forma que o feixe ficasse paralelo às superfícies, similar ao fenômeno do por do sol em cadeias de montanhas. Assim, foi possível observar as irregularidades das superfícies iluminadas.

Após a captura, as imagens foram implementadas no *Software Image J*. Foram selecionadas as imagens e as linhas de pixels perpendiculares aos picos do avanço por dente, compostas de uma variação de intensidade que foi do branco ao cinza. Os pontos mais claros representavam os picos e os mais escuros representavam os vales. As imagens foram transformadas em matrizes de frequências *Red*, *Green*, *Blue* e foi utilizada uma frequência *Green* para análise da PIV.

Foram captadas imagens com o corpo de prova sem carga e com cargas crescentes até a ruptura. Quando o corpo de prova esteve sob flexão, as imagens foram captadas na região do apoio. Essas imagens captadas em duas situações de cargas diferentes apresentaram uma deformação da segunda em relação à primeira e, por meio desta ocorrência, utilizou-se a técnica PIV .

Para a execução deste experimento foi utilizada a técnica proposta por Soragi (2009) denominada *sunset laser*.

A iluminação foi por *laser* de He-Ne de 632 nm e de 5 a 17 mW e lente de dispersão, e a captação das imagens foi por câmera digital de alta resolução e um computador.

No ensaio de flexão com a máquina de ensaio universal, o corpo de prova fica apoiado nas extremidades e a força para provocar a flexão é aplicada no seu centro.

Neste experimento (Figura 7), pretendeu-se captar imagens do centro do corpo de prova em várias fases do ensaio, sem o deslocamento do mesmo. Para que não houvesse o deslocamento do centro do corpo de prova foi necessária uma inversão na máquina de ensaio universal. Essa inversão consistiu em apoiar o corpo de prova em seu centro e a força para provocar a flexão ser aplicada nas suas extremidades.

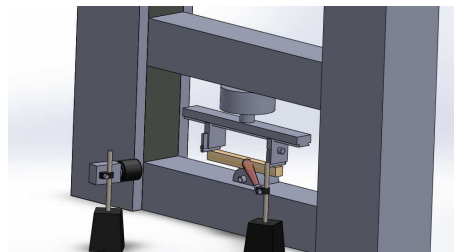


Figura 7 Configuração experimental do ensaio de flexão na máquina de ensaio universal

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Velocimetria de imagem de partícula

A seguir apresentam-se os dados qualitativos da deformação da madeira pela técnica PIV.

4.1.1 Madeira de *Hymenolobium sericum*

Na Figura 8 apresenta-se a análise do conjunto de imagens da evolução de aquisição do ensaio de flexão estática da madeira de *Hymenolobium sericum*.

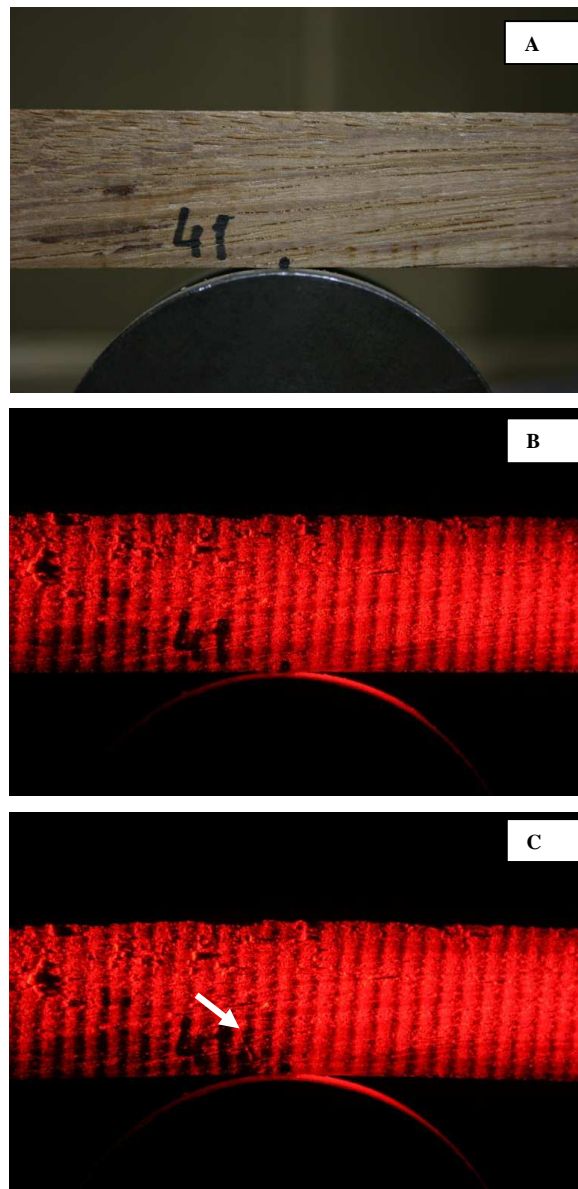


Figura 8 Evolução das imagens de aquisição do ensaio de flexão estática da madeira do *Hymenolobium sericium*, utilizando a técnica de iluminação *sunset*: **A** Imagem do sem iluminação. **B** Imagem no início do ensaio, força aplicada: 17 kgf; **C** Imagem iluminada na ruptura, força aplicada: 319 kgf

A evolução de aquisição do ensaio de flexão estática por meio da técnica de iluminação *sunset laser* é apresentada na Figura 8. Para uma certa quantidade de forças aplicadas foram coletadas imagens, das quais extraíram-se os dados para a implementação da técnica PIV para criar os mapas de deformação. No Anexo 1, Figura 1A constam todos os momentos do ensaio de flexão.

Na Figura 8A apresenta-se a madeira de *Hymenolobium sericium* sem a criação das franjas e, nas Figuras 8B e 8C, a madeira com criação das franjas pelo *sunset laser*, na aplicação de uma força de 17 kgf e 319 kgf, respectivamente. Na Figura 8C, na qual se mostra quando a força aplicada foi de 319 kgf, pode-se observar o início da ruptura.

O comportamento dos vetores de deformação da madeira de *Hymenolobium sericium*, gerados pela combinação das imagens, pode ser observado na Figura 9.

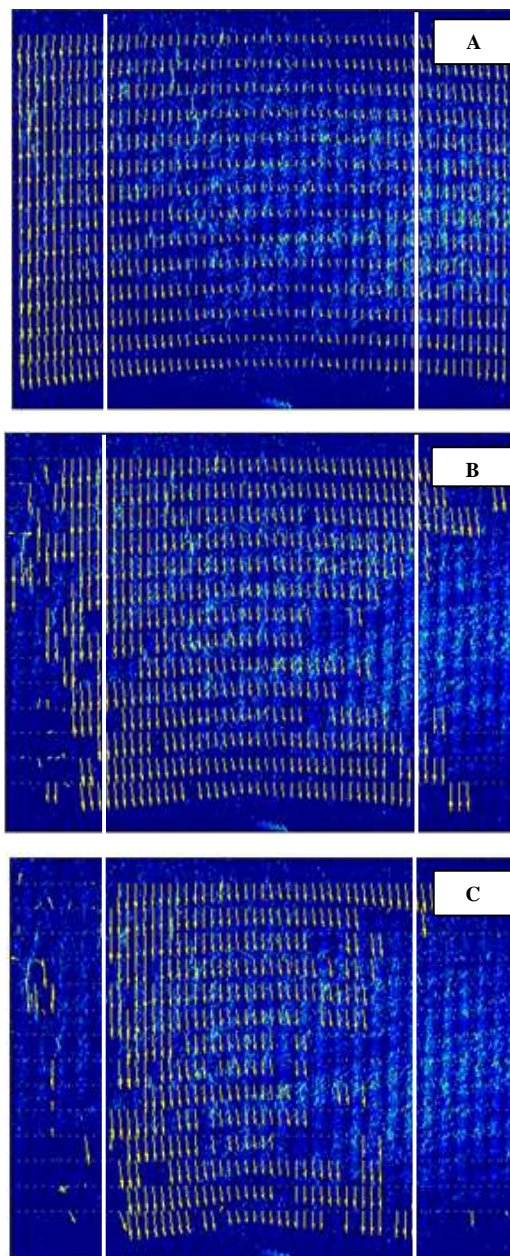


Figura 9 Comportamento dos vetores da deformação da madeira do *Hymenolobium sericium*, gerados pela combinação das imagens com forças aplicadas de: **A** 44 kgf e 135 kgf; **B** 44 kgf e 387 kgf; **C** 44 kgf e 416 kgf

Na Figura 9 A é possível observar a comparação entre a deformação produzida pela carga de 44 kgf com a da carga de 135 kgf. Os diversos grãos presentes na projeção do *sunset laser*, associados à presença de franjas, formam a base para a correlação promovida pelo PIV, que informa, visualmente, a direção dos deslocamentos. No Anexo 1, Figura 3A constam todas as combinações do comportamento dos vetores de deformação gerados pela aplicação de forças.

Na Figura 9A também é possível observar que o PIV captou a deformação da madeira em todas as regiões. Tal deformação é devido à presença de uma força de tração que, por sua vez, é mais evidente nas laterais do que no centro, já que nas laterais o deslocamento entre os pontos analisados é maior.

Na Figura 9B observa-se que o PIV captou a deformação nas laterais do ponto de apoio, perdendo a correlação devido ao fato de o deslocamento dos pontos ser maior que a janela de interrogação de análise da técnica PIV.

Na Figura 9C, de acordo com a teoria da elasticidade, o deslocamento devido à deformação aumenta à medida que se afasta do ponto de apoio, o que é confirmado pela lei de Hook (teoria da elasticidade). Observa-se que a madeira está no seu regime de plasticidade, em que inicia a ruptura na região comprimida.

Na Figura 10 apresenta-se o gráfico de quantificação da deformação do *Hymenolobium sericium*.

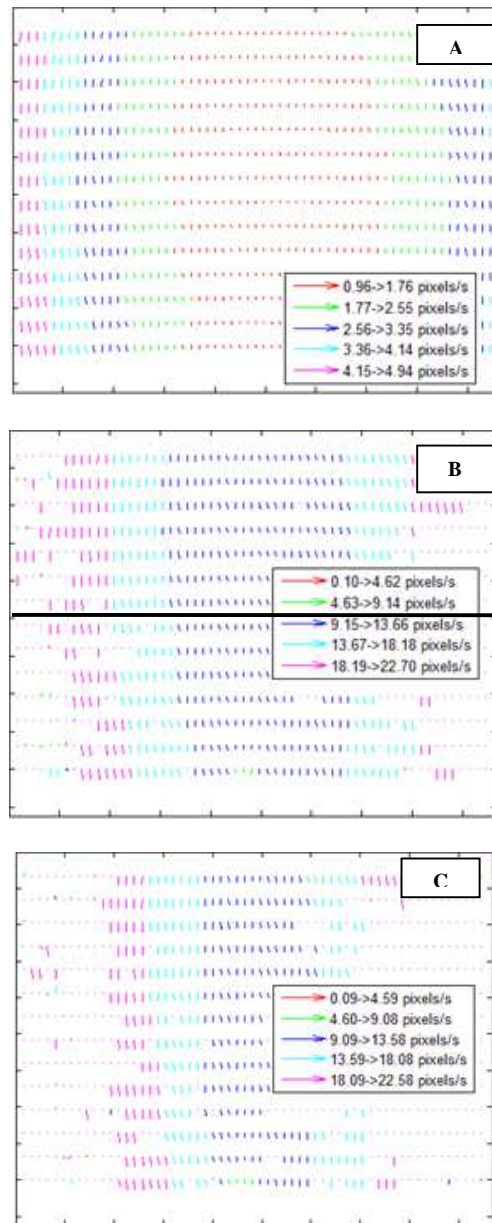


Figura 10 Gráfico de quantificação da deformação da madeira do *Hymenolobium sericium*, gerado pela combinação das imagens com forças aplicadas de: **A** 44 kgf e 135 kgf; **B** 44 kgf e 387 kgf; **C** 44 kgf e 416 kgf

A quantificação da deformação que aumenta à medida que se afasta do ponto de apoio é demonstrada na Figura 10A. Observa-se que a deformação na região central é menor que nas laterais. No Anexo 1, Figura 4A constam todos os gráficos de combinações do comportamento de quantificação da deformação da madeira gerado pela aplicação de forças.

Na Figura 10B observa-se que tanto na região tracionada quanto na comprimida os vetores têm o mesmo comportamento. Na Figura 10C, na região comprimida, quando ocorre a ruptura, há uma deformação, impossibilitando a captura da correlação do PIV nas extremidades da imagem.

Na Figura 11 observa-se o gráfico de tensão x deformação da madeira de *Hymenolobium sericium*.

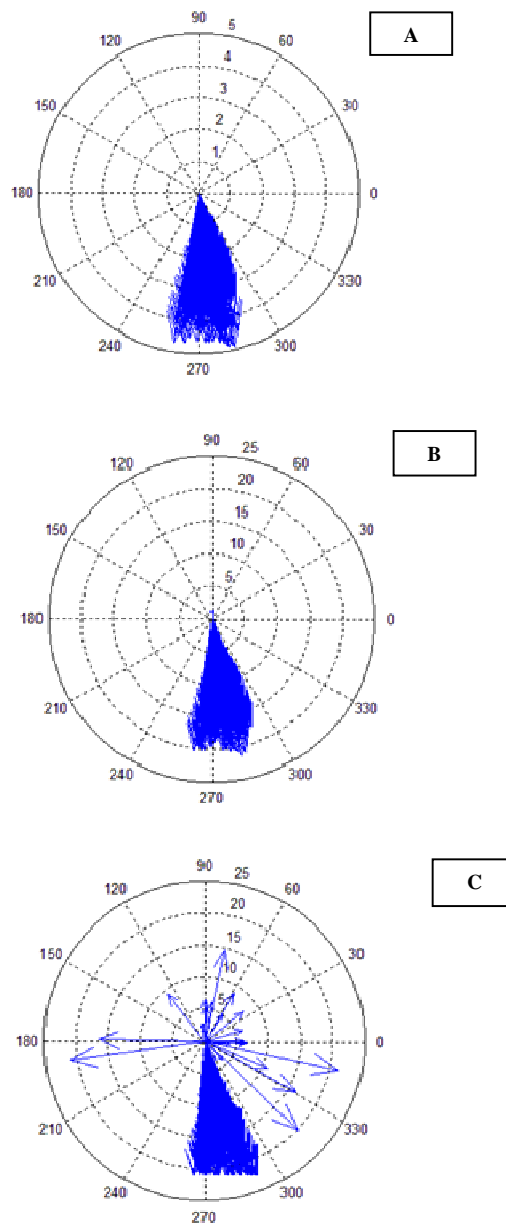


Figura 11 Gráfico de tensão x deformação da madeira do *Hymenolobium sericium*, gerado pela combinação das imagens com forças aplicadas de: **A** 44 kgf e 135 kgf; **B** 44 kgf e 341 kgf; **C** 44 kgf e 416 kgf

Analisando-se a Figura 11 do gráfico de tensão x deformação, observa-se a direção dos vetores da técnica PIV, mostrando uma grande coerência com os resultados obtidos no ensaio, pois os vetores apresentam um comportamento condensado na região elástica, como pode ser observado na Figura 11A. À medida que o corpo de prova é solicitado, ele vai se condensando cada vez mais, como demonstrado na Figura 11B. Já na Figura 11C, verifica-se uma dispersão não padronizada de uma parte dos vetores, indicando a existência de uma trinca que caracteriza o início da região da ruptura. Essa trinca só pode ser visualizada como mostrado nos resultados da técnica PIV.

Na Figura 11C nota-se que o gráfico mostra o início da ruptura antes da observação visual como também da imagem (Figura 8C) captada pela técnica de iluminação *sunset*. No Anexo 1, Figura 2A, constam todos os gráficos de tensão x deformação da madeira, gerado pelas combinações das imagens com aplicação de diversas forças.

4.1.2 Madeira de *Eucalyptus* sp.

Na Figura 12 apresenta-se a evolução das imagens captadas do ensaio de flexão estática da madeira de *Eucalyptus* sp.

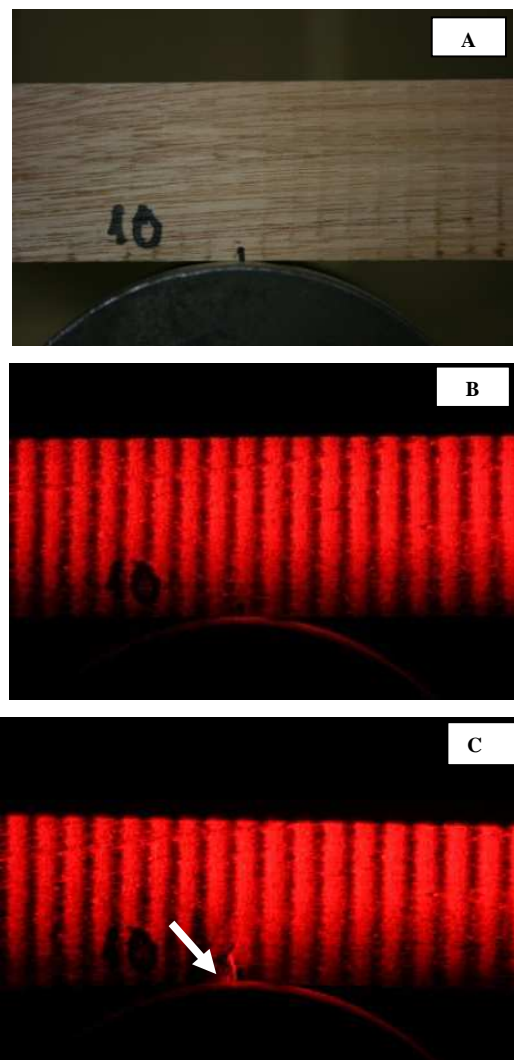


Figura 12 Evolução das imagens captadas do ensaio de flexão estática da madeira de *Eucalyptus* sp, utilizando a técnica de iluminação *sunset*. **A** sem iluminação; **B** iluminado no início do ensaio, força aplicada 21 kgf; **C** iluminado na ruptura, força aplicada 343 kgf

Conforme se observa na Figura 12, três momentos da evolução de aquisição das imagens do ensaio de flexão estática por meio da técnica de iluminação *sunset laser* são apresentados. Para certa intensidade de força aplicada, foram coletadas imagens, das quais foram extraídos os dados para a aplicação da técnica PIV, possibilitando a criação dos mapas vetoriais de deformação. No anexo 1, Figura 1B constam todos os momentos do ensaio de flexão.

Na Figura 12A apresenta-se a madeira de *Eucalyptus* sp sem a criação das franjas e, nas Figuras 12B e 12C, as amostras são apresentadas com a formação das franjas pelo *sunset laser*, com aplicação de uma força de 21 kgf e 343 kgf, respectivamente. Na Figura 12C, quando a força aplicada foi de 343 kgf, pode-se observar o início da ruptura.

Na Figura 13 observa-se o comportamento dos vetores de deformação da madeira de *Eucalyptus* sp, gerados pela combinação das imagens.

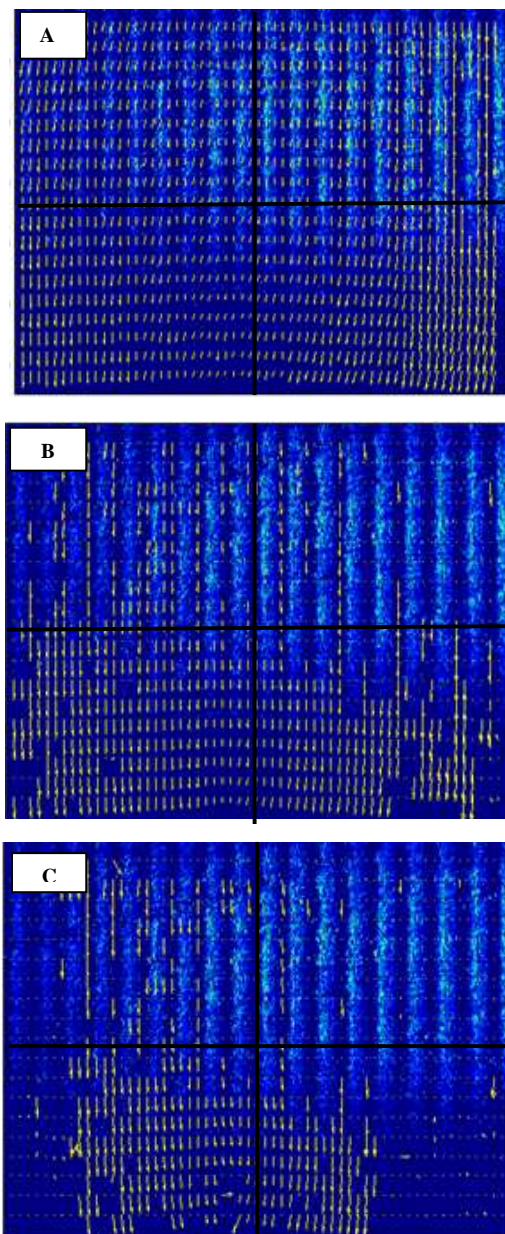


Figura 13 Gráficos do comportamento dos vetores da deformação da madeira de *Eucalyptus* sp, gerados pela combinação das imagens com forças aplicadas de: **A** 21 kgf e 68 kgf; **B** 21 kgf e 308 kgf; **C** 21 kgf e 343 kgf

Na Figura 13A é possível comparar a deformação produzida pela carga de 21 kgf e pela carga de 68 kgf. A técnica *sunset laser* proporcionou um quadro favorável para aplicação da técnica PIV, que informa a direção e o sentido dos deslocamentos evidenciado pelas franjas e grãos provenientes da iluminação. No Anexo 1, Figura 3B constam todas as combinações dos comportamentos dos vetores de deformação gerados pela aplicação de forças.

Na Figura 13A é possível observar que a técnica PIV captou a deformação da madeira em todas as regiões, indicando uma deformação de redução devido à compressão. Na Figura 13B observa-se que a PIV captou a deformação na região comprimida nos quadrantes 3 e 4, sendo que, na região tracionada, observa-se que ela já perdeu uma parte da correlação, indicando que a deformação à tração foi maior do que a compressão na fase plástica.

Na Figura 13B pode-se observar que os vetores indicam que, na região comprimida nos quadrantes 3 e 4, a deformação é menor que na região tracionada, apesar de a ruptura na região comprimida se dar antes dela.

Nos quadrantes 1 e 2 e, de acordo com a teoria da elasticidade, o deslocamento devido à deformação aumenta à medida que se afasta do ponto de apoio, o que é confirmado pela Lei de Hook (teoria da elasticidade). Pode-se observar que a força na madeira atingiu o seu regime de plasticidade.

Na Figura 13C nota-se que houve uma perda significativa dos vetores produzidos pela PIV, devido ao início da ruptura na região tracionada.

O gráfico de quantificação da deformação da madeira de *Eucalyptus* sp, gerado pela combinação de imagens, é mostrado na Figura 14.

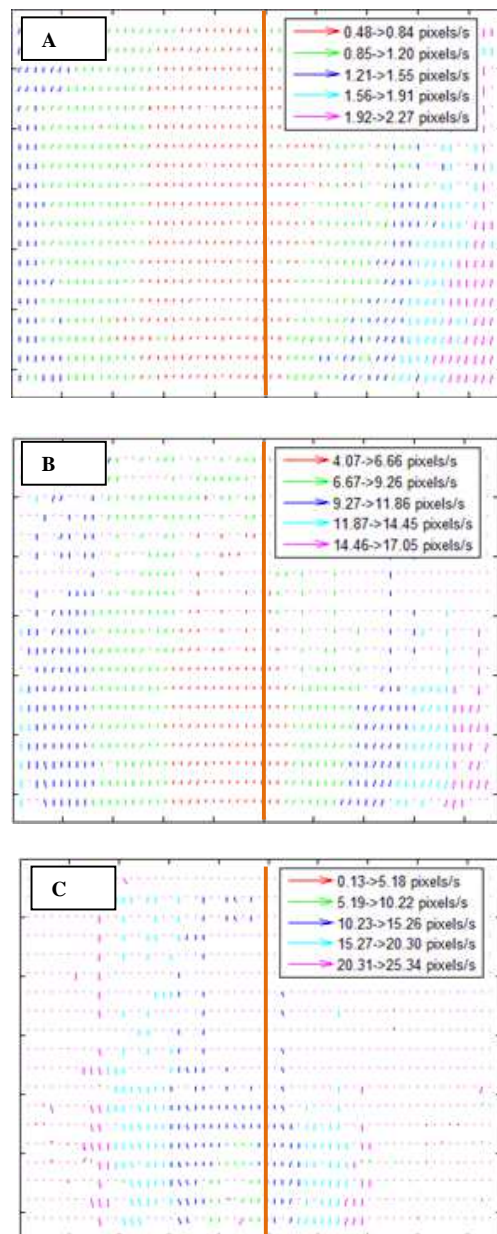


Figura 14 Gráfico de quantificação da deformação da madeira de *Eucalyptus* sp gerada pela combinação das imagens com forças aplicadas de: **A** 21 kgf e 68 kgf; **B** 21 kgf e 262 kgf; **C** 21 kgf e 343 kgf

Na Figura 14A observa-se que a quantificação da deformação aumenta à medida que se afasta do ponto de apoio. Numa fase inicial, a deformação na região comprimida é maior que na tracionada, como mostra a barra de divisão. No anexo 1, Figura 4B, constam todos os gráficos de combinações do comportamento de quantificação da deformação da madeira, gerados pela aplicação de forças.

Na Figura 14B, na fase de escoamento, a região tracionada apresentou uma deformação maior devido ao enfraquecimento desta região, provocado pelo deslocamento da linha neutra em direção à borda tracionada.

Na região tracionada, quando ocorre a ruptura, há uma deformação excessiva, impossibilitando a captura pela técnica PIV, já que, nesse momento, ocorre perda de correlação entre os grãos na janela de interrogação em estudo (Figura 14 C). Essa ruptura é evidenciada na imagem pelo deslocamento da linha neutra, no sentido da borda da região tracionada.

O gráfico de tensão x deformação da madeira de *Eucalyptus* sp, gerado para a combinação de imagens com aplicação de forças, é mostrado na Figura 15.

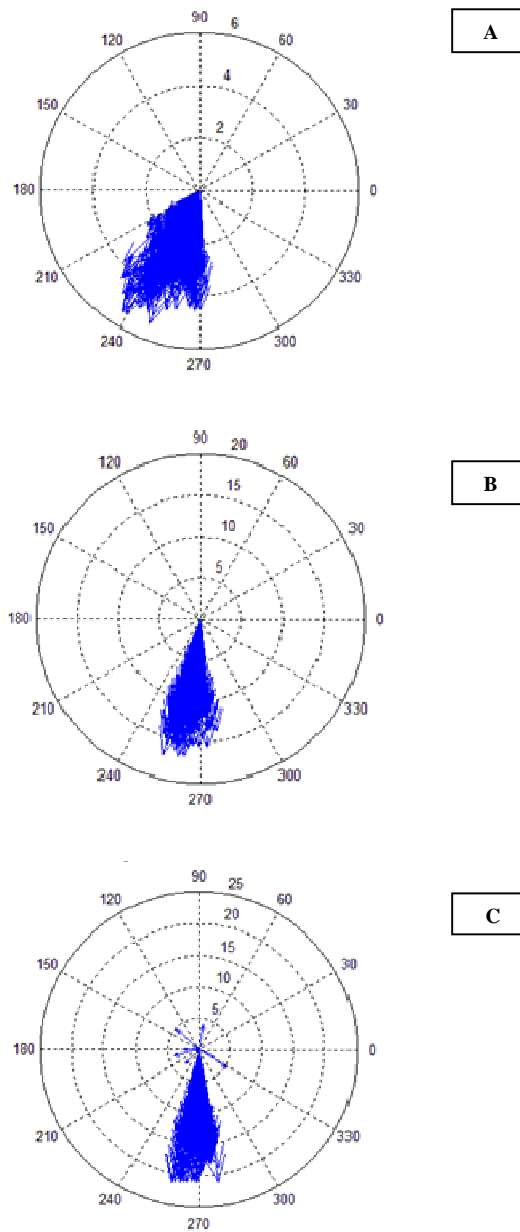


Figura 15 Gráfico de tensão x deformação da madeira de *Eucalyptus* sp gerado pela combinação das imagens com forças aplicadas de: **A** 21 kgf e 123 kgf; **B** 21 kgf e 262 kgf; **C** 21 kgf e 308 kgf

Analisando-se, na Figura 15, o gráfico de tensão x deformação, observa-se a direção dos vetores da técnica PIV, verificando-se uma grande coerência com os resultados obtidos no ensaio, pois os vetores apresentam um comportamento condensado na fase elástica (Figura 15A). À medida que a força aumenta no corpo de prova, o gráfico vai se condensando cada vez mais (Figura 15B). Já na Figura 15C, verifica-se uma dispersão não padronizada de uma parte dos vetores, indicando a existência de uma trinca, o que caracteriza o início da ruptura, antes da observação visual, como também da imagem captada pela técnica de iluminação *sunset*.

No anexo 1, Figura 2B, constam todos os gráficos de tensão x deformação da madeira gerado pelas combinações das imagens com aplicação de diversas forças.

4.1.3 Madeira de pinus

A análise do conjunto de imagens referente à evolução de aquisição do ensaio de flexão estática da madeira de pinus é apresentada na Figura 16.

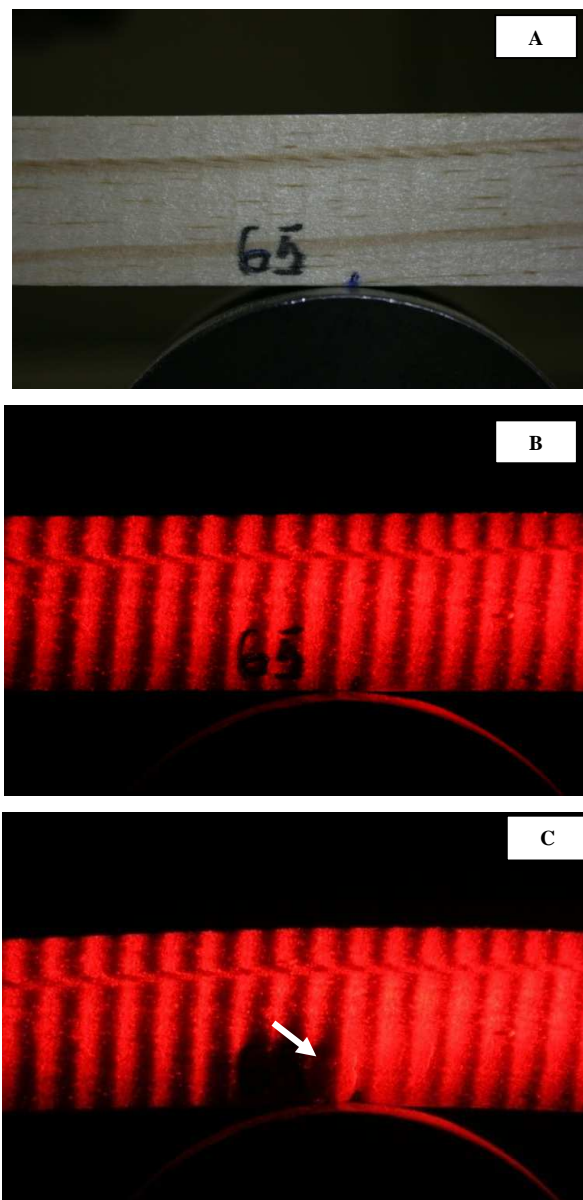


Figura 16 Evolução das imagens de aquisição do ensaio de flexão estática da madeira do pinus, utilizando a técnica de iluminação *sunset*. **A** Imagem sem iluminação; **B** Imagem com força aplicada 16 kgf; **C** Imagem com força aplicada de 189 kgf

A evolução de aquisição do ensaio de flexão estática por meio da técnica de iluminação *sunset laser* é apresentada na Figura 16, tendo, para certa quantidade de forças aplicadas, sido coletadas imagens das quais foram extraídos os dados para a implementação da técnica PIV para criar os mapas de deformação. No Anexo 1, Figura 1C, constam todos os momentos do ensaio de flexão.

Na Figura 16A apresenta-se a madeira de pinus sem a criação das franjas e, nas Figuras 16B e 16C, a madeira com criação das franjas pelo *sunset laser*, na aplicação de uma força de 16 kgf e 189 kgf, respectivamente. Na Figura 16C mostra-se quando a força aplicada foi de 189 kgf, pode-se observar o início da ruptura.

O comportamento dos vetores de deformação da madeira do pinus pode ser observado na Figura 17.

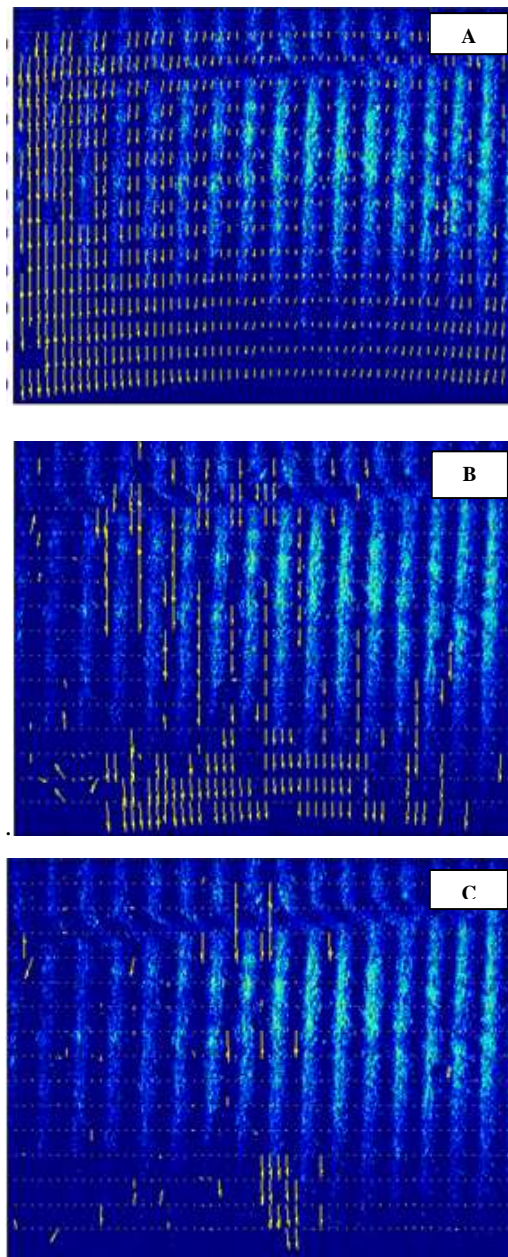


Figura 17 Gráficos do comportamento dos vetores da deformação da madeira do pinus, gerado pela combinação das imagens da com forças aplicadas de: **A** 16 kgf e 105 kgf; **B** 16 kgf e 171 kgf; **C** 16 kgf e 189 kgf

Na Figura 17A é possível observar a comparação entre a deformação produzida pela carga de 16 kgf com a carga de 105 kgf. Os diversos grãos presentes na projeção do *sunset laser*, associados à presença de franjas, formam a base para a correlação promovida pelo PIV, que informa, visualmente, a direção dos deslocamentos. No Anexo 1, Figura 3C, constam todas as combinações do comportamento dos vetores de deformação, gerados pela aplicação de forças.

Na Figura 17A é possível observar que o PIV captou a deformação da madeira em todas as regiões, indicando uma deformação maior à direita do apoio do corpo de prova. Também nesta região, indica que os deslocamentos na parte comprimida foram no sentido do ponto de apoio, mostrando uma redução de dimensão. Na Figura 17B observa-se que o PIV captou a deformação na região comprimida nos quadrantes 3 e 4, e, na região tracionada, observa-se que o PIV já perdeu a correlação, o que significa que a deformação a tração foi maior do que a compressão. A perda da correlação na região tracionada se deve ao deslocamento da linha neutra e à aproximação da borda tracionada para a borda comprimida. Na Figura 17B é possível observar que o PIV captou a deformação nas laterais do ponto de apoio, perdendo a correlação devido ao fato de o deslocamento dos pontos ser maior que a janela de interrogação de análise da técnica PIV. Na Figura 17C nota-se que houve uma perda dos vetores produzidos pelo PIV, onde se inicia a ruptura na região tracionada.

O gráfico de quantificação da deformação da madeira de pinus encontra-se na Figura 18.

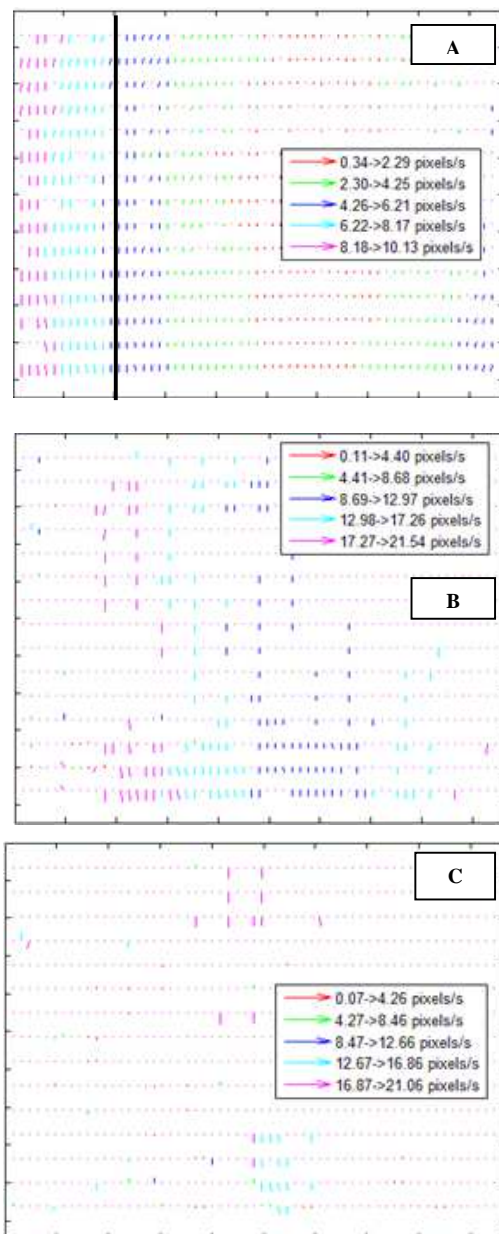


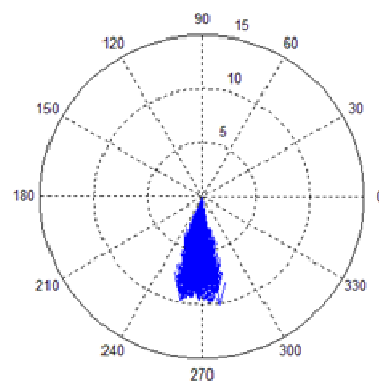
Figura 18 Gráfico de quantificação da deformação da madeira de pinus, gerado pela combinação das imagens com forças aplicadas de: **A** 16 kgf e 105 kgf; **B** 16 kgf e 150 kgf; **C** 16 kgf e 189 kgf

Na Figura 18 A mostra-se que a quantificação da deformação aumenta à medida que se afasta do ponto de apoio. Numa fase inicial, a deformação tem o mesmo comportamento na região comprimida e na região tracionada. No anexo 1, Figura 4C, constam todos os gráficos de combinações do comportamento de quantificação da deformação da madeira, gerados pela aplicação de forças.

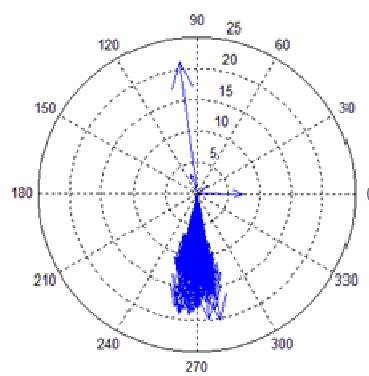
Na Figura 18B, na fase de escoamento, a região tracionada apresentou um deslocamento maior, devido ao esmagamento contínuo da parte comprimida, havendo, inclusive, uma mudança da linha neutra.

Na região tracionada, quando ocorre a ruptura, há uma deformação excessiva, impossibilitando a captura da correlação do PIV (Figura 18 C). Essa ruptura se dá devido ao fato de a linha neutra se deslocar no sentido da borda da região tracionada.

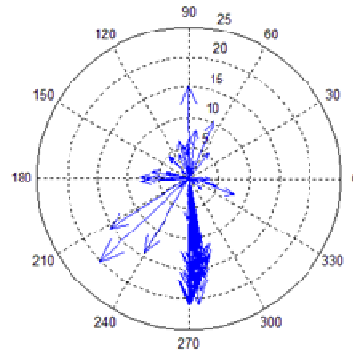
O gráfico de tensão x deformação da madeira de pinus é mostrado na Figura 19.



A



B



C

Figura 19 Gráfico de tensão x de formação da madeira do pinus, gerado pela combinação das imagens com forças aplicadas de: **A** 16 kgf e 105 kgf; **B** 16 kgf e 150 kgf; **C** 16 kgf e 189 kgf

Analisando-se a Figura 19, do gráfico de tensão x deformação, observa-se a direção dos vetores da técnica PIV, mostrando grande coerência com os resultados obtidos no ensaio, pois os vetores apresentam um comportamento condensado na região elástica, como pode ser observado na Figura 19A. À medida que ele é flexionado, vai se condensando cada vez mais, como se observa na Figura 19B. Já na Figura 19C, verifica-se uma dispersão não padronizada de uma parte dos vetores, indicando a existência de uma trinca que caracteriza o início da ruptura. Essa trinca só pode ser visualizada como mostrado nos resultados da técnica PIV. No anexo 1, Figura 2C, constam todos os gráficos de tensão x deformação da madeira, gerados pelas combinações das imagens com a aplicação de diversas forças.

4.2 Relação força X deformação da madeira

A técnica do *sunset laser*, associada à PIV, pode ser também utilizada para se obter um valor numérico para a deformação. Assim, seria possível associar valores qualitativos a quantitativos. Conforme pode ser observado na Figura 20, as duas curvas que representam as cristas e os vales obtidos pela técnica *sunset laser* (utilizada para o cálculo do mapa de deformação da madeira em função da força aplicada) são comparadas e mostram que ocorre um defasamento das mesmas. O defasamento pode ser utilizado como medida relacionada ao grau de deformação presente e, conseqüentemente, relacionado à força aplicada. Esta técnica apresenta-se como uma proposta para trabalho futuro, utilizando-se dados obtidos por meio das técnicas Sunset-PIV.

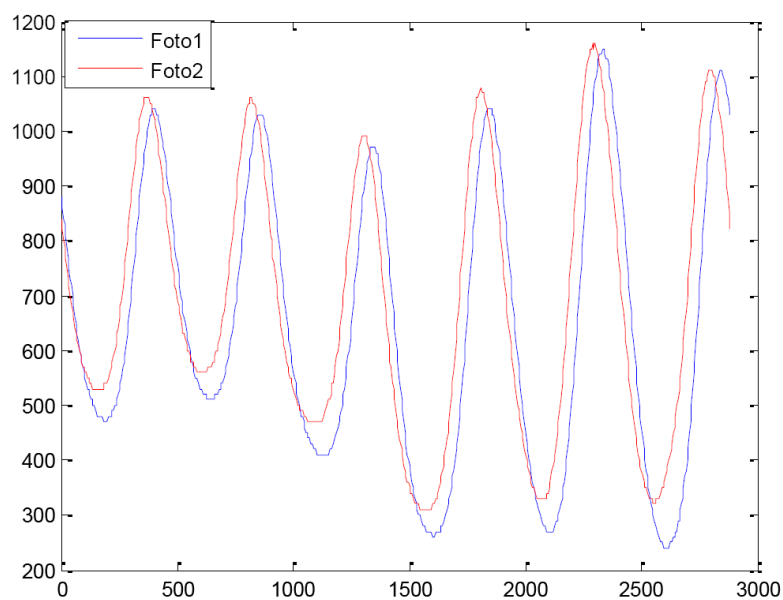


Figura 20 Comparativo de dois perfis representando as cristas e os vales obtidos nas imagens do *sunset laser* em uma amostra de madeira submetida a duas forças distintas

O cálculo do defasamento pode ser realizado pelos valores médios presentes, como, por exemplo, nas alturas médias de cada período, bem como calculando-se o valor eficaz da integral das diferenças dos defasamentos ao longo dos perfis analisados. Estes valores podem, então, ser relacionados à força aplicada e, conseqüentemente, à deformação.

5 CONCLUSÃO

O potencial do uso da técnica de velocimetria por imagem de partículas associada à técnica do *sunset laser* para criar mapas de deformação em duas dimensões de amostras de madeira sob deformação controlada foi comprovado.

Os mapas de deformação comprovaram os fenômenos esperados em um corpo de prova de madeira sob deformação, contribuindo para a caracterização de madeiras com propostas de método de ensaio para a determinação das características mecânicas, de resistência e de elasticidade da madeira de *Hymenolobium sericium*, *Eucalyptus* sp e *pinus*.

Os resultados mostraram que a técnica pode ser aplicada com sucesso para o estudo da deformação de sólidos e foi possível observar que esta é uma técnica eficiente em análises de deformações de madeiras.

REFERÊNCIAS

- ARGANBRIGHT, D. G. Influence of extractives on bending strength of redwood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 2, n. 4, p. 367-372, 1971.
- ASSIS, T. F. de; Melhoria genética de Eucalyptus sp. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 19, n. 185, p. 32-51, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. Disponível em: <<http://abende.org.br>>. Acesso em: 6 set. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de madeira**: NBR 7190. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário ABRAF**. 2011. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12-BR.pdf>> Acesso em: 15 dez. 2012.
- BAGNATO, V. S. **Laser e suas aplicações em ciência e tecnologia**. São Paulo, 2008. 87 p.
- BAGNATO, V. S. Os fundamentos da luz – *Laser*. **Física na Escola**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 4-9, out. 2001.
- CARREIRA, M. R. et al. **Avaliação de técnicas não destrutivas aplicadas à madeira de Pinus sp.** Rio de Janeiro: PANNDT, 2003.
- COSTA, T. G. M. **Os Eucalyptus sps no planejamento da política florestal brasileira**. São Paulo: Estrada de Ferro Central do Brasil, 1961. 7 p.
- DOMINGOS, B.; HACAMO, I.; ALMEIDA, S. **Métodos de medição de velocidade**. Instituto Superior Técnico, 1991. p. 35. Disponível em: <<http://in3.dem.ist.utl.pt/laboratories/01slides/3.pps>>. Acesso em: 22 mar. 2012.
- FARIA, R. O. et al. Reliability of wood grain orientation measurements using *laser* illumination. **Biosystems Engineering**, Edinburgh, v. 100, n. 4, p. 479-485, 2008.

FEIO, A.; LOURENÇO, P. B. **Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos**. Praga: Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil, 2005. 23 p.

FLYNN, R. **Competition from Southern hemisphere plantation forests**. 2003. Disponível em: <<http://www.wri-itd.com>>. Acesso em: 20 fev. 2013.

GAIOTTO, M. R. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urophylla* para produção de lâminas**. 1993. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1993.

HECHT, E. **Optics**. 3rd ed. Massachusetts: A. Wesley, 1998.

HECHT, E. **Optics**. 4rd ed. Massachusetts: A. Wesley, 2001. 680 p.

HU, C.; TANADA, C.; OHTAMI, T. Online determination of the grain angle using ellipse analysis of the *laser* light scattering pattern image. **Journal of Wood Science**, v. 50, n. 4, p. 321-326, Aug. 2004.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ JUNIOR, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer, 1968. v. 2, 674 p.

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

LIMA, J. T. **Clonal variation in the solid wood properties of *Eucalyptus***. 1999. 276 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira)-University of Wales, Bangor, 1999.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mechanics of Materials**. 1990. **Cambridge University Press**, Cambridge.

LEMAITRE, J.: **A Course on Damage Mechanics**, **Springer-Verlag**, 1992.

MATOS, J. L. M. de. **A produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda***. 1997. 117f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MARCHIORI, J. N. C. **Dentologia da gimnosperma**. Santa Maria: UFSM, 1995.

MINÁ, A. J. S. et al. Avaliação não destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 188-196, jun. 2004.

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

MOFFATT, W.G. et al. Structuur. **Het Spectrum**. p. 201. 1969

MORALES, E. A. M. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira: proposta para simplificação de procedimentos metodológicos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais)-Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2002.

OLIVEIRA, F. G. R. et al. Influência da seção transversal na velocidade ultrassônica na madeira de *Eucalyptus Citriodora*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 197-203, abr./jun. 2005.

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

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

SIMONAHÓ, S.P. et al. Determination of Wood grain direction from laser light scattering pattern. **Optics and Lasers in Engineering**, 41., p.95-103, 2004

SILVA, J. R. M. et al. A utilização do rugosímetro na qualificação de superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus sp.* In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais**. São Pedro: EBRAMEM, 2006.

SILVA, J. R. M. et al. Interação da luz *laser* para a avaliação da textura de madeiras nativas e de *eucalyptus grandis*. W. Hill ex. Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 167-175, 2005.

SOARES, R. R. et al. Biospeckle PIV (Particle Image Velocimetry) for analyzing fluid flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, Guilford, v. 30, p. 90-98, abr. 2013.

SORAGI, L. C. **Qualidade de superfícies usinadas em madeira de Toona Ciliata M.Roem.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

STANGERLIN, D. M. et al. Obtenção do módulo de elasticidade em madeiras de patagonula americana e araucaria angustifolia por meio do método ultrasonoro. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, n. 11, p. 1-15, fev. 2008.

ANEXOS

Anexo 1 Imagens dos experimentos

A – *Hymenolobium sericum*

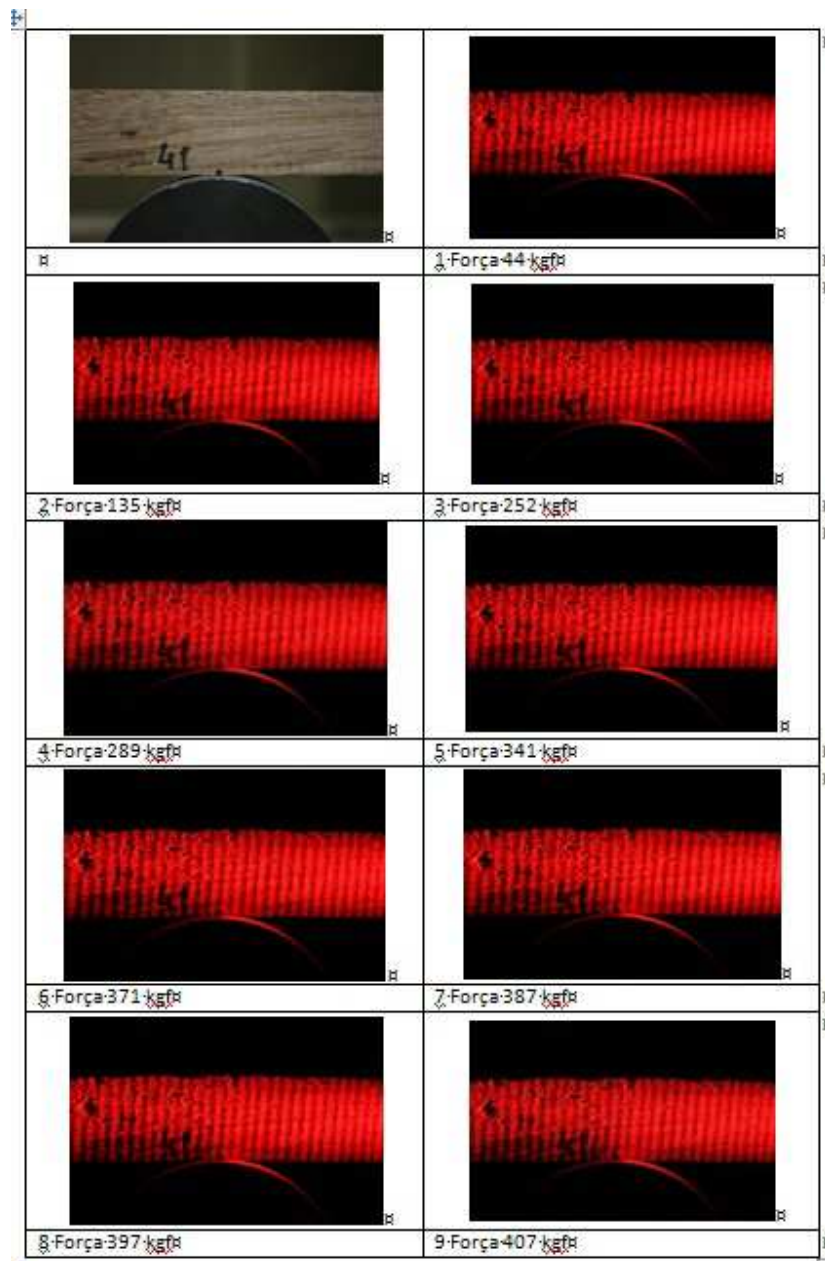


Figura 1A Evolução das imagens de aquisição do ensaio de Flexão Estática utilizando a técnica de Iluminação *Sunset*

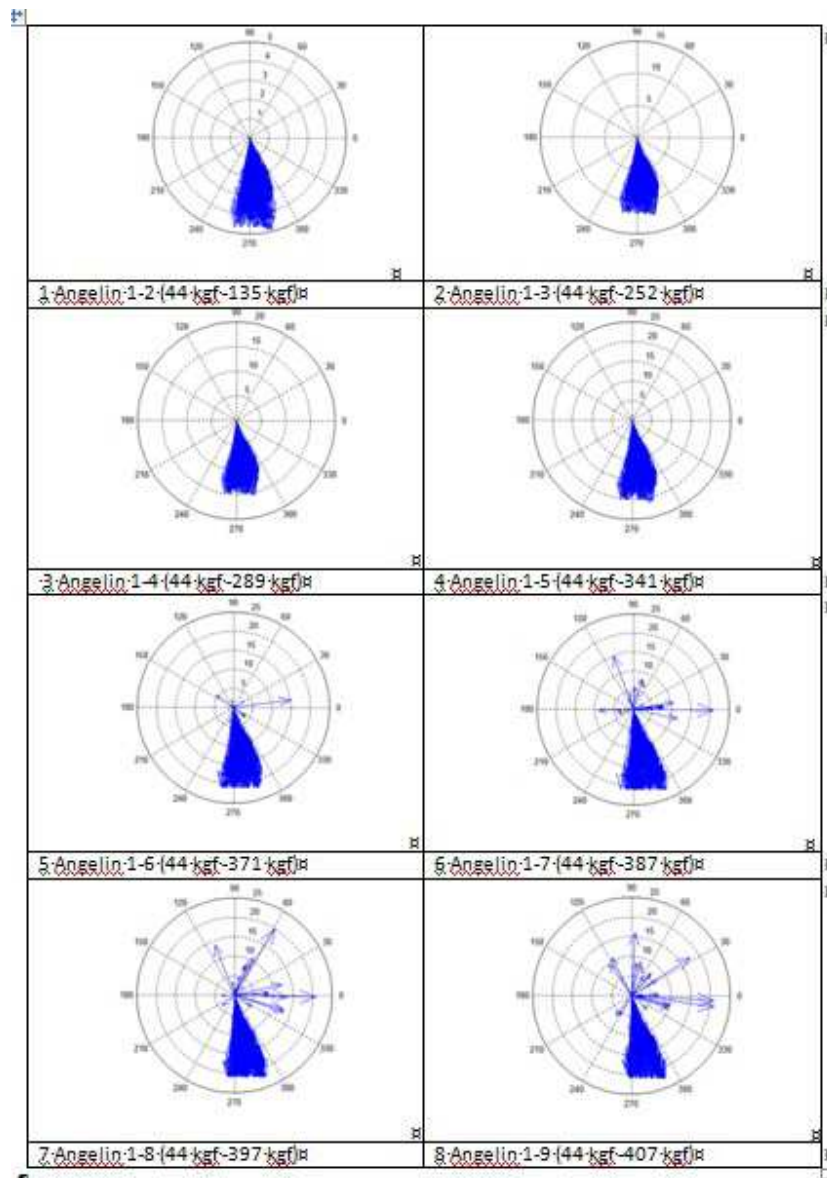


Figura 2A Gráfico de Tensão X Deformação gerado pela combinação das imagens da Figura 1A

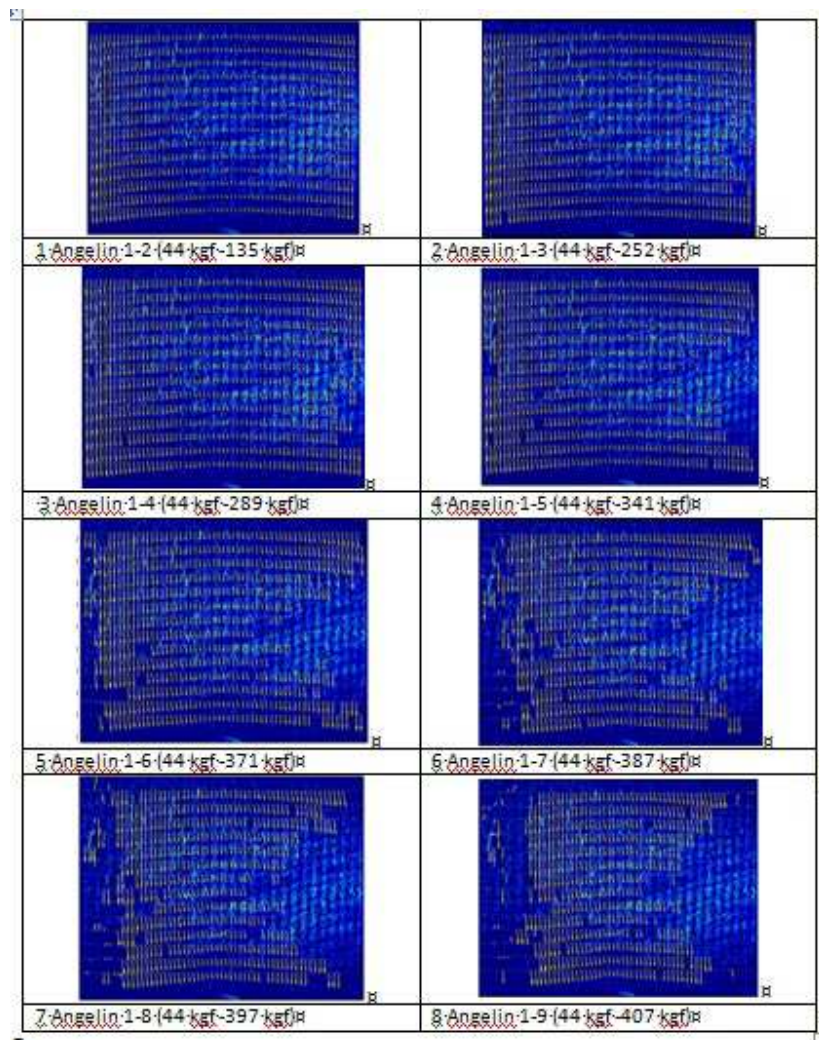
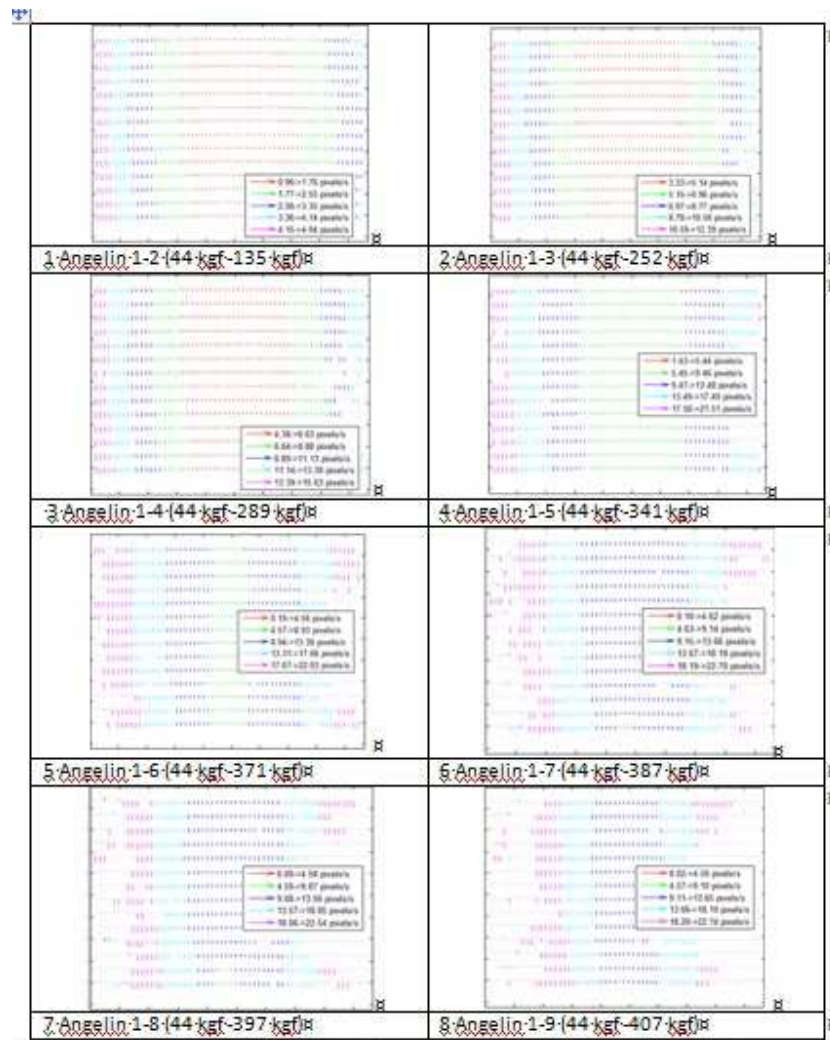


Figura 3A Gráficos do comportamento dos vetores da deformação da madeira gerado pela combinação das imagens da Figura 1A



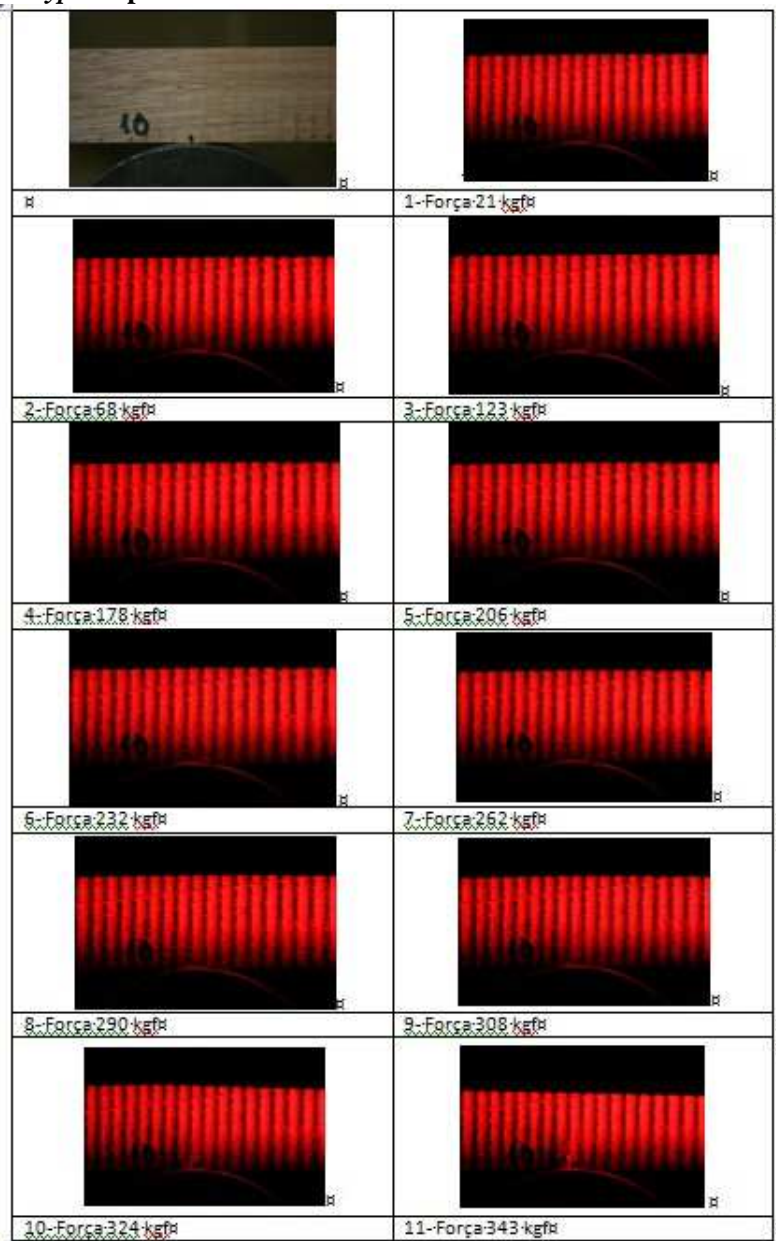
B – *Eucalyptus* sp

Figura 1B Evolução das imagens de aquisição do ensaio de Flexão Estática do *Eucalyptus* sp utilizando a técnica de Iluminação *Sunset*

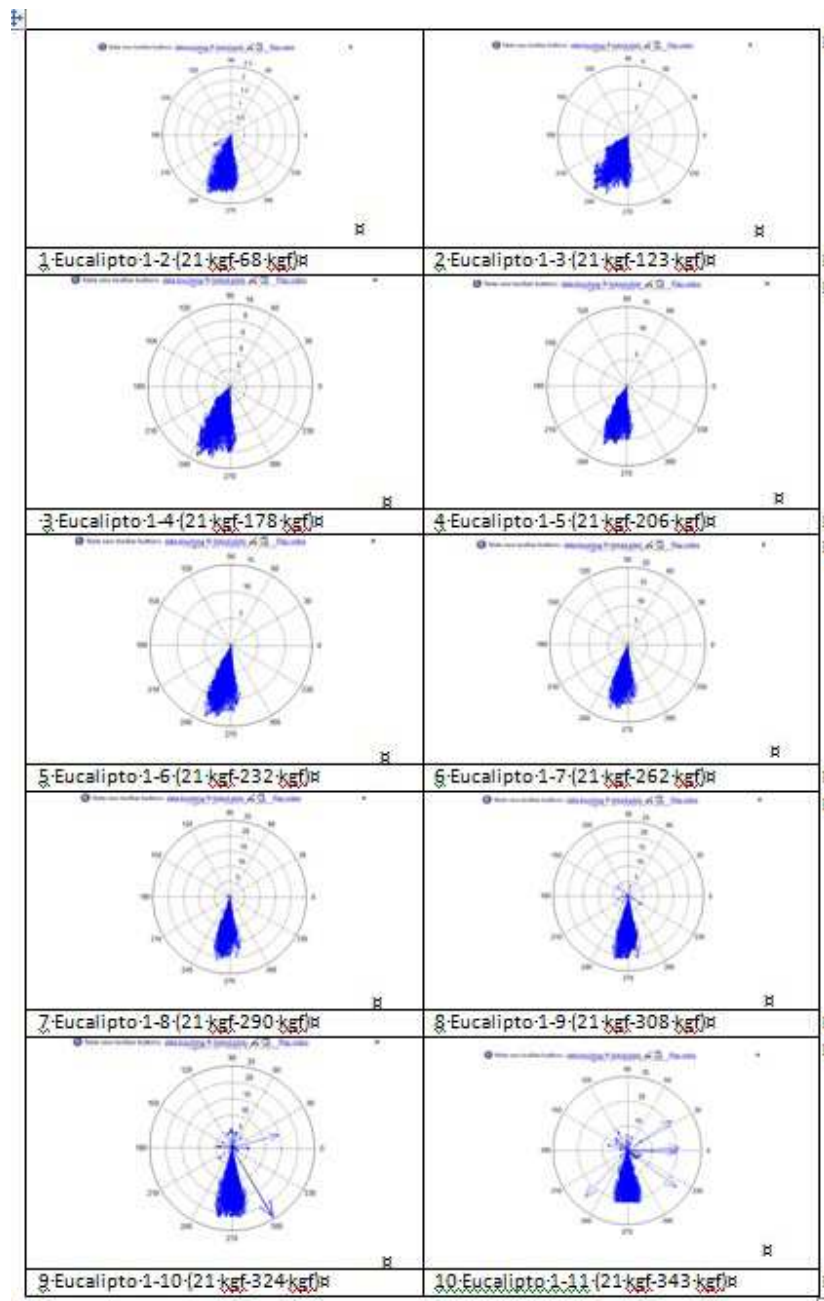


Figura 2B Gráfico de Tensão x Deformação do *Eucalyptus* sp gerado pela combinação das imagens da Figura 1B

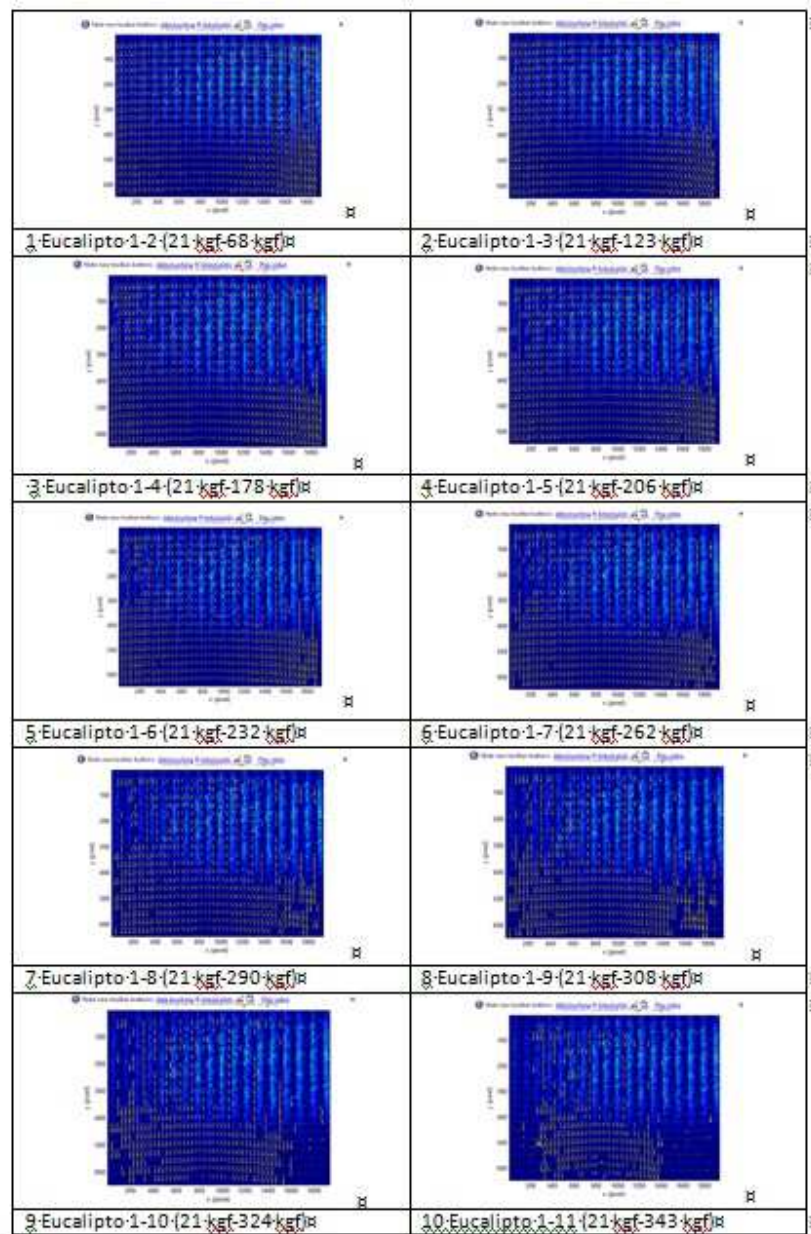


Figura 3B Gráficos do comportamento dos vetores da deformação da madeira de *Eucalyptus* sp gerado pela combinação das imagens da Figura 1B

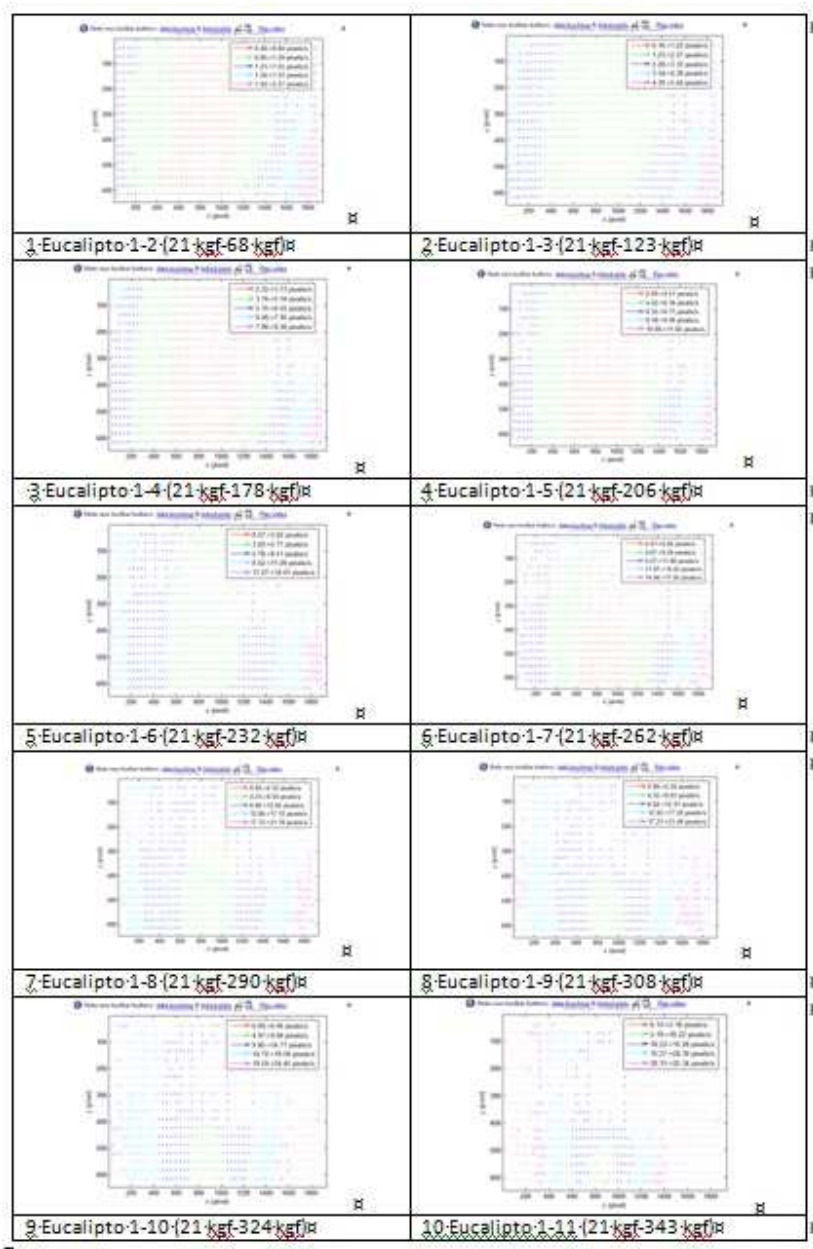


Figura 4B Gráfico de quantificação da deformação do *Eucalyptus* sp gerado pela combinação das imagens da Figura 1B

C – Pinus

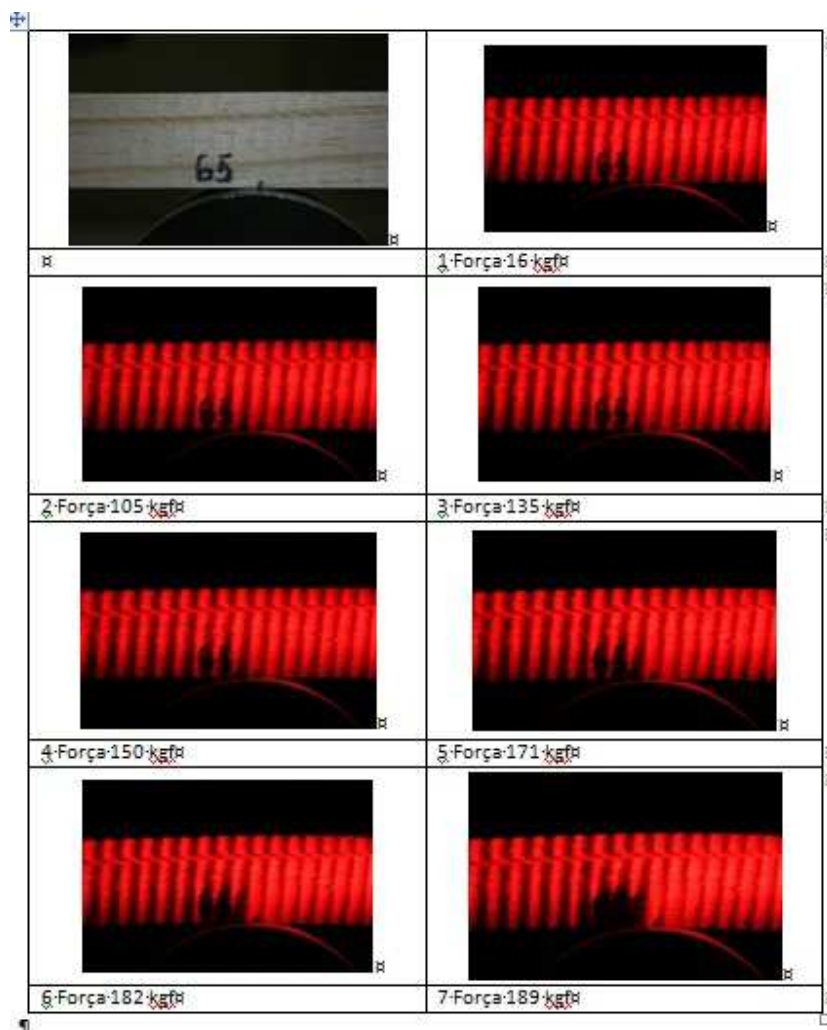


Figura 1C Evolução das imagens de aquisição do ensaio de Flexão Estática do Pinus utilizando a técnica de Iluminação *Sunset*

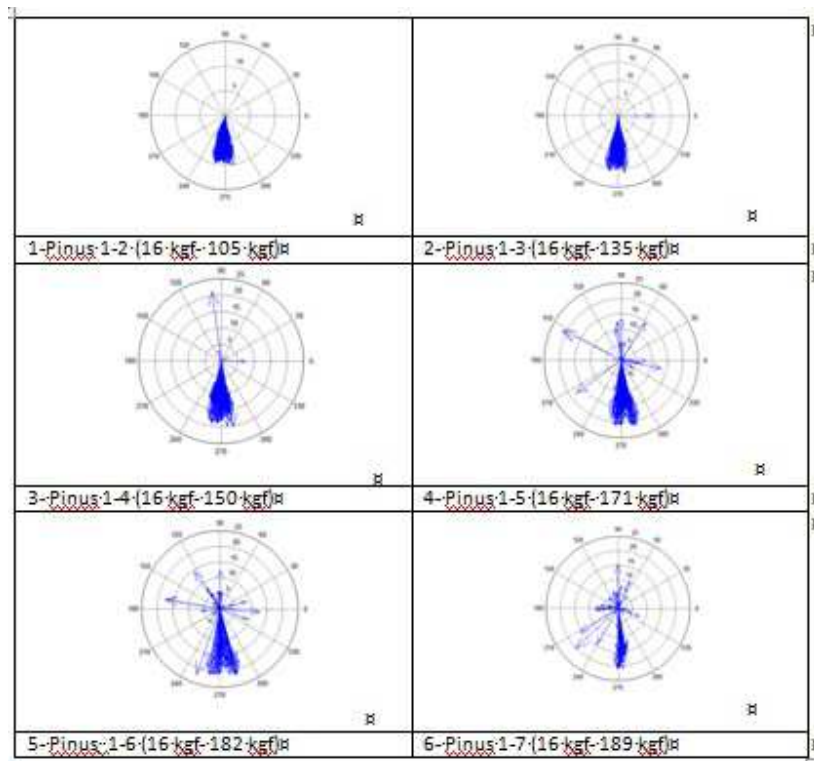


Figura 2C Gráfico de Tensão x Deformação do Pinus gerado pela combinação das imagens da Figura 1C

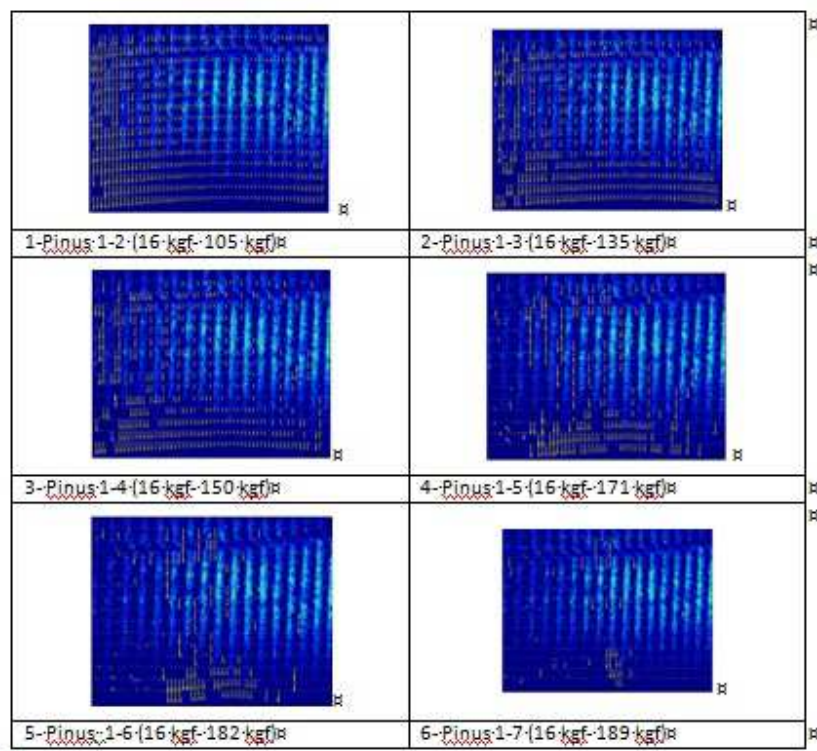


Figura 3C Gráficos do comportamento dos vetores da deformação da madeira de Pinus gerado pela combinação das imagens da Figura 1C

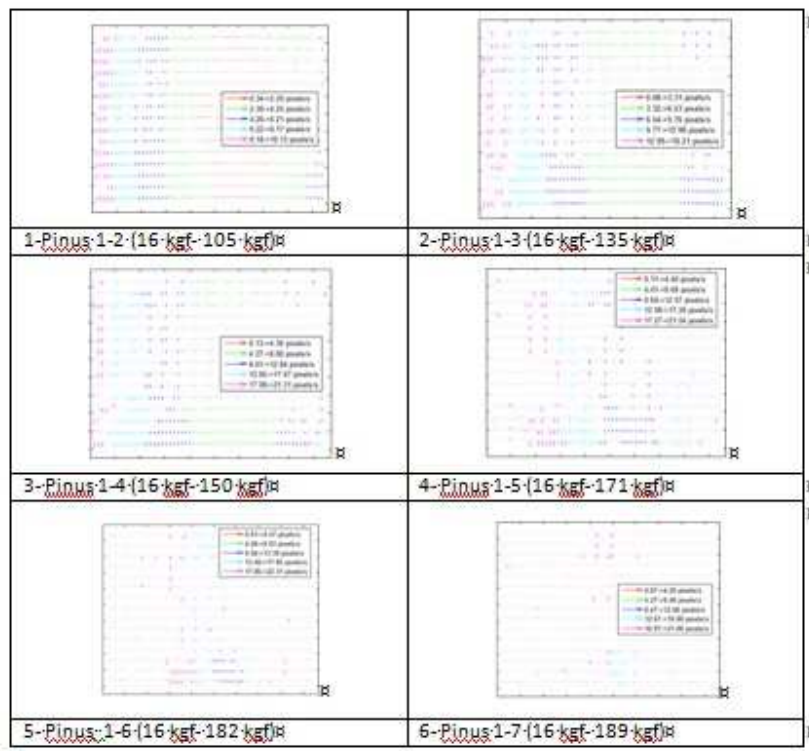


Figura 4C Gráfico de quantificação da deformação do Pinus gerado pela combinação das imagens da Figura 1C

Anexo 2 Tabelas de fotos e respectivas forças dos ensaios

Tabela 1A Madeira de *Eucalyptus* sp.

CP	h	b	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	
1	25,17	26,08																							
2	25,69	25,92	780	9	781	21	782	40	783	100	784	150	785	180	786	202	787	219	788	238	789	236			
3	25,32	26,07	790	7	791	54	792	96	793	170	794	152	795	258	796	268	797	276	798	282					
4	25,57	26,07	801	12	802	53	803	96	804	136	805	189	806	219	807	251	808	271	809	283	810	290	811	297	
5	25,96	25,58	279	13	278	32	277	78	276	131	275	178													
6	25,30	26,01	274	2	273	42	272	85	271	122															
7	25,65	26,07	270	10	269	77	268	106	267	133	266	154	265	187	264	214	263	228							
8	25,36	26,07	264	7	263	58	262	96	261	145															
9	25,54	26,12	253	14	252	48	251	90	250	124	249	160	248	207	247	241	246	263	245	281	244	294	243	304	
10	25,70	26,04	144	21	243	68	242	123	241	178	240	206	239	232	238	262	237	290	236	308	235	324	234	343	
11	25,55	26	233	7	232	78	231	110	230	161	229	196	228	233	227	264	226	278	225	292	224	294			
12	24,84	25,98	227	12	226	58	225	106	224	145	223	175	223	187											
13	25,53	26,07	221	21	220	72	220	146	219	196	218	223	217	250	216	273	215	296	214	311	214	321	213	337	
14	25,60	26,07	211	25	24	118	210	145	209	180	208	225	207	252	206	280	205	303	205	329	204	340	203	341	
15	25,57	26,03	201	23	200	77	200	121	199	174	198	217	197	292	196	308	195	309	194	334	193	344	193	352	
16	25,44	26,04	191	26	190	64	189	109	188	160	188	189	187	200											
17	25,30	26,09	185	67	184	135	184	168	183	228	182	252	181	279	180	301	180	309							
18	24,80	26,08	178	65	177	122	176	175	176	202	175	218	174	245	173	260	172	273	172	276					
19	24,94	26,07	103	27	102	110	101	159	100	202	99	231	98	244											
20	25,55	26,06	169	83	169	132	168	173	167	233	166	255	165	281	164	302	164	321	163	305					
21	24,95	26,06	161	17	160	62	159	106	159	141															
22	25,37	26,03	157	22	157	89	155	144	154	195	153	275	153	297	152	307									
23	25,64	26,10	150	24	149	86	148	133	148	195	147	233	146	260	145	272	144	294							
24	25,63	26,08	142	46	141	116	141	176	140	228	139	268	138	302	137	334	136	352							
25	25,68	26,11	135	27	134	94	133	195	132	255	131	277	131	311	130	333	129	345							
26	25,57	26,07	128	42	127	193	126	259	125	297	124	319	123	333	122	345	122	351							
27	25,43	26,06	120	40	119	141	119	252	118	294	117	322	116	329	115	337	114	347							
28	25,43	26,09	97	45	96	181	95	257	94	278	93	316	92	325	92	348									
29	25,38	26,09	112	37	111	143	111	188	110	242	109	245													
30	25,66	25,98	108	39	107	118	106	164	105	182	104	202													

CP= corpo de prova; h= altura; b=largura

Tabela 2A Madeira de *Hymenolobium sericum*.

CP	h	b	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)
31	25,50	26,03	830	13	831	92	832	195	833	243	834	292	835	322	816	347	837	361	838	378		
32	25,19	26,09	332	17	332	82	131	168	330	218	329	246	329	271	328	284	327	301	326	319	326	319
33	25,15	26,02	324	22	324	109	323	215	322	275	322	317	321	377	320	417						
34	25,36	26,03	204	31	203	133	202	199	201	324	201	355	200	370								
35	25,01	26,03	318	34	317	114	316	184	316	204												
36	25,37	25,98	314	23	313	204	313	272	312	365	311	393	310	394								
37	25,48	26,00	309	41	308	165	307	287	306	347	305	378	305	386								
38	25,54	25,99	303	38	302	121	301	238														
39	25,15	25,82	398	98	198	132	197	249	196	307	195	337	194	369								
40	24,43	26,01	299	33	299	133	298	220	297	215												
41	25,48	25,78	295	44	295	135	294	252	293	289	292	341	291	371	290	387	290	397	289	407	288	416
42	25,47	25,80	286	50	286	151	285	256	284	312	284	364										
43	25,59	26,04	282	32	281	176	281	268	280	316	279	360	278	395	278	406	277	419	276	434		
44	24,67	26,01	275	50	174	219	273	259	272	293	272	332	271	350	270	460						
45	25,55	26,06	269	35	268	179	267	305	266	339	266	379	265	402	264	419						
46	25,52	26,05	263	43	262	161	261	283	261	311												
47	24,83	26,08	193	37	192	124	191	224	191	285	190	314										
48	25,45	26,10	296	28	255	131	255	244	254	293	253	299										
49	25,32	26,07	188	43	188	152	187	295	186	322	185	362	185	381								
50	25,28	26,04	251	35	250	233	249	289	249	346	248	378	247	389								
51	25,65	26,06	245	62	245	143	244	281	243	328												
52	25,00	25,099	242	33	241	127	240	264	239	292	238	350	238	391	237	408						
53	25,35	26,09	235	106	234	283	233	287														
54	24,91	26,05	232	34	231	134	230	244	230	270												
55	25,66	26,07	228	39	227	136	227	296	226	327	225	374	224	400	224	408	223	420				
56	25,35	25,82	221	35	220	140	220	254	219	320	218	379	217	408								
57	25,34	26,09	183	51	182	143	182	255	181	377	180	306	179	317								
58	25,42	26,02	178	34	177	134	176	261	175	287	174	309	174	334	173	367	172	383	171	391		
59	25,65	26,10	213	43	213	145	212	234	211	251												
60	25,37	26,10	209	38	209	125	208	281	207	312	206	340	205	363								

CP= corco de prova: h= altura: b=largura

Tabela 3A Madeira de *Pinus*.

CP	h	b	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	Foto	Força (kgf)	
61	24,59	25,14	814	9	815	49	816	93	817	129	818	153	819	165	820	173	821	174							
62	25,24	24,60	822	7	823	30	824	95	825	128	826	150	827	169	828	196									
63	24,87	25,40	522	30	521	46	521	81	520	101	519	120	518	132	518	147	517	159	516	171	515	183	515	195	
64	25,16	24,41	513	15	512	78	512	113	511	143	510	168	509	179	509	188									
65	24,47	25,20	507	16	506	105	506	135	505	150	504	171	503	182	503	189									
66	24,42	23,94	501	23	501	86	500	142	499	169	498	183													
67	24,32	25,25	497	22	496	76	496	128	495	154	494	174	494	184											
68	24,12	25,25	492	43	492	83	491	152	490	189	490	199													
69	24,57	24,99	488	21	488	79	487	136	486	161															
70	24,73	25,08	485	21	484	75	483	139	483	158	482	176	481	187											
71	25,03	25,16	480	28	479	73	478	130	478	150	477	161													
72	24,65	24,99	476	23	475	76	474	138	473	155	473	172	172	184											
73	25,05	25,14	471	20	470	79	469	144	468	156	468	189	467	205											
74	24,75	25,15	465	28	465	111	464	144	463	153	463	180	462	193											
75	24,85	24,31	461	31	460	81	459	130	459	147	458	162													
76	25,39	24,82	457	22	456	93	455	107	455	128	454	154	453	169	452	177	452	186							
77	24,71	24,98	450	23	449	77	449	126	448	154	447	167	446	176	446	181									
78	24,30	24,78	444	20	443	116	442	147	442	179															
79	25,02	24,62	441	20	440	66	439	128	439	137	438	160	437	175	437	182									
80	24,91	24,94	435	30	437	105	434	126	433	140	433	161	432	173											
81	24,81	25,07	431	22	430	77	429	122	420	133	428	152	427	175											
82	25,19	25,24	426	33	425	99	424	131	424	162	423	180	422	190											
83	23,95	25,14	421	19	420	80	419	122	419	154	418	170	417	175											
84	25,06	25,10	416	19	415	105	414	142	413	166	413	184													
85	25,14	25,21	411	17	411	83	410	135	409	174	408	200	408	220											
86	25,07	23,61	406	16	405	90	405	130	404	169	403	190													
87	24,08	25,49	402	15	401	86	400	133	400	165	399	178													
88	24,29	24,80	398	25	397	82	396	149	395	176	395	189													
89	24,23	25,17	393	16	393	84	392	122	391	148	390	162	390	167											
90	25,36	25,24	388	65	388	143	387	178	386	196															

CP= corpo de prova; h= altura; b=largura