



DANIEL SOARES DE ALCANTARA

**USO DE TÉCNICAS ÓTICAS NA AVALIAÇÃO
DO ALINHAMENTO DAS FIBRAS DA
MADEIRA SOB ESFORÇO DE FLEXÃO
ESTÁTICA**

**LAVRAS - MG
2010**

DANIEL SOARES DE ALCANTARA

**USO DE TÉCNICAS ÓTICAS NA AVALIAÇÃO DO ALINHAMENTO
DAS FIBRAS DA MADEIRA SOB ESFORÇO DE FLEXÃO ESTÁTICA**

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

Orientador

Dr. Roberto Alves Braga Junior

LAVRAS-MG

2010

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

Alcantara, Daniel Soares de.

Uso de técnicas óticas na avaliação do alinhamento das fibras da
madeira sob esforço de flexão estática / Daniel Soares de Alcantara.

– Lavras : UFLA, 2010.

50 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Roberto Alves Braga Junior.

Bibliografia.

1. Laser. 2. Grã. 3. Deformação. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.

CDD – 674. 0287

DANIEL SOARES DE ALCANTARA

**USO DE TÉCNICAS ÓTICAS NA AVALIAÇÃO DO ALINHAMENTO
DAS FIBRAS DA MADEIRA SOB ESFORÇO DE FLEXÃO ESTÁTICA**

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

APROVADA em 10 de agosto de 2010.

Dr. Giovanni Francisco Rabelo UFLA

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva UFLA

Dr. Roberto Alves Braga Junior
Orientador

LAVRAS-MG

2010

AGRADECIMENTOS

Ao maior *MESTRE* de todos os mestres, *PAI* e criador de todas as coisas, pois sem ele nada seria possível - *DEUS*.

Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e muitas vezes renunciaram aos seus sonhos para que os meus se tornassem realidade.

A Jousiany, esposa, companheira, paciente nas horas difíceis e mãe dedicada, que está sempre presente nas minhas principais conquistas.

A Aline, Gabriel, Davi e Luiza que, tão generosos ao me ofertarem olhares e sorrisos, foram capazes de me proporcionar forte incentivo para que eu nunca desistisse do meu objetivo.

A todos os familiares e amigos que sempre torceram pelo sucesso desta conquista.

Aos colegas do CEFETMG – Campus VIII que, juntos, apoiaram e incentivaram a realização deste trabalho.

Em especial ao Prof. Roberto Alves Braga Junior, pelo apoio, dedicação, incentivo e amizade, durante estes meses de convívio.

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

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola da UFLA, pelos ensinamentos transmitidos e harmoniosa convivência.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

A madeira é um material renovável e de fácil manuseio. Porém, em virtude da estrutura e da constituição, é vista, frequentemente, como um material não durável, passível de sofrer alterações importantes, o que afeta sua resistência mecânica. A correta utilização só pode ser conseguida avaliando-se as propriedades físico-mecânicas, que são fundamentais para determinar o seu uso, propriedades estas que podem ser acessadas por meio de vários ensaios. Entre os que mais se destacam estão os destrutivos, metodologia como o próprio nome diz que destrói a peça a ser ensaiada. O uso de técnicas não destrutivas, como as vibracionais, a propagação de ondas acústicas e as ópticas, vem sendo estudado como alternativas, sendo que essa última tem sido alvo de muitos estudos. Neste trabalho, apresenta-se um protocolo baseado no espalhamento de um feixe laser sobre peças de madeira, criando figuras de iluminação que podem ser relacionadas ao alinhamento das fibras da peça. O trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a possibilidade de utilizar o espalhamento do laser na avaliação do alinhamento das fibras da madeira sob esforços de flexão estática. Foram utilizadas peças de madeira em forma de viga, que foram iluminadas com laser e submetidas à aplicação de esforços controlados. Os resultados obtidos nesta pesquisa demonstraram que a metodologia empregada foi capaz de detectar a variação do alinhamento das fibras da madeira acompanhando a sua flexão, tendo sido constatados resultados com boa tendência na variação dos ângulos, em função do esforço aplicado.

Palavras-chave: Ensaio não destrutivo. Deformação. Laser.

ABSTRACT

La madera es un material renovable y fácil manejo. Sin embargo, debido a la estructura y constitución, se considera a menudo como un material no resistente, capaz de sufrir grandes cambios, que afecta a su resistencia mecánica. El uso adecuado sólo puede lograrse mediante la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas, que son críticos para determinar su uso, estas propiedades se puede acceder a través de diversas pruebas. Entre los que se destacan son la metodología destructiva como el nombre lo dice destruye la parte a ser probada. El uso de técnicas no destructivas, tales como vibración, la propagación de ondas acústicas y ópticas, se ha estudiado como alternativa, siendo que este último ha sido objeto de numerosos estudios. En este trabajo, presentamos un protocolo basado en la dispersión de un haz láser de las piezas de madera, la creación de imágenes de iluminación que puede estar relacionado con la alineación de las fibras de la pieza. El estudio se realizó para evaluar la posibilidad de utilizar láser de dispersión para evaluar la alineación de las fibras de la madera en los esfuerzos de flexión. Se utilizaron piezas de madera en forma de haz, que estaban iluminadas con láser y se someten a la aplicación controlada de esfuerzo. Los resultados de esta investigación mostraron que el método puede detectar el cambio en la alineación de las fibras de la madera a partir de su flexión, se encontró con la tendencia de buenos resultados en la variación de los ángulos, en función de la tensión aplicada.

Keywords: Ensayos no destructivos. La deformación. Láser.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tabela 1	Ângulos da elipse formada em função da rotação.....	38
Tabela 2	Valor do ângulo medido do alinhamento das fibras da madeira.....	41
Tabela 3	Valor do ângulo medido do alinhamento das fibras da madeira.....	41
Tabela 4	Ângulo calibrado do alinhamento das fibras da madeira.....	42
Tabela 5	Ângulo calibrado do alinhamento das fibras da madeira.....	43
Gráfico 1	Dispersão e reta de tendência do ângulo real.....	39
Gráfico 2	Reta e equação de calibração.....	40
Gráfico 3	Curva de ajuste ao modelo de regressão linear em função do ângulo e do esforço. (2 ^a , 4 ^a e 5 ^a Amostra).....	44
Gráfico 4	Curva de ajuste ao modelo de regressão linear em função do ângulo e do esforço. (1 ^a , 3 ^a e 6 ^a Amostra).....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Foto micro-estrutura da madeira.....	17
Figura 2	Esquema de uma fibra de madeira.....	18
Figura 3	Esquema de uma fibra de madeira com detalhes do espalhamento do feixe laser.....	26
Figura 4	Detalhe da ferramenta de validação e validação.....	28
Figura 5	Detalhe de montagem do experimento de validação.....	29
Figura 6	Imagem formada pelo feixe laser.....	30
Figura 7	Imagem formada pelo feixe laser binarizada.....	31
Figura 8	Ferramenta para aplicação de esforços de flexão estática.....	32
Figura 9	Detalhe do corpo-de-prova.....	33
Figura 10	Área de iluminação do laser no corpo-de-prova.....	34
Figura 11	Configuração da montagem da ferramenta para aplicação de esforços de flexão estática.....	35
Figura 12	Configuração final do experimento.....	36

LISTA DE SIGLAS

ABENDI	Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standards Institute
BMP	Bitmap
CCD	Charge coupled detector
Cedia	Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária

LISTA DE SIMBOLOS

°	graus
He	hélio
Hz	Hertz
%	porcentagem
mm	milímetro
mW	mile Watt
NBR 7190	Norma Brasileira de Projeto de Estruturas de Madeira
Ne	neônio
Nm	nanômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Características e propriedades da madeira	16
3.2	Propriedades anatômicas	16
3.2.1	Características da microestrutura	17
3.2.2	Ângulo microfibrilar	18
3.2.3	A grã da madeira	19
3.3	Defeitos em madeira	19
3.4	Propriedades mecânicas	19
3.4.1	Caracterização da madeira	20
3.4.2	Caracterização completa da resistência da madeira	20
3.4.3	Caracterização mínima da resistência da madeira	21
3.4.4	Caracterização simplificada da resistência da madeira	21
3.4.5	Influência dos defeitos	21
3.4.6	Influência da umidade	22
3.4.7	Módulo de elasticidade	22
4	AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA	23
4.1	Avaliação visual	23
4.2	Avaliação com ultrassom	24
4.3	Avaliação por vibração	24
4.4	Avaliação com raio X	24
4.5	Técnicas ópticas	25

4.5.1	Técnicas ópticas utilizando o laser	25
4.5.2	Determinação do ângulo do espalhamento	26
5	MATERIAL E MÉTODOS	27
5.1	Ferramenta para validação e calibração do experimento	27
5.2	Etapa de validação	27
5.3	Aquisição das imagens	29
5.4	Processamento das imagens	30
5.5	Ferramenta para aplicação dos esforços de flexão estática	32
5.6	Preparação das amostras	32
5.7	Ensaio de flexão estática	33
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6.1	Validação e calibração do experimento	37
7	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material lenhoso que possui diferentes propriedades e, quando é submetida a esforços mecânicos, apresenta variações nos componentes anatômicos, tanto na direção axial (base–topo) quanto na radial (medula–casca). Em inúmeros trabalhos busca-se compreender suas propriedades e as metodologias empregadas usualmente utilizam processos destrutivos.

Os métodos de ensaio não destrutivos têm conquistado espaço na análise de diversos materiais porque apresentam vantagens em relação aos métodos destrutivos, como, por exemplo, a possibilidade de avaliação de uma peça de madeira sem a extração de corpos-de-prova. Neste contexto, várias tecnologias, como o raio X, as técnicas vibracionais, a propagação de ondas acústicas e as ópticas, estão sendo estudadas para avaliar a madeira de modo não destrutivo.

Os métodos ópticos, além de não destruírem, apresentam vantagem adicional relacionada a não necessidade de contato físico com o objeto a ser analisado. O uso do laser e da óptica associada como instrumento de medida tem se destacado em diversas áreas do conhecimento.

A avaliação da orientação do ângulo da grã na madeira é uma das aplicações relatadas na literatura que propiciam a análise do alinhamento das fibras da madeira e potencialmente relacionar o ângulo da grã com a aplicação de esforços em peças de madeira sem retirá-las de seus locais de instalação.

Neste trabalho, avaliou-se a aplicação do laser, da óptica e da análise de imagens para o monitoramento do alinhamento das fibras da madeira sob esforço de flexão estática.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o alinhamento das fibras da madeira diante da aplicação de esforço de flexão estática, utilizando o monitoramento do fenômeno do espalhamento do feixe laser.

2.2 Objetivos específicos

- a) Propor uma configuração experimental para a realização de ensaios de aplicação de esforço de flexão estática na madeira, para observação do ângulo do espalhamento do laser na fibra da madeira.
- b) Validar a configuração proposta com um experimento controlado para verificação da variação do ângulo da madeira.
- c) Avaliar a sensibilidade do método desenvolvido para o acompanhamento da deformação da madeira e do alinhamento das fibras.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Características e propriedades da madeira

A madeira pode ser considerada um excelente material estrutural, reconhecida por resistência mecânica elevada e baixa densidade quando comparada a outros materiais, como o aço para construção (KOLLMANN et al., 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, dentre as propriedades físicas mais importantes, estão a densidade e a retratibilidade (contração e inchamento em função da umidade da madeira) e, entre as propriedades mecânicas, está 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. Já Moura (2000) considera as propriedades anatômicas, químicas, físicas e morfológicas como sendo as principais.

As propriedades mecânicas e anatômicas são determinadas por meio de ensaios de laboratório realizados seguindo normas que especificam métodos e procedimentos para a realização de testes em corpo-de-prova.

3.2 Propriedades anatômicas

Quanto à estrutura anatômica, a madeira é um material celular constituído por pequenos elementos diferenciados de acordo com as funções que desempenham (KLOCK, 2005). Para Tsoumis (1991), esses elementos definem

a sua estrutura anatômica e o seu arranjo varia de acordo com a espécie e as condições de crescimento.

3.2.1 Características da microestrutura

As células da madeira, denominadas fibras, são como tubos de paredes finas, alinhados na direção axial do tronco e colados entre si. As fibras longitudinais têm diâmetro variando entre 10 e 80 microm e comprimento de 1 a 8mm (RUDMAN, 1970). A espessura das paredes da célula varia de 2 a 7 microm e podem configurar-se como feixes de microfibrilas constituídas por frações elementares de cadeias celulósicas, as quais apresentam zonas de estrutura cristalina e zonas de estrutura amorfa, que ocupam cerca de um terço da dimensão das microfibrilas (SANTOS, 2005; TSOUMIS, 1991). Segundo Pfeil (2003), todos os estudos levam a crer que as microfibrilas desempenham o principal papel na resistência à tração paralela, pois se orientam longitudinalmente na parede celular do lúmen. Na Figura 1 mostra-se a caracterização da microestrutura da madeira.

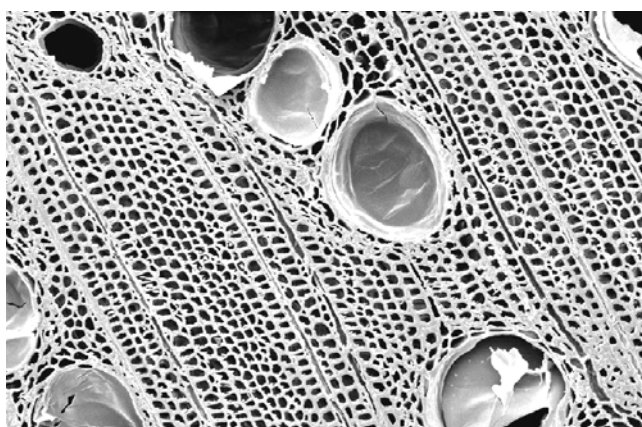


Figura 1 Foto microestrutura da madeira
Fonte: Gomide (2002)

Por meio da Figura 1 pode-se observar que madeira é um material poroso, constituído por diferentes estruturas, cujo elemento básico é a célula. Existem vários tipos de células que têm funções diversas no vegetal, tais como condução da seiva, suporte e armazenamento de substâncias nutritivas. Cada uma dessas funções confere uma forma diferente às células. Algumas são mais alongadas, outras em forma de cubo. Uma possuem paredes mais espessas, outras mais finas.

De acordo com Tsoumis (1991), as fibras, em sua constituição anatômica, representam cerca de 65% a 75% do volume da peça, sendo o restante complementado pelos elementos de vaso e pelas células dos parênquimas axial e radial.

Para Evans et al. (2000), as fibras são importantes para a determinação da utilização da madeira. Os parâmetros usualmente considerados nos estudos de fibras compreendem quatro medidas fundamentais: comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lúmen (Figura 2).

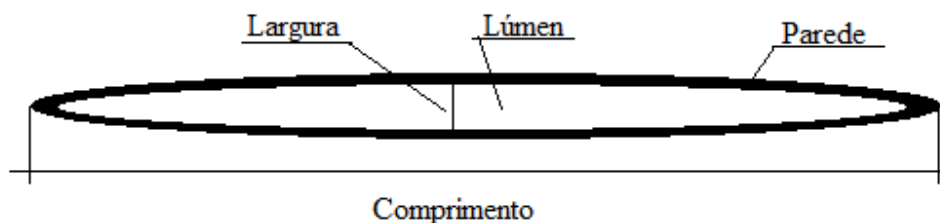


Figura 2 Esquema de uma fibra de madeira
Fonte: Adaptado de Shimoyama (2005)

3.2.2 Ângulo microfibrilar

A inclinação do ângulo microfibrilar exerce um efeito sobre as propriedades e as fibras da madeira, define sua instabilidade dimensional, rigidez e resistência mecânica, como destacou Zobel (1998).

3.2.3 A grã da madeira

De acordo com Eklund (2000), a grã da madeira é a orientação geral dos elementos axiais constituintes do lenho. Esta orientação é decorrente das mais diversas influências que a árvore recebe durante o seu crescimento. Ela dá origem a uma grande variação natural no arranjo e na direção dos tecidos axiais, originando vários tipos de grãs. Simonaho (2004) relata que quase todas as características mecânicas da madeira dependem da direção da grã, ou seja, força, resistência e elasticidade.

3.3 Defeitos em madeira

A madeira é um material natural que carrega características associadas à herdabilidade. Algumas destas características são indesejáveis, do ponto de vista de utilização. A ocorrência de defeitos em madeira compromete o seu uso como matéria-prima nas diversas aplicações. Os defeitos podem ter origem natural ou surgir tanto no tratamento e no manejo silvicultural quanto nos processos de desdobro, corte e secagem.

Um defeito natural comum são os nós, que diminuem drasticamente o desempenho mecânico da madeira, como relatou Zobel (1998). Bamber et al. (1969) consideram que o principal efeito dos defeitos da madeira é afetar a orientação da grã.

3.4 Propriedades mecânicas

São as características de resistência e de elasticidade da madeira, quando submetida a esforços externos de natureza mecânica. As principais propriedades são adquiridas por meio de ensaios de compressão, flexão, tração e

cisalhamento. Geralmente, os ensaios consistem na obtenção de dados correspondentes ao carregamento lento e contínuo, aplicado a corpos-de-prova.

3.4.1 Caracterização da madeira

A NBR 7190 estabelece três alternativas para se proceder à caracterização da resistência e da rigidez das espécies de madeira a serem empregadas na construção de estruturas: caracterização completa (para espécies desconhecidas), caracterização mínima (para espécies pouco conhecidas) e caracterização simplificada (para espécies bem conhecidas) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997).

3.4.2 Caracterização completa da resistência da madeira

A caracterização completa da resistência da madeira a ser empregada em um projeto e na construção de estruturas deve ser feita de acordo com os métodos especificados no Anexo B da NBR 7190 (ABNT, 1997), para as seguintes propriedades sempre referidas à umidade de 12%:

- a) resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$);
- b) resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$);
- c) resistência à compressão normal às fibras ($f_{c,90}$);
- d) resistência à tração normal às fibras ($f_{t,90}$);
- e) resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$);
- f) resistência ao embutimento paralelo às fibras ($f_{e,0}$);
- g) resistência ao embutimento normal às fibras ($f_{e,90}$);
- h) densidade básica (ρ_{bas});
- i) densidade aparente a 12% de umidade (ρ_{12}).

3.4.3 Caracterização mínima da resistência da madeira

A caracterização mínima da resistência da madeira deve ser feita de acordo com os métodos especificados no Anexo B da NBR 7190 (ABNT, 1997), para as seguintes propriedades sempre relacionadas à umidade de 12%:

- a) resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$);
- b) resistência à tração paralela às fibras ($f_{t,0}$);
- c) resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v,0}$);
- d) densidade básica (ρ_{bas});

3.4.4 Caracterização simplificada da resistência da madeira

A caracterização simplificada da resistência da madeira deve ser feita de acordo com os métodos especificados no Anexo B da NBR 7190 (ABNT, 1997), considerando-se apenas a resistência à compressão paralela às fibras na umidade de 12%.

3.4.5 Influência dos defeitos

A madeira que compreende a região de nós apresenta desvios acentuados de suas células, formando alto ângulo de grã, irregularidades nos anéis de crescimento, além de descontinuidade entre o nó e a madeira circundante, resultando em redução da resistência (THUNELL, 1958). Assim como os nós, o desvio da grã e as rachaduras também apresentam influências nas propriedades mecânicas da madeira, como destacam Evans et al. (2000). No caso da grã, o desvio em relação a uma linha paralela à borda tem influência

significativa. Entretanto, essas influências variam de acordo com a localização dos defeitos e do tipo de tensão aplicada.

3.4.6 Influência da umidade

A umidade tem influência sobre as propriedades das madeiras. Gerhards (1978) demonstrou, em diversos trabalhos, a influência da umidade em várias propriedades mecânicas da madeira. Os trabalhos confirmam a redução da resistência e do módulo de elasticidade da madeira. A resistência diminui até ser atingido o ponto de saturação das fibras (30% de umidade). Segundo o autor, acréscimos de teores de umidade acima deste ponto não mais influenciam os parâmetros mecânicos.

3.4.7 Módulo de elasticidade

Elasticidade é a propriedade da madeira que lhe possibilita retomar a forma original após a remoção da carga aplicada, ou seja, é a capacidade da madeira de deformar-se sem que haja a ruptura por alongamento ou por encurtamento sob tração ou compressão uniforme.

A madeira é um material elástico. Quando solicitada por carregamentos pequenos, deforma-se sem quebrar. O limite de resistência e comportamento elástico é característica própria de cada material e, na madeira, varia não só entre espécies como para indivíduos de uma mesma espécie, e em um mesmo indivíduo, dependendo da posição que a amostra é retirada (KOLLMANN et al., 1968).

4 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

A avaliação não destrutiva é a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de determinado material, sem alterar sua capacidade de uso (ROSS et al., 1998). De acordo com a Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI (2010), são avaliações realizadas em materiais para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos sem a destruição da peça. Segundo Erikson et al. (2000), os ensaios não destrutivos são importantes ferramentas para a caracterização da madeira, podendo ser utilizados pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade do processo, garantir a segurança das instalações e avaliar peças para projeto de estruturas.

Ross et al. (1999) afirmam que várias tecnologias, como raios X, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras, são empregadas para avaliar a madeira de modo não destrutivo, enquanto, para Shimoyama (2005), nos métodos não destrutivos mais usuais utilizam-se ultrassom, radiografia ionizante, análise de vibrações e emissão acústica, entre outros.

4.1 Avaliação visual

A avaliação visual é o método mais antigo utilizado na análise e na classificação de peças de madeira a serem utilizadas. É uma técnica bastante útil e apresenta bons resultados quando realizada por um profissional treinado, experiente e conhecedor das normas de inspeção visual.

A análise das peças visa à detecção de nós, distorção das fibras e verificação da presença de fungos, insetos e demais defeitos.

4.2 Avaliação com ultrassom

De acordo com Gonçalves et al. (2001), ondas acústicas de frequência superior a 20 kHz são classificadas como ondas de ultrassom. Esta técnica é baseada na análise da velocidade em que essa onda atravessa a peça de madeira. Segundo Sandoz (1989), pode ser aplicada na classificação e na caracterização de peças e na avaliação de estruturas de madeira em serviço.

4.3 Avaliação por vibração

Consiste na aplicação da vibração com a obtenção do módulo de elasticidade do material a partir da análise das frequências principais de vibração. De acordo com Carreira et al. (2005), nessa técnica aplica-se a teoria de que todos os materiais têm uma frequência natural de vibração e um desvio dessa vibração é um indicador de possível dano ou defeito.

4.4 Avaliação com raio X

Na aplicação desta técnica, utiliza-se radiação ionizante que penetra no material, fornecendo uma análise superficial e interna. A radiação é absorvida parcialmente ao atravessar o material criando, assim, uma imagem que separa as partes de acordo com a sua absorção de radiação. Dentre as vantagens da técnica destacam-se a simplicidade e a rapidez do método e a confiabilidade dos resultados obtidos. Como desvantagem, pode-se distinguir a presença dos defeitos internos, mas não é possível a observação dos defeitos superficiais.

4.5 Técnicas ópticas

A aplicação das técnicas ópticas na área de ensaios de materiais vem sendo estudada com frequência. Nelas, utilizam-se as propriedades da luz, aliadas às técnicas de aquisição e tratamento de sinais ópticos.

4.5.1 Técnicas ópticas utilizando o laser

O espalhamento do laser na grã de madeira começou a ser investigado em detalhe, com o objetivo de desenvolver uma técnica como a de Moiré, (COSTA, 2006), ou pelo espalhamento da luz do laser (FARIA et al., 2008). A aplicação do laser tem sido investigada como técnica de avaliação não destrutiva na análise das microestruturas da madeira.

Os padrões assim obtidos revelam uma forma elíptica com uma orientação específica com o eixo maior da elipse perpendicular à orientação principal da grã. Faria et al. (2008), Hu et al. (2003) e Simonaho (2004) realizaram trabalhos utilizando o laser e o processamento de imagem como uma nova técnica para a medição da orientação das fibras. Os dois primeiros utilizaram o mesmo sistema de iluminação e o último, um sistema alternativo. Todavia estes trabalhos demonstraram que o laser acompanha a orientação das fibras ao se espalhar seguindo a orientação da grã.

O espalhamento do laser acompanha a orientação das fibras da madeira formando uma imagem que tende a ser em formato elíptico, o que permite associar e acusar a inclinação da mesma em cada ponto da madeira. A explicação para o espalhamento não uniforme foi apresentado por Faria et al. (2008), mostrando que, na orientação da grã, a luz tem um espaço livre para se propagar, o que não ocorre nas laterais das fibras. Na Figura 3 é apresentado o esquema do espalhamento do feixe laser na fibra da madeira.

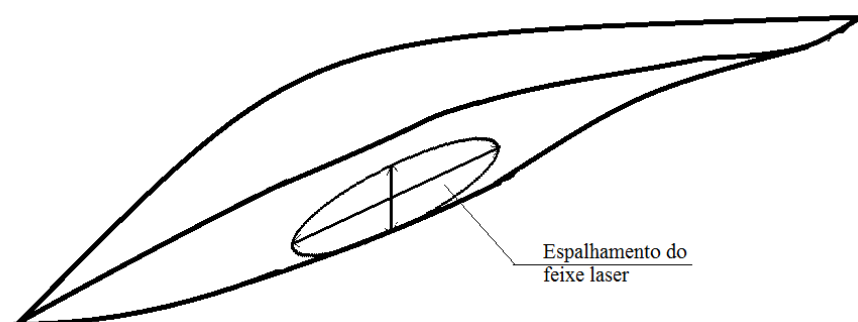


Figura 3 Esquema de uma fibra de madeira com detalhe do espalhamento do feixe laser

De acordo com Pereira et al. (2002), a radiação a luz do feixe laser tende a se propagar através do canal das fibras, que se comporta como uma rede que guia a luz e permite maior espalhamento na direção longitudinal do que na direção transversal da fibra. Pode-se considerar que a figura formada apresenta um padrão quase elíptico, com o eixo maior alinhado com a orientação principal das fibras e o eixo menor alinhado na menor direção.

4.5.2 Determinação do ângulo do espalhamento

Devido ao formato padrão quase elíptico, se ocorrer uma deformação no alinhamento das fibras, é possível medir o movimento de rotação do seu eixo maior em relação ao menor. Considerando o eixo principal como sendo “x” e o menor como sendo “y” e, utilizando as propriedades geométricas da elipse, pode-se calcular, por meio da técnica do momento de inércia, o ângulo de rotação entre estes dois eixos.

Como o feixe laser acompanha as paredes internas da fibra, essa medida representa a deformação no alinhamento da microestrutura da madeira.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Centro de Desenvolvimento de Instrumentação Aplicada à Agropecuária (CEDIA), na Universidade Federal de Lavras. Dividiu-se o experimento em três fases:

- a) desenvolvimento de uma configuração experimental para validação e calibração do método;
- b) desenvolvimento de uma configuração experimental para a realização de ensaios de aplicação de esforço de flexão estática controlados na madeira;
- c) realização dos ensaios para o acompanhamento do alinhamento das fibras da madeira.

5.1 Ferramenta para validação e calibração do experimento

Ferramenta para validar e calibrar a metodologia proposta. Consiste em um suporte construído para apoiar a peça de madeira e permitir uma rotação controlada. Consequentemente, ocorre a variação das fibras da madeira.

5.2 Etapa de validação

Para esta etapa utilizaram-se:

- a) laser de He-Ne (632 nm);
- b) câmera CCD digital;
- c) ferramenta de validação;
- d) escala de ângulos;
- e) lente com filtro.

Uma peça de madeira de *Eucalyptus* sp., com espessura de 20 mm e diâmetro de 80 mm, foi fixada ao suporte da ferramenta de validação por meio do centro geométrico, de modo a permitir a rotação das fibras. A metodologia para a escolha da peça foi estabelecida com simples observação visual. Houve o cuidado de escolher uma peça de madeira livre de defeitos, que favorecesse o acompanhamento da rotação das fibras e que apresentasse um centro geométrico bem definido e fácil interpretação dos ângulos de rotação. Na Figura 4 observa-se o detalhe da ferramenta de validação.

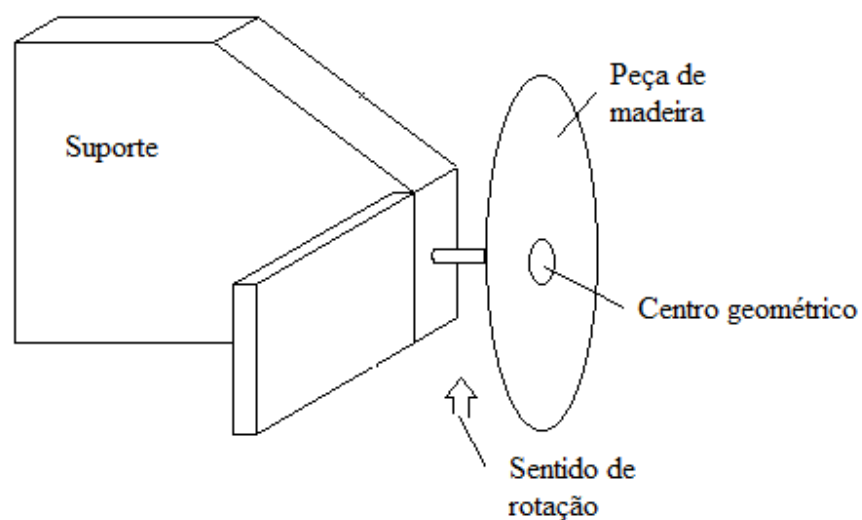


Figura 4 Detalhe da ferramenta de validação e calibração

Considerando-se que o ponto da peça a ser iluminado durante as rotações deve apresentar pouca translação, o feixe laser foi posicionado de maneira a incidir sobre o seu centro geométrico. Nesta etapa, utilizou-se a configuração proposta por Faria et al. (2008), com o feixe laser formando um ângulo de incidência de 50° em relação ao centro geométrico da peça de madeira.

Para registrar as imagens durante o processo de rotação, foi utilizada uma câmera CCD, acoplada a um tripé independente fixado numa superfície plana e livre de vibrações. Para se obter boa qualidade da imagem, o ângulo de alinhamento entre a câmera e o corpo-de-prova foi estabelecido em, aproximadamente, 30° , definido, assim como a distância focal, em função da qualidade das imagens capturadas. Não foram realizadas anotações técnicas quanto à distância focal, tendo como objetivo principal apenas a qualidade da imagem que permitisse boa visualização da incidência do feixe laser. Esta configuração de montagem pode ser vista na Figura 5.

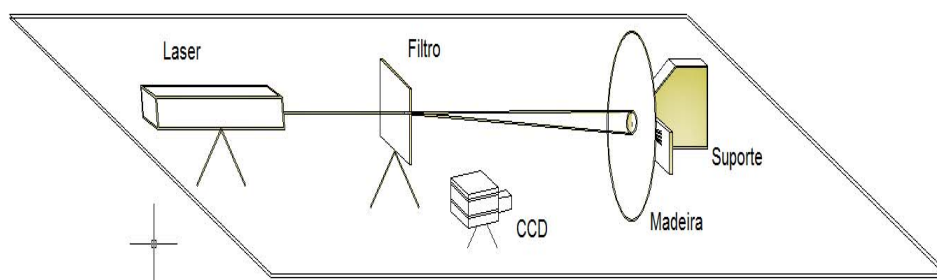


Figura 5 Detalhe de montagem do experimento de validação

Com o laser ligado, iniciou-se a captura da imagem refletida. A primeira imagem capturada foi considerada como sendo a referência de 0° na rotação. Em seguida, a peça foi rotacionada no sentido horário, até atingir os ângulos de 5° , 10° , 15° , 20° e 30° . A cada ângulo, uma imagem foi capturada. Iniciou-se, então, a fase de processamento das imagens, de forma a verificar o comportamento da configuração e a deformação das fibras.

5.3 Aquisição das Imagens

As imagens foram obtidas com a utilização de câmera digital Charge Coupled Detector (CCD), fabricada por Allied Vision Technologies, marca Pike,

modelo F032C IRF16, placa PCI marca Sunix, com capacidade para capturar 208 imagens por segundo. As imagens foram transferidas automaticamente para o computador pelo programa FIREPACKAGE64, sendo armazenadas em diretório com indicação do número da amostra, esforço aplicado e ordem de captura.

5.4 Processamento das imagens

As imagens armazenadas foram digitalizadas e analisadas por meio de um aplicativo de domínio público “Image J” (FISHER, 2010a), que possibilita o processamento e o tratamento para reduzir interferências, eliminar distorções e melhorar o contraste. Foi aplicado um filtro gaussiano blur, com raio de abrangência igual a 6 pixels para reduzir o efeito granulado. Isso permitiu a troca de cada pixel pela média ponderada dos vizinhos. O resultado pode ser observado na Figura 6, ou seja, uma imagem suavizada e com as bordas bem definidas.

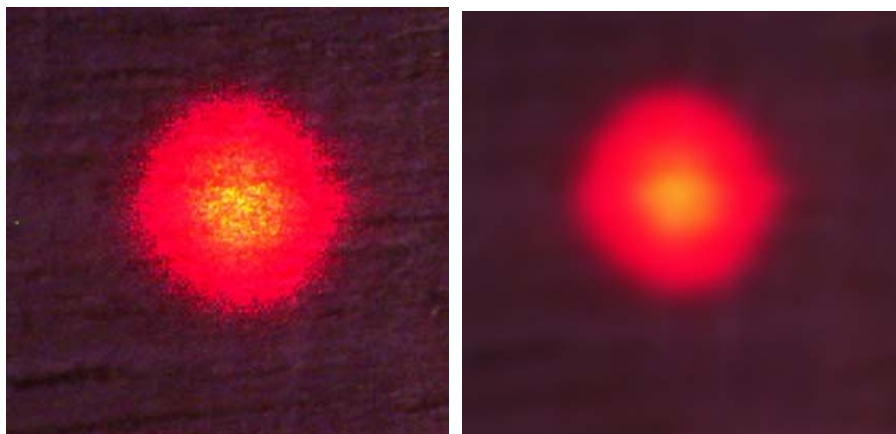


Figura 6 Imagem formada pelo feixe laser (a) sem o filtro; (b) com o filtro gaussiano

Em seguida, foi realizada uma conversão de 8 bits, descartando a informação de cor. Após esse processamento, a imagem apresenta tons de cinza, o que indica que ainda precisa ser segmentada. A imagem agora é submetida a um processo de binarização Thresholding (FISHER, 2010b), que consiste em transformar os tons de cinza em preto e branco. Como resultado, a imagem aproxima-se de uma figura elíptica. Essa é uma informação importante, que pode demonstrar quão inclinada está a fibra da madeira, por meio do cálculo do menor e do maior diâmetro. Com estes valores, calcula-se o ângulo de inclinação em relação ao eixo vertical da imagem. Para este propósito, utilizei o aplicativo Fit elipse do Image J (WAYNE RASBAND, 2010) que ajusta a elipse pelos menores quadrados (Ellipse-Specific Direct Least-Square Fitting). Na Figura 7 é mostrado o resultado.

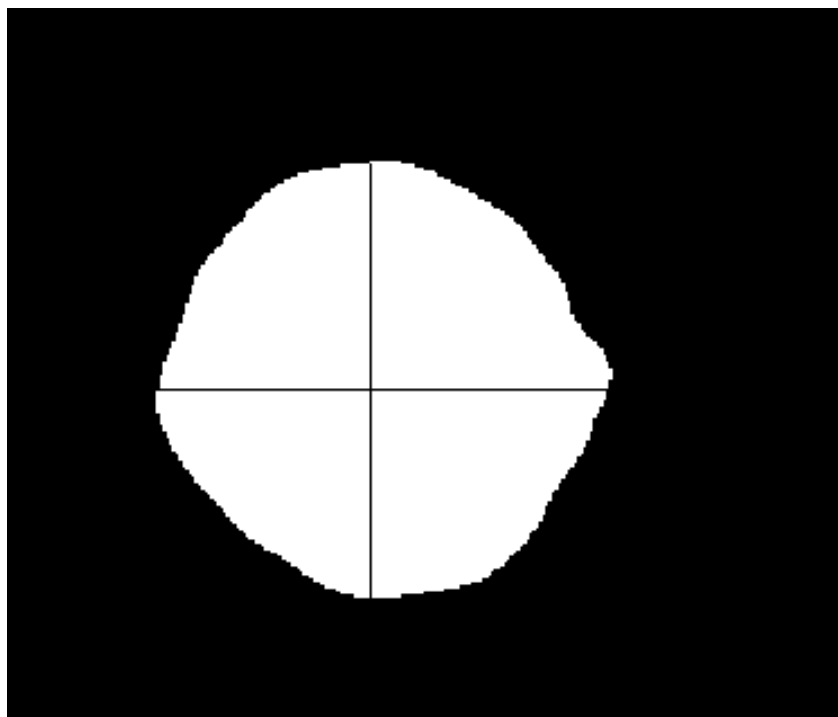


Figura 7 Imagem formada pelo feixe laser binarizada

5.5 Ferramenta para aplicação dos esforços de flexão estática

Foi desenvolvido um dispositivo para aplicação de deformação no corpo-de-prova, ferramenta composta de suporte para apoio e peça esférica para aplicação do esforço do corpo-de-prova. Na Figura 8 observa-se a ferramenta.



Figura 8 Ferramenta para aplicação de esforço de flexão estática

5.6 Preparação das amostras

Foram utilizadas peças de madeira de *Eucalyptus* sp. em forma de viga, pertencentes ao mesmo lote, obtidas no Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Uma verificação visual permitiu a escolha de amostras livres de defeitos.

De acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), os corpos-de-prova devem ser isentos de defeitos e a dimensão da seção longitudinal nunca deve ser inferior a 300 mm. Os corpos-de-prova apresentaram as dimensões de 420x20x20 mm (comprimento, largura e espessura, respectivamente). Na Figura 9 é apresentado o detalhe da peça.



Figura 9 Detalhe do corpo-de-prova

5.7 Ensaio de flexão estática

A configuração da etapa de calibração foi implementada para a realização deste ensaio. A ferramenta de aplicação de flexão estática foi utilizada para provocar deformações controladas no corpo-de-prova. Antes da realização do ensaio, foi necessário definir uma área sobre o corpo-de-prova que

apresentasse uma movimentação das fibras com pouca movimentação translacional, ou seja, que apresentasse uma zona neutra. Com a aplicação desse procedimento, obteve-se a captura das imagens sempre sobre uma mesma fibra. Uma sequência de ensaios preliminares permitiu identificar esta área e registrar os deslocamentos das fibras. Na Figura 10 observa-se a área de aplicação do feixe laser sobre a viga de madeira.

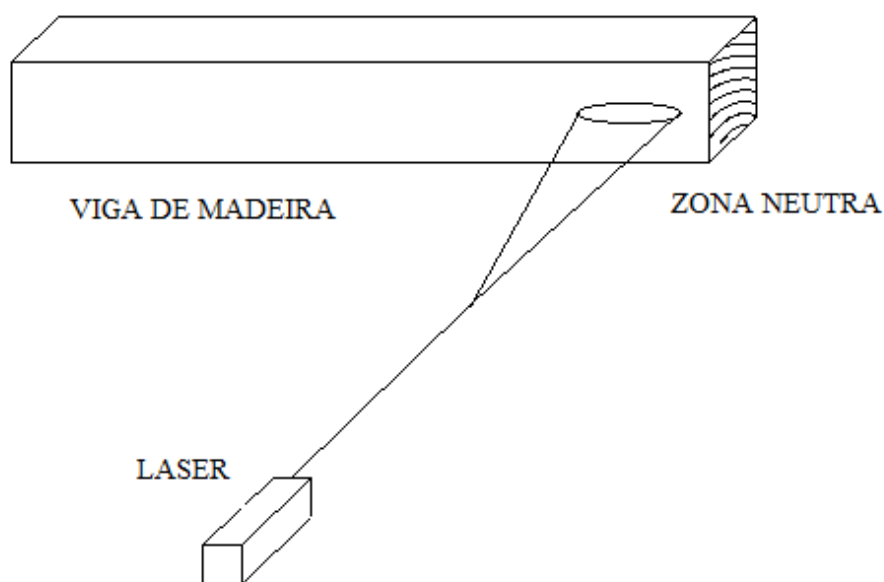


Figura 10 Área de iluminação do feixe laser no corpo-de-prova

Em seguida, iniciou-se o ensaio por meio da ferramenta desenvolvida. O corpo-de-prova foi colocado sobre os suportes. Na Figura 11 observa-se a configuração.



Figura 11 Configuração da montagem da ferramenta para aplicação de esforço de flexão estática com o corpo-de-prova

A seguir, o canhão laser foi ligado e o feixe direcionado sobre a superfície da peça o mais próximo possível da zona neutra com ângulo de incidência de 20° . Na Figura 12 é mostrada a configuração final do experimento.



Figura 12 Configuração final do experimento

Com o corpo-de-prova sobre os suportes e sem a aplicação de esforços, as três imagens iniciais foram capturadas. Iniciou-se a aplicação dos esforços de flexão até provocar deslocamento de 2,5mm no centro da viga, monitorado por meio de uma escala milimétrica. Não foi determinado o valor da tensão aplicada. Houve apenas a preocupação de provocar o deslocamento. As deformações foram provocadas em sequência, até ocorrer a separação da peça. A cada aplicação de um mesmo esforço três imagens foram capturadas num intervalo de, aproximadamente, 2 segundos. Devido à variabilidade das peças de madeira, o mesmo ensaio foi repetido em seis corpos-de-prova.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Validação e calibração do experimento

Nesta primeira fase do experimento, utilizou-se o ângulo de incidência proposto por Faria et al. (2008). Que foi realizada a correlação entre os ângulos de rotação e os obtidos no ensaio. Considerando-se os dados dos ângulos de rotação como sendo a variável independente (x), portanto, isenta de erros e os ângulos medidos como a variável dependente (y), aplicando o modelo da regressão linear simples, os resultados obtidos não apresentaram correlação.

Apesar da anisotropia da madeira constatou-se que não houve um efeito significativo na observação da deformação provocada pela rotação nas fibras da madeira, utilizando o ângulo de incidência em 50° . Com isso, concluiu-se que a configuração proposta mostrou-se ineficaz, apesar de a mesma ter sido proposta por Faria et al. (2008). Com a rotação era de se esperar valores mais coerentes e correlação, de acordo com a deformação da fibra. O resultado indicou a necessidade de rever a configuração proposta por Faria et al. (2008) e as variáveis presentes no experimento.

Após diversos estudos preliminares, a conclusão foi de que o ângulo de incidência do feixe laser foi a principal variável que influenciou o resultado. Diversos ângulos foram testados. A configuração que apresentou o melhor resultado foi aquela que tinha um ângulo de 20° . Assim, alterou-se a configuração. De posse do novo valor, foi realizada nova correlação entre os ângulos aplicados na rotação e os obtidos no ensaio.

Diante das constatações apresentadas na etapa anterior, por meio da Tabela 1 é possível observar os ângulos medidos e a variação de acordo com a rotação.

Tabela 1 Ângulos da elipse formada em função da rotação

ÂNGULO DE ROTAÇÃO	ÂNGULO DA ELIPSE	ÂNGULO CORRIGIDO	ÂNGULO CALIBRADO
0	75,48	0	0
5	80,86	5,38	3,2604
10	93,43	17,95	10,878
15	156,11	80,63	17,873
20	175,47	99,99	22,190
30	197,6	122,12	27,101

Observa-se, pelos dados da Tabela 1, que os valores encontrados para o ângulo da elipse apresentaram tendência de variação, acompanhando a rotação da fibra. Os ângulos entre 0° e 10° apresentaram valores medidos aproximados. A partir de 15°, ocorreu um salto nos valores. Essa diferença pode ser explicada levando-se em conta a variabilidade da microestrutura da madeira, como relatam Hu et al. (2003). Algumas espécies de madeira e a rugosidade superficial afetam a precisão da medição dos ângulos, quando se utiliza espalhamento óptico do feixe laser.

A configuração utilizada mostrou-se mais sensível para os ângulos entre 0 e 10°, indicando a necessidade de tratamento diferenciado para os valores superiores a 15°. Para facilitar a análise, os valores encontrados foram corrigidos, tendo como referência o valor medido em zero grau. Em seguida, esses valores foram utilizados para calibração e validação do experimento.

No Gráfico 1 apresentam-se a reta de aproximação e a equação para os valores corrigidos, utilizando um modelo de regressão linear simples que evidencia a tendência entre os valores.

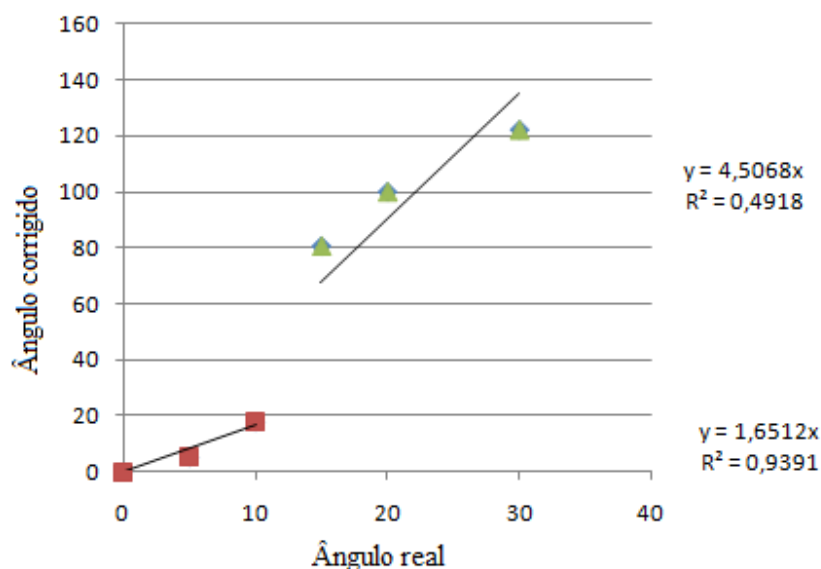


Gráfico 1 Dispersão e reta de tendência do ângulo real de rotação e o corrigido

Utilizando-se o mesmo modelo de regressão linear da etapa anterior, determinou-se novo valor de correlação. Para os ângulos inferiores a 10°, o valor obtido ficou acima de 0,93; para os valores acima de 15°, houve correlação de 0,49. Ficou comprovado também o fenômeno observado por Hu et al. (2003), em que o espalhamento do feixe laser tende a acompanhar a rotação da fibra.

Foi necessário então comparar os valores e encontrar uma reta de calibração para os ângulos. Optou-se por encontrar a equação da reta que melhor se adequou aos ângulos obtidos. Realizando uma interpolação linear, utilizou-se a equação da reta entre o ângulo real e o corrigido para 0°, 5° e 10°. Como o objetivo deste trabalho é determinar a variação do ângulo da fibra, optou-se por utilizar a equação que representa os valores até 10° uma vez que as deformações na madeira causavam variações abaixo desse valor. O coeficiente para os ângulos acima de 15° não foi utilizado.

O Gráfico 2 apresenta a reta de aproximação e a equação de calibração geradas por meio da relação entre a reta do ângulo real e a do ângulo medido para as duas faixas.

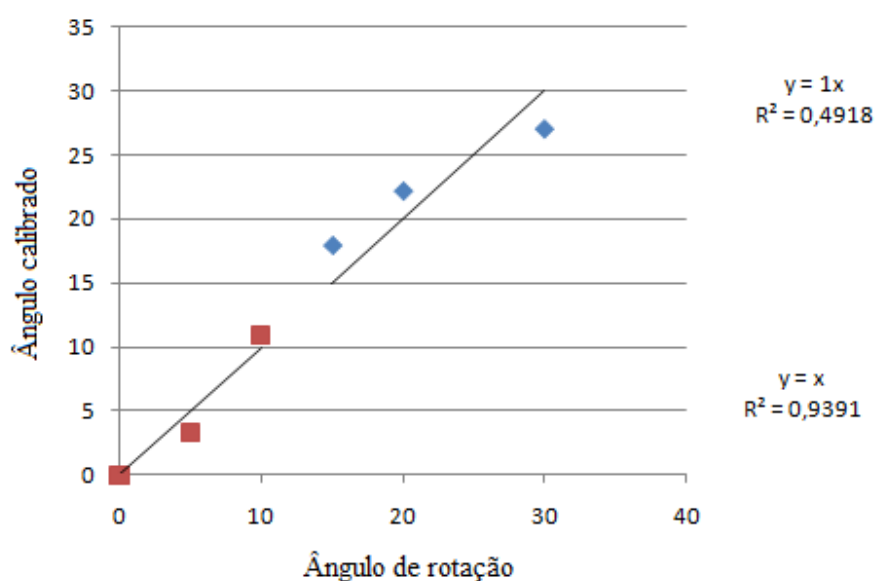


Gráfico 2 Reta e equação de calibração

6.2 Madeira submetida à aplicação de esforços de flexão estática

Nesta segunda fase, os resultados indicaram a necessidade de tratamentos diferenciados, de acordo com o estabelecido na primeira etapa. Assim, os ensaios foram divididos em dois grupos, um de menor valor e outro de maior valor. Cada grupo ficou com três ensaios e seus valores, bem próximos. Os dados da Tabela 2 correspondem aos ângulos de menor valor, ou seja entre 90° e 103°.

Tabela 2 Valor do ângulo medido do alinhamento das fibras da madeira

DEFORMAÇÃO APLICADA	ÂNGULO DO ALINHAMENTO DAS FIBRAS		
	2ª AMOSTRA	4ª AMOSTRA	5ª AMOSTRA
0	95,353	102,159	90,507
	95,464	101,735	90,586
	95,765	101,837	90,525
1	96,528	101,713	91,77
	96,722	101,672	91,511
	96,664	101,679	91,455
2	96,545	102,736	93,541
	96,12	102,816	93,252
	96,017	102,951	93,394
3	96,908	102,745	95,801
	96,511	102,785	95,586
	96,657	102,908	95,636
4	97,09	103,466	96,286
	97,291	103,671	Rompimento
	97,212	103,736	

Na Tabela 3 são apresentados os ângulos medidos de maior valor, ou seja acima de 109°.

Tabela 3 Valor do ângulo medido do alinhamento das fibras da madeira

DEFORMAÇÃO APLICADA	ÂNGULO DO ALINHAMENTO DAS FIBRAS		
	1ª AMOSTRA	3ª AMOSTRA	6ª AMOSTRA
0	121,186	147,25	109,105
	121,860	148,496	109,110
	121,349	148,612	109,719
1	129,179	153,88	109,402
	129,624	150,817	108,936
	131,373	151,669	109,963
2	128,091	154,203	109,944
	128,892	153,451	110,643
	136,686	154,308	110,045
3	136,914	160,782	110,407
	137,013	160,839	109,904
	137,231	Rompimento	110,282

Pode-se observar, pelos dados das Tabelas 2 e 3, que os valores ficaram próximos, facilitando, assim, a análise. Uma vez feito o agrupamento, iniciou-se o tratamento estatístico dentro de cada grupo.

Aplicando o mesmo procedimento da etapa de validação, os valores foram corrigidos, tendo como referência a primeira medida do grupo. A seguir foi aplicado o fator de calibração. Nas Tabelas 4 e 5 é apresentado o resultado.

Tabela 4 Ângulo calibrado do alinhamento das fibras da madeira

DEFORMAÇÃO APLICADA	ÂNGULO DO ALINHAMENTO DAS FIBRAS		
	2ª AMOSTRA	4ª AMOSTRA	5ª AMOSTRA
0	0,000	0,000	0,000
0	0,327	-0,931	0,048
0	1,214	-0,707	0,011
1	3,461	-0,980	0,774
1	4,032	-1,070	0,615
1	3,862	-1,054	0,581
2	3,511	1,267	1,860
2	2,259	1,443	1,683
2	1,956	1,740	1,770
3	4,580	1,287	3,245
3	3,411	1,375	3,113
3	3,841	1,645	3,144
4	5,116	2,871	3,542
4	5,708	3,321	Rompimento
4	5,476	3,464	

Tabela 5 Ângulo calibrado do alinhamento das fibras da madeira

DEFORMAÇÃO APLICADA	ÂNGULO DO ALINHAMENTO DAS FIBRAS		
	1ª AMOSTRA	3ª AMOSTRA	6ª AMOSTRA
0	0,000	0,000	0,000
0	0,141	0,323	0,015
0	0,034	0,353	1,787
1	1,668	1,720	0,864
1	1,761	0,925	-0,492
1	2,126	1,146	2,497
2	1,441	1,803	2,442
2	1,608	1,608	4,476
2	3,234	1,831	2,736
3	3,282	3,510	3,789
3	3,302	3,524	2,325
3	3,348	Rompimento	3,425

Uma análise estatística com regressão linear foi realizada em cada grupo, para a descrição do comportamento da evolução dos ângulos medidos. O Gráfico 3 representa o grau de linearidade da resposta entre esforço aplicado e ângulo medido para os ângulos de menor valor. Já o Gráfico 4 apresenta os ângulos de maior valor.

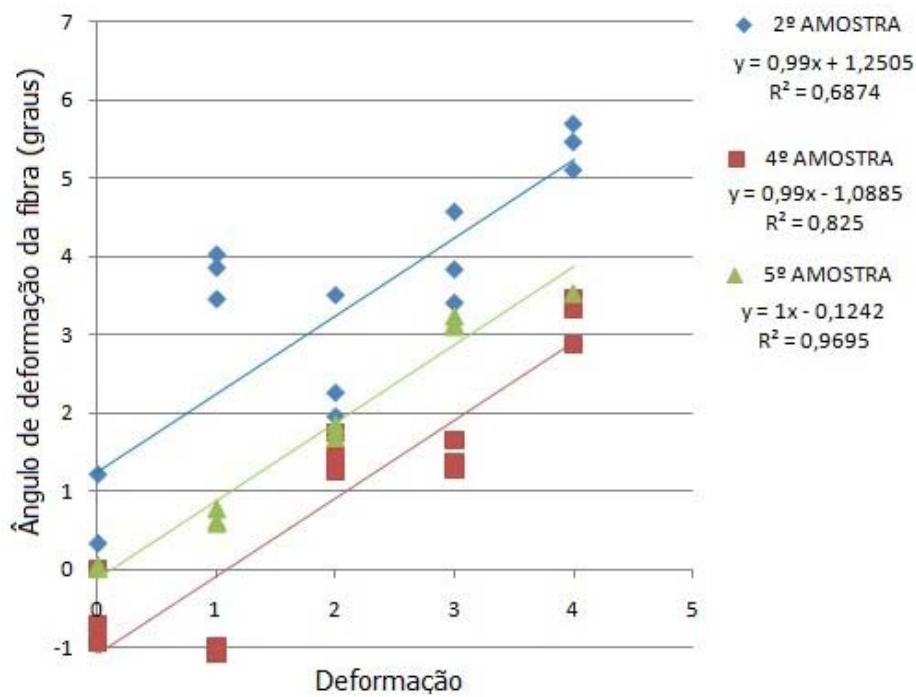


Gráfico 3 Curva de ajuste ao modelo de regressão linear, em função do ângulo e do esforço (2ª, 4ª e 5ª amostra)

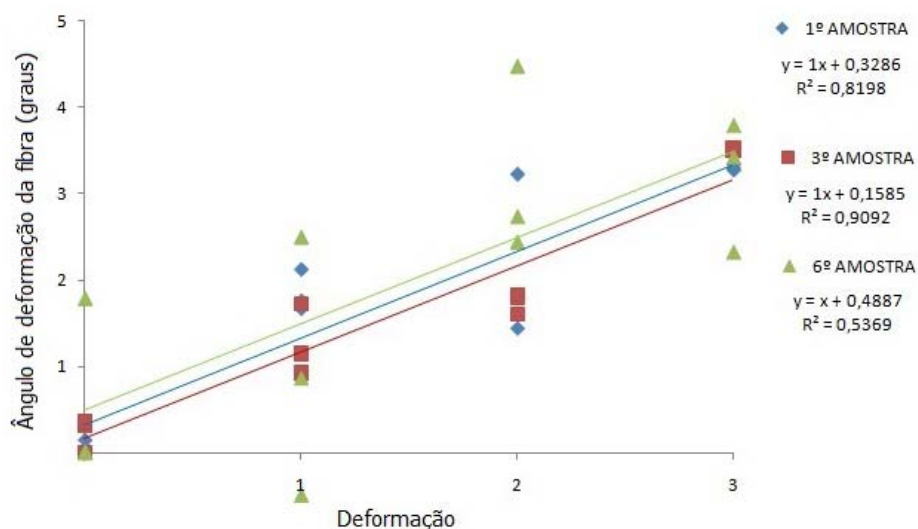


Gráfico 4 Curva de ajuste ao modelo de regressão linear em função do ângulo e do esforço (1ª, 3ª e 6ª amostra)

A análise dos Gráficos 3 e 4 indica uma dispersão nos valores dos ângulos obtidos. Esta variação numérica deve-se, basicamente, a não uniformidade geométrica das fibras do corpo-de-prova, situação semelhante constatada por Faria et al. (2008). De forma coerente, para todos os gráficos, o primeiro aspecto notável é a linearidade entre o esforço aplicado e o ângulo medido. Isso significa que, dentro das faixas analisadas, um aumento do esforço causa uma deformação proporcional na fibra. É interessante observar a variabilidade, em torno das retas, justificando a necessidade de analisar um maior número de pontos.

Um último aspecto a ser considerado é o valor do coeficiente de determinação R^2 encontrado nos dois tratamentos; evidenciando que o modelo linear ajustou-se à tendência dos valores medidos, o que define que a configuração proposta apresenta um resultado quando aplicada análise de

ângulos. É preciso ainda explicar a mudança de sensibilidade para ângulos de 90° a 103° e para ângulos acima de 109° .

7 CONCLUSÕES

Mostrou-se, neste trabalho, que a utilização do fenômeno do espalhamento do laser é uma técnica útil que pode auxiliar na verificação do desvio do alinhamento das fibras da madeira, quando submetidas a esforço de flexão estática. A técnica tem potencial para ser explorada, por não ser destrutiva e, em conjunto com as técnicas tradicionais, permite melhorar a qualidade das avaliações e ensaios.

A análise da correlação entre a variável esforço e o ângulo da grã sugere a sensibilidade da configuração indicando:

- a) a necessidade de diferentes ajustes para diferentes ângulos de deformação e
- b) a necessidade de observação de uma maior quantidade de pontos em uma mesma peça.

Deve-se destacar que o espalhamento do feixe laser acompanha a deformação da fibra e a análise da imagem permite conclusões do ângulo de variação.

Pode-se observar, neste trabalho, que a sensibilidade obtida pela técnica óptica depende diretamente do ângulo de incidência do laser no plano de iluminação. Constatou-se que o ângulo de incidência de 20° forneceu boa resposta, permitindo, assim, medidas qualitativas e quantitativas.

Pode-se, portanto, concluir que os resultados obtidos indicam a possibilidade da utilização da configuração proposta na avaliação do alinhamento das fibras da madeira.

REFERÊNCIAS

ARGANBRIGHT, D. G. Influence of extractives on bending strength of redwood. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 2, n. 4, p. 367-372, Aug. 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Novas tecnologias de ensaios não destrutivos**. Disponível em: <<http://www.abendi.org.br>>. Acesso em: 12 fev. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7190. Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

BAMBER, R. K. et al. Wood properties of flooded gum. **Australian Forestry**, Canberra, v. 1, n. 33, p. 3-12, 1969.

CARREIRA, M. R. et al. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de Pinus sp plantadas no Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 67, n. 1, p. 78-87, jun. 2005.

COSTA, R. M. da. **Proposta de um processo de captura e análise de imagens para determinação de forma e superfície de materiais biológicos pela técnica de moiré**. 2006. 26 f. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

EKLUND, L. The influence of wind on spiral grain formation in conifer trees. **Biomedical and Life Sciences Trees, Structure and Function**, Vaxjo, v. 14, n. 6, p. 1-6, Jan. 2000.

ERIKSON, R. G. et al. Mechanical grading of timber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosapine and grand fir trees from northern Idaho. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 7/8, p. 59-65, June 2000.

EVANS, I. et al. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 7/8, p. 75-87, Oct. 2000.

FARIA, R. de O. et al. Reliability of wood grain orientation measurements using. **Biosystems Engineering**, Edinburgh, v. 100, n. 1, p. 479-483, May 2008.

FISHER, R. et al. **ImageJ**. Disponível em: <<http://rsbweb.nih.gov/ij/download.html>>. Acesso em: 13 jan. 2010a.

- FISHER, R. et al. **Thresholding**. Disponível em:
<<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/threshld.htm>>. Acesso em: 13 jan. 2010b.
- GERHARDS, C. C. Effect of early wood and latewood on stress wave measurements. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 11, n. 2, p. 69-72, Oct. 1978.
- GOMIDE, J. **Estrutura anatômica e química da madeira**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 36 p.
- GONÇALEZ, J. C. et al. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras, ultra-som. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 81-92, jul./dez. 2001.
- HU, C. et al. On-line determination of the grain angle using ellipse analysis of the laser. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 50, n. 1, p. 321-326, Apr. 2003.
- KLOCK, U. **Química da madeira**. Curitiba: FUPEF, 2005. 96 p.
- KOLLMANN, F. et al. **Principles of wood science and technology: solid wood**. New York: Springer-Verlag, 1968. v. 1, 568 p.
- MATOS, J. L. M. de. **A produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de Pinus taeda**. 1997. 117 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- MOURA, M. J. **Caracterização morfológica da madeira de Eucalyptus globulus**. 2000. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2000.
- PEREIRA, M. J. T. et al. The surface measurement of fibre orientation anisotropy and misalignment angle by laser diffraction. **Journal of Pulp and Paper Science**, Ottawa, v. 28, n. 10, p. 341-346, Oct. 2002.
- PFEIL, W. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 224 p.
- ROSS, R. J. et al. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 14-19, June 1998.

ROSS, R. J. et al. Using sound to evaluate standing timber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 49, n. 1, p. 43-44, June 1999.

RUDMAN, P. The influence of genotype and environment on wood: properties of juvenile *Eucalyptus camaldulensis*. **Silvae Genetica**, Frankfurt, v. 19, n. 2/3, p. 49-54, 1970.

SANDOZ, J. L. Grading of construction timber by ultrasound. **Wood Science and Technology**, New York, v. 2, n. 23, p. 95-108, 1989.

SANTOS, S. R. dos. **Influência da qualidade da madeira**. 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2005.

SHIMOYAMA, V. R. S. **Estimativas de propriedades da madeira de Pinus taeda através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando a geração de produtos de alto valor agregado**. 2005. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SIMONAHO, S. P. Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern. **Optics and Laser in Engineering**, Joensuu, v. 41, n. 1, p. 95-103, Jan. 2004.

THUNELL, B. Sortierungs-und sicherheitsfragen bei der vervundung von holz fur. **Holz als Roh und Werkstoff**, Madison, v. 16, n. 11, p. 127-131, Apr. 1958.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: V. N. Reinhold, 1991. 494 p.

WAYNE RASBAND. **ImageJ**. Disponível em:
<<http://rsbweb.nih.gov/ij/download.html>>. Acesso em: 13 jan. 2010.

ZOBEL, B. J. **Wood variation: its causes and control**. New York: Springer-Verlag, 1998. 363 p.