



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ANA PAULA COELHO DUARTE**

**DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA COM O EMPREGO DE IMAGENS  
DIGITAIS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES  
JULHO – 2011

ANA PAULA COELHO DUARTE

**DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA COM O EMPREGO DE IMAGENS  
DIGITAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientador: Prof. PhD Ricardo Marius Della Lucia  
Coorientador: Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

JULHO – 2011

Dissertação 0027

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

D812d Duarte, Ana Paula Coelho, 1986-  
Determinação da rigidez da madeira com o emprego de imagens digitais / Ana Paula Coelho Duarte. – 2011.  
49 f. : il.

Orientador: Ricardo Marius Della Lucia.  
Coorientador: José Tarcísio da Silva Oliveira.  
Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Madeira – Propriedades mecânicas. 2. Análise elástica (Engenharia).  
3. Processamento de imagens – Técnicas digitais. 4. Processamento de imagens auxiliado por computadores. I. Della Lucia, Ricardo Marius. II. Oliveira, José Tarcísio da Silva. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 630

---

À minha avó Mirinha (*In memoriam*).

**Dedico**

*“Cada árvore é um ser para ser em nós  
Para ver uma árvore não basta vê-la  
a árvore é uma lenta reverência  
uma presença remanescente  
uma habitação perdida  
e encontrada  
À sombra de uma árvore  
o tempo já não é o tempo  
mas a magia de um instante que começa sem fim  
a árvore apazigua-nos com a sua atmosfera de folhas  
e de sombras interiores  
nós habitamos a árvore com a nossa respiração  
com a da árvore  
com a árvore nós partilhamos o mundo com os deuses”*

*Antônio Ramos Rosa*

## **Agradeço...**

A Deus pela força incondicional em toda essa caminhada.

À minha família, pai, mãe e irmãos, os quais acompanharam todas as dificuldades vencidas e por terem sido tão compreensivos.

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais pela oportunidade de realizar o mestrado e por todo o apoio e estrutura para realizar as pesquisas.

À FAPES, pelo apoio financeiro e concessão da bolsa de mestrado.

Ao meu orientador Ricardo Marius Della Lucia que, mesmo alguns quilômetros distante, me ajudou sempre que eu precisei. Por não ter se cansado com os inúmeros e-mails e ligações, por ter mostrado suas brilhantes ideias e por ter me ensinado a simplicidade de ver as coisas.

Ao meu co-orientador José Tarcísio da Silva Oliveira, pelos ensinamentos, puxões de orelha e por ter sido amigo nas horas de dificuldade, afinal de contas, parafraseando o mesmo “Rapadura é doce, mas não é mole não, dona Ana”.

À todos os amigos do Laboratório de Tecnologia da Madeira, por terem sido companheiros de trabalho, de viagens e de manguirão também, é claro.

Ao Fábio Fabris, pela extensa consultoria em programação.

Aos professores Alfredo Petrauski, Graziela Vidaurre e Marcos Oliveira, pela participação na banca examinadora, por suas sugestões, comentários e correções.

Aos amigos que fiz em Jerônimo Monteiro, por terem me acolhido tão bem e feito me sentir muito a vontade na terra da laranja.

Aos amigos de longa data, que continuam me trazendo muitas alegrias e momentos felizes.

Ao Diego Rocha Moreira, por não ter medido esforços para me ajudar. Se eu for listar tudo o que ele fez por mim, o agradecimento ficaria muito grande, mas ele sabe que eu sei e serei grata sempre por tudo.

Fica aqui um agradecimento a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente me proporcionaram momentos especiais e que, passando pelo meu caminho, me ensinaram algumas lições e, com isso, creio ter me tornado uma pessoa muito melhor.

**Meu mais que sincero obrigado a todos vocês!**

## **BIOGRAFIA**

ANA PAULA COELHO DUARTE, filha de Laudicéia Maria Coelho Duarte e Antônio Eustáquio Duarte, nasceu em 25 de março de 1986, na cidade de Barbacena, no Estado de Minas Gerais.

Em 2000, concluiu o ensino fundamental no Colégio Santa Catarina, em Juiz de Fora, Minas Gerais.

Realizou o ensino médio no Colégio Magister, em Guarapari, Espírito Santo, onde concluiu o curso em 2003.

Em março de 2004, ingressou na Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em Engenharia Florestal em janeiro de 2009.

Em março de 2009, iniciou o Programa de Pós-graduação em nível de mestrado em Ciências Florestais – Tecnologia de Produtos Florestais – na Universidade Federal do Espírito Santo, submetendo à defesa em 05 de julho de 2011.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVO</b> .....	3
2.1. GERAL.....	
2.2. ESPECÍFICOS.....	
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	4
3.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	4
<b>3.1.1. Rigidez da madeira</b> .....	4
<b>3.1.2. Resistência à Flexão</b> .....	6
<b>3.1.3. Resistência à Compressão Paralela</b> .....	7
3.2. UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS PARA O ESTUDO DA MADEIRA.....	7
3.3. MATLAB®.....	14
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	16
4.1. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA A PARTIR DO ENSAIO DE FLEXÃO.....	16
<b>4.1.1. Determinação da rigidez à flexão por meio da análise de imagens digitais</b> .....	16
<b>4.1.2. Determinação da rigidez à flexão utilizando a curva elástica</b> .....	19
<b>4.1.3. Determinação da rigidez pelo ângulo centro da curva</b> .....	20
4.2. RIGIDEZ À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS.....	21
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	23
5.1. ENSAIO DE FLEXÃO.....	23
<b>5.1.1. Rigidez determinada apenas por cálculo da deflexão no centro do vão</b> .....	23
<b>5.1.2. Rigidez calculada utilizando a curva elástica</b> .....	27
<b>5.1.3. Rigidez calculada pelo ângulo centro da curvatura</b> .....	28
5.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA.....	29
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	34
<b>7. BIBLIOGRAFIA</b> .....	35
<b>ANEXO A</b> .....	38
<b>ANEXO B</b> .....	43
<b>ANEXO C</b> .....	47
<b>ANEXO D</b> .....	48

## RESUMO

DUARTE, Ana Paula Coelho. **Determinação da rigidez da madeira com o emprego de imagens digitais.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES. Orientador: Prof. PhD Ricardo Marius Della Lucia. Coorientador: Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira.

Amostras de madeira foram submetidas a ensaio de determinação de rigidez à flexão e à compressão paralela às fibras. A deflexão sofrida pela amostra foi medida por intermédio de relógio comparador (como na norma NBR 7190), para efeito de comparação e por meio de imagens digitais colhidas por câmera. As imagens também permitiram determinar a equação da linha elástica e o ângulo de curvatura apresentada pela amostra a cada valor de carga. Essas quatro metodologias para obter deformações permitiram calcular, portanto, o módulo de elasticidade de quatro maneiras. Mediu-se também a deformação específica de corpos-de-prova submetidos à compressão, seja pela maneira tradicional, com extensômetros elétricos, como de modo diferente, por análise de imagens. Concluiu-se que a análise de imagens permite inferir com exatidão o valor da rigidez, quando se usam a medida da deflexão no centro do vão ou quando se obtém por regressão os parâmetros utilizados na derivação da curva elástica. A definição do ângulo de curvatura por interpretação das imagens nem sempre apresentou bons resultados. Amostras maiores de madeira talvez permitam maior precisão nessa definição. Os resultados do cálculo da rigidez por compressão da madeira foram pouco satisfatórios, isso certamente porque a deformação é excepcionalmente pequena. Uma câmera de maior qualidade ótica será suficiente para resolver essa falha.

**Palavras-chave:** madeira, propriedades mecânicas, rigidez, módulo de elasticidade, imagens digitais

## ABSTRACT

DUARTE, Ana Paula Coelho. **Calculating the stiffness of wood with the use of digital images.** 2011. Dissertation (Master's Degree on Forest Science) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES. Adviser: Prof. PhD Ricardo Marius Della Lucia. Co-adviser: Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira.

Wood samples were submitted to standard bending and compression tests to determine their stiffness. To compare values, modulus of elasticity was first measured using a dial gage (in bending) or strain-gage (in compression). The samples were filmed at the same time and the film, captured by a Leica V-lux-20, yielded still images in the .jpg format, that were later analysed using a MatLab program. In the case of bending, three values of MOE were obtained from each image and compared to the first. One of the new methods, that permitted to calculate the deflection at the center of the sample in the image, gave values that were very close to those given by the dial. Data were also collected from the images that allowed the calculation by regression analysis of the elastic curve of the beam. MOE values so obtained were also very similar to those of the dial, with a few exceptions. The angle that subtended the curvature of the deflected beam was also found from the images, but gave MOE values quite different, in most cases. It is presumed, in this case, that the sample (a 2 by 2 by 24 cm parallelepiped) was probably too small to allow calculating with precision the lines by regression. In compression, the technique used here, the filming of two parallel lines that should become closer as the sample was loaded, did not also give good estimates of MOE. The calculated strain should amount here to only about 2 or 3 pixels, too few to guarantee a precise capture by the camera. The techniques used in this work are simple, the necessary equipment, cheap, and only one person is needed. A better camera will certainly be sufficient to make them practical and precise.

**Keywords:** wood, mechanical properties, stiffness, Modulus of Elasticity, digital images

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira, um material de origem biológica, possui algumas propriedades particulares que a tornam um produto bastante diferenciado dos diversos materiais disponíveis no mercado, como o aço e o concreto, por exemplo. Pode ser considerada como um dos materiais mais empregados na construção civil, com uma grande diversidade de utilizações, que vão desde a estrutura de edificações até artigos de decoração e de acabamento.

Em todos esses usos, é notória a importância de se conhecer o material para que se dê o uso correto a cada tipo de madeira. Para esse conhecimento, em todo o mundo são estudadas as diversas propriedades da madeira, sendo elas as propriedades físicas, anatômicas, mecânicas, elétricas, térmicas e acústicas. As propriedades da madeira às vezes se relacionam, portanto todas devem ser analisadas quando se busca solução para algum problema. Por exemplo, quando se medem propriedades mecânicas da madeira, pode-se encontrar explicações para os resultados obtidos entre as outras propriedades físicas, como densidade e umidade, e também nas propriedades anatômicas, como porcentagem de fibras, porosidade entre outros.

As propriedades mecânicas têm uma fundamental importância quando se pensa na madeira como um material de construção civil. Quando se deseja saber o quanto uma peça de certa madeira suportará de carga e, também, quais dimensões de peças serão necessárias para que a estrutura projetada tenha estabilidade, um dos principais requisitos é fazer a caracterização mecânica dessa madeira.

A rigidez é uma característica da madeira altamente desejável. O material rígido é aquele que deforma pouco, sendo assim, pode-se definir a rigidez como a habilidade de um material de suportar deformações quando é solicitado por cargas externas.

Existem normas de vários países para o estudo e caracterização da rigidez da madeira como, por exemplo, a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997), a americana D 143 da American Society for Testing and Materials (ASTM, 2009), a europeia European Standards EN 384 (2004), entre diversas outras, sendo que a

fundamentação teórica é a mesma para as normas, mudando apenas alguns aspectos, como o tamanho dos corpos-de-prova, por exemplo.

Há um leque imenso de estudos acadêmicos sobre o comportamento mecânico da madeira. Dentre esses, muitos estudam propriedades de determinadas espécies, ou seja, têm como objetivo a caracterização físico-mecânica da madeira de uma dada espécie e quais são suas possíveis utilizações. Outra parte dos pesquisadores estuda novas metodologias de medição das propriedades da madeira, seja para uma possível atualização da norma de seu respectivo país, seja para possibilitar a utilização de equipamentos mais modernos que chegam ao mercado científico ou, ainda, a fim de adaptar uma técnica utilizada em uma área diferente e trazê-la para a área de tecnologia da madeira.

A importância de agregar novas tecnologias aos estudos da madeira é vista de forma muito clara nos dias de hoje, principalmente porque a acessibilidade a elas está bastante facilitada. Além disso, a comunidade acadêmica ganha a cada dia mais velocidade de troca de informações, graças a internet, possibilitando uma maior circulação dos artigos.

Sendo assim, é desejável o desenvolvimento e o aprimoramento de técnicas de determinação das propriedades mecânicas da madeira e, especificamente, da rigidez da madeira, em que possam ser utilizados equipamentos modernos disponíveis no mercado, a fim de agregar valor e conhecimento ao ensaio, além de otimizar tempo e custo de operação.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. GERAL**

Desenvolver metodologias para determinar a rigidez da madeira, nos ensaios de flexão estática e de compressão paralela às fibras, utilizando técnicas de interpretação de imagens digitais e programação.

### **2.2. ESPECÍFICOS**

- Desenvolver uma ferramenta, utilizando programação, que se aplique ao estudo do comportamento mecânico da madeira;

- Realizar medições da rigidez da madeira no ensaio de flexão estática por intermédio de análise de imagens digitais, fazendo uso de equações elásticas e pela estimativa do ângulo de deflexão, comparando-os aos valores obtidos no teste normatizado pela MB 26;

- Realizar medições da rigidez da madeira no ensaio de compressão paralela às fibras e relacionar os resultados com valores obtidos com o uso da metodologia da norma MB 26.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

Quando se faz uma análise da madeira para indicar sua utilização como produto final, é importante sempre avaliar todas as suas propriedades, pois uma pode interferir numa outra. Por exemplo, uma madeira com um belo desenho e alta densidade pode ter baixa estabilidade dimensional ou até mesmo apresentar dificuldades na usinagem (FOREST PRODUCTS LABORATORY - FPL, 1999).

Diversos autores descrevem as propriedades de espécies de madeira, outros estudam novas técnicas de medi-las, como no caso desse estudo.

#### 3.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

Para qualificar a madeira, além das propriedades físicas, utilizam-se amplamente as propriedades mecânicas, sendo estas, as responsáveis pela resposta do material a solicitações por forças externas (PFEIL & PFEIL, 2007).

Na NBR 7190/97 são abordadas propriedades de resistência à compressão paralela e normal às fibras, de tração paralela e normal às fibras, resistência à flexão e ao cisalhamento, módulo de elasticidade na compressão paralela e normal às fibras, dureza, entre outras.

##### 3.1.1. Rigidez da madeira

Sabe-se que a rigidez de um material pode ser definida como a capacidade de um corpo resistir à deflexão ou deformação provocada por uma força aplicada. Matematicamente, a rigidez é dada pela razão entre a carga e a deflexão, ou seja,  $k = \frac{P}{\delta}$  (WIKIPÉDIA, 2011b), sendo a unidade dada em newtons por metro (N/m).

A elasticidade é a ciência que estuda os corpos que ao serem carregados, sofrem deformação e que, quando a carga é retirada, voltam à sua forma original. Até certo limite, as tensões aplicadas ao corpo são proporcionais às deformações sofridas pelo mesmo. Esse limite é chamado de Limite de Proporcionalidade.

A razão entre a tensão aplicada e a deformação é o que se chama de módulo de elasticidade ou módulo de Young, dados por  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ , onde  $\sigma$  é a tensão e  $\varepsilon$  a deformação. Quanto maior esse módulo, mais rígido é o corpo, pois maiores cargas são necessárias para causar a mesma deformação. É um parâmetro fundamental para a engenharia de materiais, pois se associa com diversas propriedades mecânicas. A Lei de Hooke é justamente a relação linear entre essas grandezas – tensão e deformação (HIBBELER, 2008).

Na construção civil, por exemplo, essas definições são usadas todo o tempo, principalmente quando é necessário projetar as estruturas.

Por ser uma propriedade intrínseca dos materiais, a rigidez é dependente da composição química, da microestrutura, dos defeitos entre outros fatores. No caso da madeira, um material que frequentemente se considera ortotrópico, o módulo de elasticidade tem comportamento diferente para cada posição e podem-se definir dessa forma três constantes elásticas:  $E_L$ ,  $E_R$  e  $E_T$ , referentes ao eixo longitudinal, radial e tangencial da madeira, respectivamente (FPL, 1999).

A rigidez da madeira pode ser avaliada no ensaio de flexão, calculado-se o módulo de elasticidade, pois neste ensaio as fibras também sofrem esforços de compressão paralela. Porém, nesse caso, esse módulo de elasticidade, chamado aparente ( $E_M$ ), é um pouco menor do que o módulo de elasticidade medido pelo ensaio de compressão paralela ( $E_C$ ), e a NBR 7190/97 indica a possibilidade de se usar a relação  $E_M=0,85E_C$ .

Outro termo bastante utilizado no estudo da mecânica da madeira é o coeficiente de Poisson. Ele mede a deformação transversal de um corpo em relação à direção longitudinal de aplicação da força. Na prática, quando se comprime um corpo longitudinalmente, ele tende a aumentar lateralmente e, da mesma maneira, quando se estica o corpo ele tende a encolher lateralmente. A madeira como um material anisotrópico, possui seis constantes elásticas que se referem aos coeficientes de Poisson, sendo eles  $\mu_{LR}$ ,  $\mu_{RL}$ ,  $\mu_{LT}$ ,  $\mu_{TL}$ ,  $\mu_{RT}$  e  $\mu_{TR}$ , sendo que a primeira letra se refere à direção da tensão aplicada e a segunda letra à direção da deformação lateral. Esses coeficientes se relacionam com o módulo de elasticidade  $E$  de acordo com a expressão  $\frac{\mu_{ij}}{E_i} = \frac{\mu_{ji}}{E_j}$ , sendo  $i \neq j$  e  $i, j =$  direção longitudinal, radial e tangencial (FPL, 1999).

Para completar as doze constantes elásticas da madeira, de acordo com o mesmo autor, define-se o módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento ou, ainda, módulo de torção, que nada mais é do que a deformação específica no material, causada por uma tensão de cisalhamento. É dado em unidades de Pascal e na madeira podemos representar três constantes –  $G_{LR}$ ,  $G_{LT}$  e  $G_{RT}$  – cada uma representando os planos  $LR$ ,  $LT$  e  $RT$ , respectivamente.

### 3.1.2. Resistência à Flexão

No ensaio de flexão, de acordo com o Método Brasileiro MB 26 (1940) são utilizadas vigas de 2cm x 2cm x 30cm, com vão de ensaio de 24 cm e carga concentrada no meio do vão. Quando a viga é fletida pela ação dessas cargas concentradas para baixo, as fibras da camada superior contraem-se enquanto que as fibras da camada inferior se alongam. Em alguma parte no centro dessa viga não haverá mudança no comprimento, local esse chamado de superfície neutra. A intersecção dessa superfície com o plano longitudinal de simetria é chamada de eixo da viga. O eixo deformado é chamado de curva de deflexão (BYARS & SNYDER, 1969).

A teoria da viga, que começou com Galileu-Galilei no século XVII e continuou a ser estudada por muitos outros cientistas ao longo dos anos, tais como Bernoulli, Euler, Timoshenko e outros não menos importantes, é uma teoria aproximada baseada em equações de elasticidade. A hipótese dessa teoria é que a seção plana perpendicular ao eixo de uma viga solicitada apenas ao momento fletor (tensão de cisalhamento nula), permanecerá plana durante a flexão, como ilustrado na Figura 1 (BEER & JOHNTON JR., 2006).

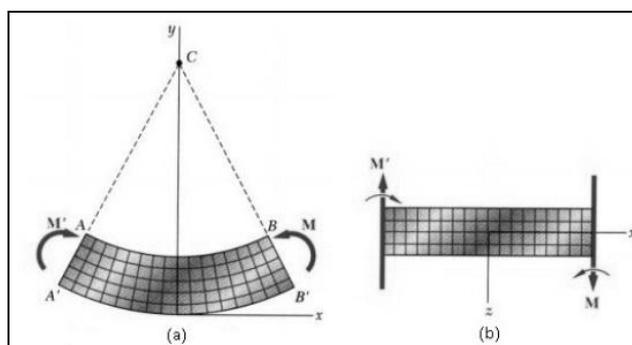


Figura 1. Viga em flexão pura. (a) Seção vertical longitudinal; (b) Seção horizontal longitudinal. (FONTE: Beer & Johnston Jr., 2006)

### **3.1.3. Resistência à Compressão Paralela às fibras**

Definida como a tensão máxima suportada por unidade de área em uma amostra em compressão paralela às fibras (FPL, 1999), a resistência à compressão paralela é muito utilizada na classificação mecânica de madeiras comerciais, e é importante na caracterização de madeiras que serão utilizadas como colunas em construções, pois é a resistência paralela à fibra que, principalmente, irá influenciar no dimensionamento das peças.

De acordo com a norma americana ASTM D 143, os corpos-de-prova para o ensaio de compressão paralela às fibras podem ter dimensões de 50 x 50 x 200 mm ou 25 x 25 x 100 mm; na norma brasileira NBR 7190/97, os corpos-de-prova devem ter 50 x 50 x 150 mm; já na norma européia, EN 384:2003, não determina uma seção, mas dá apenas a geometria básica e a relação entre a seção transversal e o comprimento (a seção deve ser quadrada e o comprimento seis vezes o lado da seção). De acordo com Santos (2007), quanto maior a seção transversal do corpo-de-prova, mais útil é para caracterizar a madeira a nível de projeto estrutural, porém para estudos detalhados do comportamento mecânico da madeira, o autor recomenda corpos-de-prova menores. Como o objetivo do presente trabalho não é qualificar a madeira e sim desenvolver uma nova metodologia, optou-se por utilizar o Método Brasileiro MB 26 (1940), que preconiza corpos-de-prova com dimensões de 20 x 20 x 30 mm, como de costume no laboratório.

Outros aspectos que devem ser monitorados durante o ensaio de compressão são referentes à orientação paralela das fibras em todo o corpo-de-prova, a umidade de ensaio e a velocidade de aplicação da carga.

## **3.2. UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS PARA O ESTUDO DA MADEIRA**

Rosot et al. (2003) utilizaram uma metodologia digital para medição de anéis de crescimento na análise de tronco, a partir de fotografias, processamento digital e sistemas de informações geográficas. Utilizando-se o software *ArcView*, fizeram a vetorização dos limites dos anéis de crescimento, representados por entidades do tipo polígono e com certos comandos, as áreas desses polígonos foram calculadas conforme indicado na Figura 2.

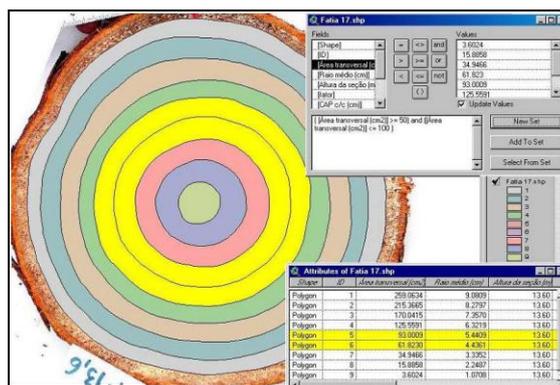


Figura 2. Janelas do software *ArcView* com a fatia e os anéis de crescimento delimitados. (FONTE: Rosot et al., 2003)

Nesse estudo, os autores concluíram que a análise das áreas transversais por análise de tronco digital foi efetuada com sucesso e é uma alternativa viável aos procedimentos utilizados tradicionalmente. Além disso, eles identificaram como vantagem principal a eliminação de algumas etapas como transporte das fatias para o laboratório, secagem, lixamento e espaço para armazenagem do material.

Uma área em que o processamento de imagens digitais é muito utilizada é na histometria<sup>1</sup>. Há algum tempo, normalmente era feita com uso de escalas adaptadas a oculares do microscópio e havia certa dificuldade para medir elementos irregulares ou curvos (SCHAITZA et al., 2003). Atualmente existem vários equipamentos e programas especializados em histometria, como o sistema da Zeiss, Olympus, Kontron e Mediamatics, porém são muito caros. Mas, por outro lado, essa área vem sendo muito estudada e novos equipamentos e programas de menor custo vêm sendo desenvolvidos, como o *SIARCS* e o *Image Tools*. O *SIARCS* foi desenvolvido para análise de raízes e cobertura do solo, porém é amplamente usado para medir áreas transversais no estudo da madeira, técnica que pode ser utilizada para comparar porcentagem de cerne e alborno ou, ainda, para verificar circularidade e excentricidade do disco de madeira. (Figura 3). No caso de medição de comprimentos de elementos anatômicos, como fibras, por exemplo, os mesmos autores indicam o uso do *Image Tools*, desenvolvido pela Universidade do Texas, que se trata de um programa prático e de fácil compreensão.

<sup>1</sup> Histometria é a medição de elementos anatômicos da madeira, como vasos e fibras.

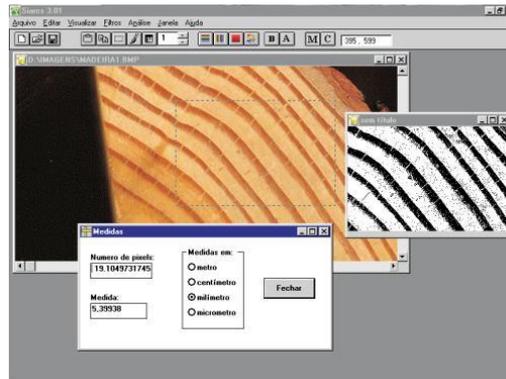


Figura 3. Janela do Programa SIARCS mostrando uma medição de distâncias entre anéis. (FONTE: Macedo et al., 1998)

As imagens digitais também podem auxiliar na quantificação de falhas na madeira em juntas coladas. No trabalho de Abrahão et al. (2003) o objetivo foi desenvolver e testar um novo método para quantificação de área de falhas na madeira, utilizando técnica de processamento de imagem digital e comparando-a com a técnica convencional de quadrículas. Foram utilizados dois tipos de algoritmos de limiarização automática e três tipos de imagens, variando a resolução e o equipamento. Os autores concluíram que a metodologia por limiarização automática pode ser utilizada em substituição do método convencional.

O trabalho de Silva (2007) foi desenvolvido para utilizar o processamento de imagens digitais para medir propriedades mecânicas da madeira. O autor teve como objetivo estudar uma técnica para determinar as constantes elásticas da madeira utilizando imagens digitais editadas previamente e processadas em um programa desenvolvido particularmente para essa finalidade. Segundo o autor, o método é rápido, barato, de fácil aplicação e apresentou resultados muito semelhantes aos descritos na literatura pesquisada.

Ramos et al. (2010) avaliaram a aplicação da análise digital de imagens na medição de deslocamentos auto-equilibrados e impostos em corpos-de-prova de madeira (Figura 4). As imagens foram obtidas antes e após a deformação das peças por retração durante a secagem e por compressão com ciclos sucessivos de carregamento e descarregamento. Os autores concluíram que a técnica pode ser utilizada com vantagens no estudo de importantes propriedades da madeira e que, para o estudo em questão, a técnica obteve aprovação.

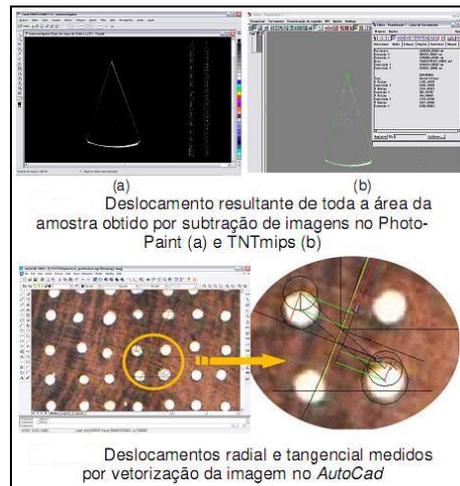


Figura 4. Análise de imagens digitais para medição dos deslocamentos impostos e auto equilibrados. (FONTE: Ramos et al., 2010)

Em outro estudo, Ramos et al. (2011) mediram deslocamentos sucessivos em madeira de *Pinus caribaea* através de relógios comparadores e também de imagens digitais. Foram feitos dois ensaios, em um foram tomadas fotos a cada 50 N e no outro a cada 100 N. As imagens digitais foram analisadas no programa GIMP 2.0 a partir da técnica de sobreposição (Figura 5). Os valores obtidos através do método por imagens foram menores que os valores das leituras do relógio comparador, segundo os autores, porque as fotografias foram tomadas já no trecho plástico da madeira.

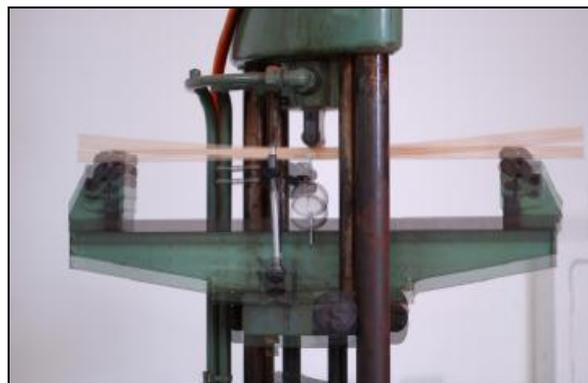


Figura 5. Imagens sobrepostas para posterior análise. (FONTE: Ramos et al., 2011)

Silva e Trugilho (2003) desenvolveram um trabalho cujo objetivo era verificar o comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno a diferentes temperaturas. As amostras foram submetidas a temperaturas finais variando de 200°C a 900°C em um forno elétrico a uma taxa de aquecimento de 1,3°C/minuto.

As imagens tratadas foram processadas em um analisador de imagens (Micro-Videomat Zeiss), no qual a imagem é formada por um sistema ótico e transferida para a tela onde será analisada. Dessa forma obtiveram as taxas de redução linear longitudinal e transversal, seccional longitudinal e transversal e volumétrica. Os autores concluíram que o método de análise de imagens utilizado no estudo foi eficiente e funcional.

Perré e Huber (2007) estudaram um novo método para medir contração transversal – radial e tangencial – da madeira ao nível de tecido, utilizando microscópio óptico de luz refletida, uma objetiva padrão, uma objetiva de imersão em água de mesmo aumento e uma câmera digital conectada a um computador. Imagens de pequenas zonas chamadas de sub-unidades eram tomadas em pares, uma imagem tomada durante imersão em água e outra após secagem em estufa, e analisadas em uma ferramenta de análise vetorial de imagens desenvolvida pelos próprios pesquisadores (Figura 6).

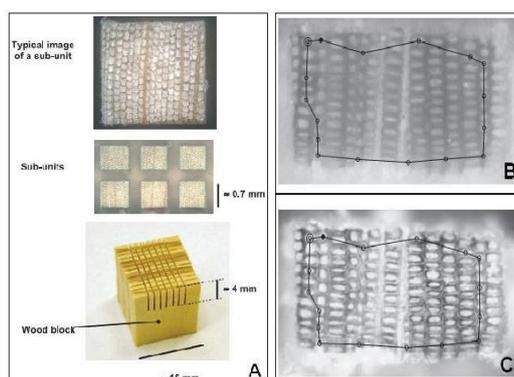


Figura 6. (A) Corpo-de-prova e suas sub-unidade; (B) imagem de uma sub-unidade imersa em água; e (C) imagem de uma sub-unidade seca em estufa. (FONTE: PERRÉ e HUBER, 2007)

Zerbini (2008) testou a técnica de Perré e Huber (2007), utilizando o software MeshPore, desenvolvido pelos mesmos autores, nos laboratórios da Ecole Nationale Du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), na França. Esse software registra as imagens e calcula os valores de retratibilidade tangencial e radial. O autor recomendou o aperfeiçoamento do programa utilizado ou desenvolvimento de outro que tenha melhor portabilidade entre softwares, melhor visualização das imagens, dentre outras recomendações.

Clair et al. (2003) estudaram uma nova técnica para medição das contrações radial, tangencial e longitudinal da madeira, a partir de medições realizadas em discos de madeira. Os anéis de crescimento foram marcados e os discos foram levados ao *scanner*, na condição verde e seca. Após a secagem, as contrações foram calculadas, por diferença entre as posições das marcações feitas previamente, gerando, assim, um mapa do disco, identificando as regiões de maior e de menor contração, dependendo da coloração mais escura e mais clara, respectivamente (Figura 7).

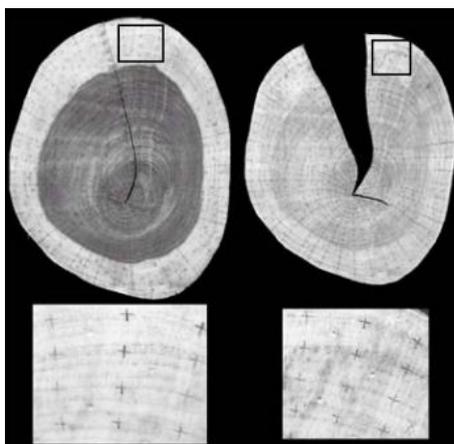


Figura 7. Discos de madeira marcados e levados ao scanner. À esquerda, a amostra úmida e à direita, a seca. (FONTE: Clair et al., 2003)

Gava (2009), ao estudar uma nova metodologia para medição da variação dimensional da madeira durante a secagem, utilizou o método da Thin-Plate Spline (TPS) (Figura 8). Segundo a autora, TPS é uma placa fina de metal de proporções lineares infinitas, onde pontos de carga provocam deformações e, a partir disso, são geradas coordenadas de pontos.

Dentre as conclusões do autor, pode-se citar que o método TPS foi sensível às deformações durante a retração da madeira, o retículo gerado reproduz as deformações e permite os cálculos das retrações em quaisquer dois pontos da superfície dos corpos-de-prova.

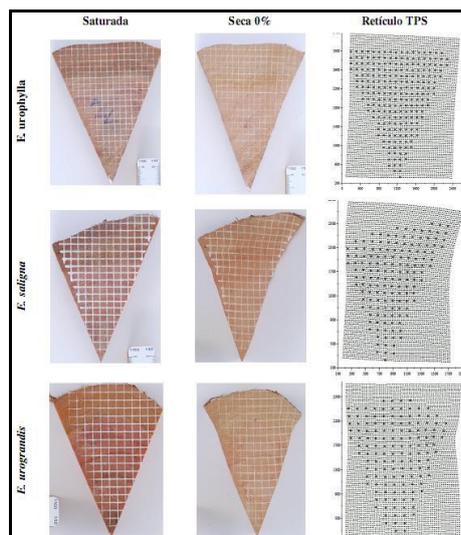


Figura 8. Corpos-de-prova em forma de cunha fotografados saturados, secos e retículos gerados pelo método TPS, representando as deformações ocorridas. (FONTE: Gava, 2009)

Ribeiro (2007) desenvolveu uma técnica utilizando scanner e programação para determinar a contração tangencial e radial em amostras de madeira com pouca usinagem e com anéis de crescimento pouco orientados. O autor concluiu que a técnica é viável, produz resultados semelhantes aos resultados em que se utilizou o paquímetro como instrumento de medição, mas necessita de um aprimoramento, diz o autor.

Um outro ramo da tecnologia da madeira, em que a análise de imagens digitais também tem sido bastante estudada, é na classificação de madeira serrada. A partir de fotografias de tábuas, por exemplo, pode-se quantificar e qualificar diversos defeitos que podem existir na peça em análise.

Rall (2010) teve como objetivo desenvolver técnicas de análise de imagens digitais para detecção de defeitos em madeiras de coníferas. Para isso, o autor analisou quais parâmetros deveriam ser empregados e, também, desenvolveu um software de visão de máquina para a detecção propriamente dita. A conclusão desse trabalho foi que para ter bons resultados, as diversas técnicas por ele desenvolvidas, deveriam ser combinadas, ao invés de se utilizar apenas uma delas. Além disso, o software escrito agilizou o processo de detecção dos defeitos e teve 90,5% de acerto. Na Figura 9, pode ser observada a sequência das imagens geradas pelas técnicas do citado trabalho.

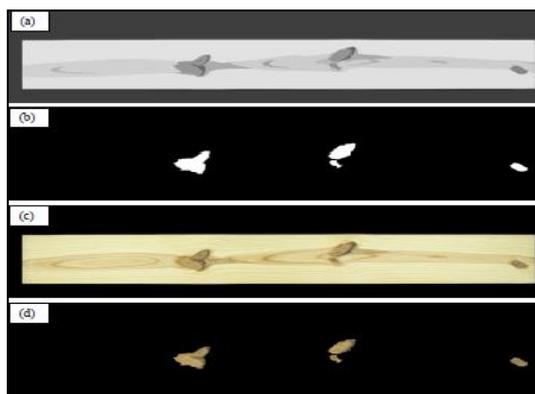


Figura 9. Imagens geradas em software para detecção de feitos. “a) imagem obtida por crescimento de região; b) imagem binária segmentada por limiarização dos nós; c) imagem original; d) imagem obtida pela operação XOR (imagem binária com imagem original) e pelas operações morfológicas.” (FONTE: Rall, 2010)

### 3.3. MATLAB®

Segundo Vieira (2004), o termo MATLAB® é uma junção de “Matrix” e “Laboratory”, ou seja, é um sistema para cálculo científico que permite a realização de algoritmos numéricos sobre matrizes com o mínimo de programação. De acordo com o mesmo autor, o sistema é constituído por quatro partes principais: Linguagem: possui um conjunto vasto de funções que permitem resolver problemas complexos com eficiência; ambiente de trabalho: permite a gestão e visualização das variáveis, ler e gravar variáveis em disco e gerar programas em linguagem MATLAB®; gráficos: permite a criação de gráficos 2D e 3D; toolboxes: é um conjunto de pacotes de funções para diversas áreas de cálculo científico, como estatística, processamento de sinais, entre outras. O toolbox utilizado no presente trabalho é o de processamento de imagens.

Chapman (2009) lista as principais vantagens de se usar o MATLAB®, tais como: facilidade de uso; independência de plataforma, ou seja, tem suporte em diferentes sistemas computacionais; possui uma grande biblioteca de funções predefinidas; contém diversos comandos para desenhos e imagens, sendo que ambos podem ser apresentados em qualquer dispositivo de saída gráfica, desde que o computador suporte; tem ferramentas que permitem que o programador construa interativamente uma interface gráfica de usuário, podendo projetar programas complexos que até mesmo usuários inexperientes poderão operá-lo. Por outro lado, o mesmo autor cita que as principais desvantagens do MATLAB®,

são o fato de ser mais lento que linguagens compiladas, já que ele é uma linguagem interpretada; e o custo. Mas para esse último caso, existe a versão do estudante e é essencialmente idêntico à versão completa.

A técnica da solução de problemas, muito utilizada na engenharia, pode ser otimizada com o uso do MATLAB®. Segundo Silva Filho (2011), o processo para a resolução de problemas possui cinco passos: (1) Enunciar o problema claramente; (2) descrever a informação de entrada e de saída, podendo-se utilizar um diagrama de entrada/saída ou, simplesmente, I/O; (3) trabalhar o problema manualmente; (4) desenvolver uma solução MATLAB®; e (5) testar a solução usando diversos grupos de dados.

Na ciência florestal, ferramentas computacionais têm sido muito utilizadas para diversas análises. Paiva et al. (2010) utilizou o *Statistics Toolbox* do MATLAB® em seu trabalho sobre delimitações de sítios florestais e análise de fragmentos. Já Schoeninger et al. (2008), utilizou o *Neural Network Toolbox* em seu trabalho sobre redes neurais artificiais para mapeamento de biomassa e carbono orgânico. Na área específica de tecnologia da madeira, Silva et al. (2005) utilizaram o MATLAB® para análise das imagens dos procedimentos sobre a interação da luz laser na avaliação da textura de madeiras.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Todo o experimento foi realizado no Laboratório de Propriedades Mecânicas da Madeira, da Universidade Federal de Viçosa. Foram utilizadas várias espécies de madeira, sendo elas *Pinus caribaea*, *Eucalyptus grandis* e *Dinizia excelsa*.

Todas as amostras testadas neste trabalho estavam secas ao ar. A umidade das amostras e a densidade da madeira foram calculadas pelo método descrito na norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

### 4.1. DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA A PARTIR DO ENSAIO DE FLEXÃO

#### 4.1.1. Determinação da rigidez à flexão por meio da análise de imagens digitais

Para determinação da rigidez à flexão por meio da análise de imagens, foram utilizados corpos-de-prova com dimensão de 2 x 2 x 30 cm na forma de um paralelepípedo, com 24 cm de vão, conforme preconizado pela norma da ABNT MB26. A utilização da MB 26 ao invés da NBR 7190 deu-se devido à menor dimensão dos corpos-de-prova, reduzindo, assim, a quantidade de material em cada ensaio.

O ensaio foi feito utilizando uma máquina universal da marca EMIC de 100 kN. Durante o ensaio, o corpo-de-prova foi vinculado a dois apoios articulados móveis, sendo o equilíbrio do sistema garantido pelo atrito com o cutelo, conforme Figura 10.

Para a captura das imagens foi utilizado uma filmadora Leica V-Lux20, de 12,2 MPixels.

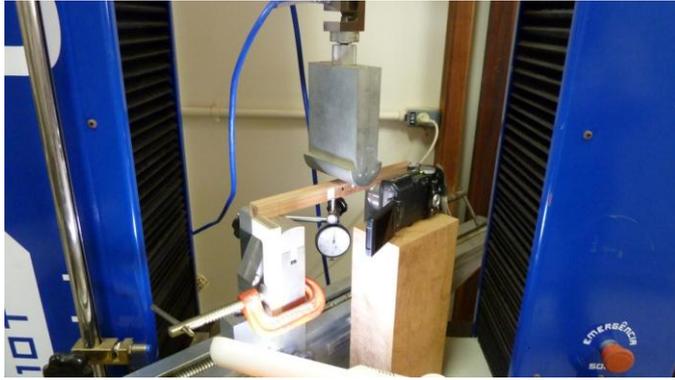


Figura 10. Corpo-de-prova instalado na máquina de ensaio com o relógio comparador e a filmadora, ambos devidamente posicionados.

O posicionamento dos equipamentos durante o ensaio pode ser visto com maiores detalhes na Figura 11, na qual o corpo-de-prova encontra-se apoiado sobre dois suportes de aço, com superfície curvilínea e diâmetro de 12 cm. A carga foi aplicada por um cutelo também de aço, curvilíneo, com diâmetro de 6 cm. A objetiva da câmera está à direita.

A amostra foi marcada com cinco segmentos de reta na horizontal, um deles coincidente com a linha neutra, sendo os outros paralelos a ele. Foram feitos, também, sete segmentos de reta na vertical. Estes segmentos, tanto horizontais quanto verticais, tiveram como função a visualização do efeito da flexão no corpo-de-prova, ou seja, testou-se se o mesmo se comportaria realmente como previsto na teoria das vigas.

Um pequeno círculo negro fixado no corpo-de-prova, de 4 mm de diâmetro, foi utilizado para calibração da câmera. Sabendo-se a resolução da câmera e o tamanho exato do círculo, calculou-se a escala da imagem em pixels/mm.

Um fio de cabelo, de difícil percepção, vai de apoio a apoio e, por não estar afixado à madeira, não sofre deflexão como os segmentos de reta feitos no corpo-de-prova, servindo, portanto, de referência para a medição da magnitude dessa deflexão. Características como finíssima espessura e cor foram fundamentais para a escolha do fio de cabelo como material visual.

Vê-se também, nessa mesma figura, o relógio comparador.



Figura 11. Detalhe do posicionamento dos equipamentos e do corpo-de-prova com os segmentos de reta e o círculo negro.

Montado o esquema, acionou-se a máquina de ensaio e a filmadora, ao mesmo tempo. O movimento vertical do cutelo, para baixo, foi fixado em 1 mm por minuto. Após o rompimento do corpo-de-prova, a máquina universal e a filmadora foram também desligadas e o filme foi transferido para o computador, para posterior análise.

O filme pode ser visto em um programa qualquer de leitura de arquivos do tipo *.mov*, por exemplo, e imagens instantâneas podem ser obtidas com facilidade com a tecla *Print Screen* do teclado do computador, que permite a importação destas para um programa simples de desenho, como o Photoshop, permitindo, assim, a manipulação posterior dessas imagens, quando necessário. Imagens desejadas, como as deformações a cada incremento de carga, podem ser previamente marcadas durante o ensaio na máquina universal, com o auxílio de uma sineta, por exemplo.

Essas imagens foram então processadas no programa escrito na linguagem MATLAB, como se pode ver no Anexo A. Este programa permite capturar os pontos que formam cada uma das linhas de interesse, além de calcular os modelos que as descrevem, a partir de análise de regressão e, por fim, manipulá-los.

Assim, foi obtida facilmente a deflexão no centro do corpo-de-prova, conhecendo-se a equação que descreve a linha do fio de cabelo e a equação da linha traçada mais abaixo, para cada incremento de carga.

#### 4.1.2. Determinação da rigidez à flexão utilizando a curva elástica

A partir do Matlab®, calculou-se também a deflexão  $y$ , não apenas no centro, mas ao longo de toda a viga, definindo-se, assim, a curva elástica.

Quando se trata de uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e com carga concentrada central, a curva elástica é expressa como na Equação 1 seguinte:

$$y = \frac{P}{48 \times E \times I} (4 \times x^3 - 3 \times L^2 \times x) \quad (1)$$

Onde,  $P$  é a carga centrada,  $L$  é o vão da viga com momento de inércia  $I$ ,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $y$  é a deflexão a certa distância  $x$ , medida a partir da extremidade esquerda. Dessa forma, deseja-se conhecer  $E$ , pois se conhecem a deflexão e todas as demais informações.

Rearranjando,  $y = \frac{P \times x^3}{12 \times E \times I} - \frac{P \times L^2 \times x}{16 \times E \times I}$ , obtêm-se as Equações 2 e 3, respectivamente:

$$T = \frac{P}{12 \times E \times I} \quad (2)$$

$$Q = \frac{P \times L^2}{16 \times E \times I} \quad (3)$$

e, assim, obtêm-se a equação 4.

$$y = T \times x^3 - Q \times x. \quad (4)$$

Esse modelo pode ser ajustado por regressão, aos pares de pontos  $x$  e  $y$ , usando-se para isso, por exemplo, o programa STATISTICA®.

### 4.1.3. Determinação da rigidez pelo ângulo do centro da curva

Vários segmentos de reta verticais foram traçados no corpo-de-prova, no momento de seu preparo. Dois deles (A-A e B-B), equidistantes do centro, foram escolhidos para investigação posterior, conforme Figura 12.

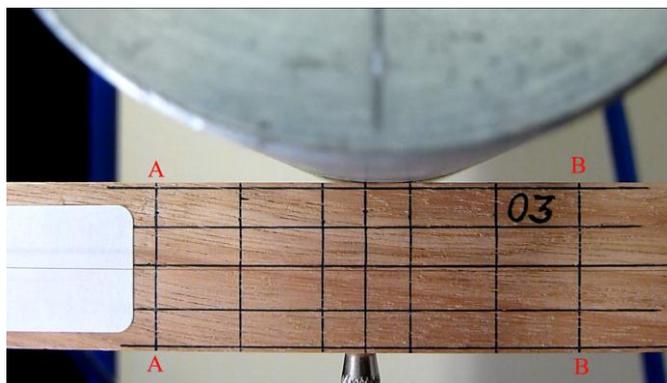


Figura 12. Corpo-de-prova com os segmentos de reta equidistantes ao centro, A-A e B-B, marcados.

Como se sabe, para o desenvolvimento da teoria das vigas, é necessário assumir que segmentos de reta verticais permaneçam retos após o carregamento do corpo-de-prova, desde que esse carregamento não seja capaz de produzir deformações excessivamente grandes. As linhas podem, no entanto, inclinar-se, como ilustrado na Figura 13.

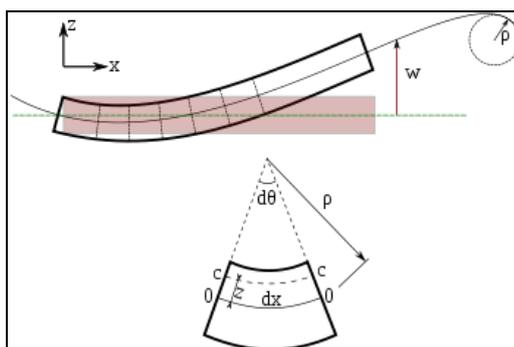


Figura 13. Elemento fletido. (FONTE: Wikipédia, 2011a)

As linhas subtendem um ângulo  $d\theta$ , pois elas são perpendiculares à linha neutra (O-O) e geram um arco de comprimento  $dx$  à distância  $\rho$  do vértice. Mesmo em amostras pequenas, a inclinação é visível (Figura 14).

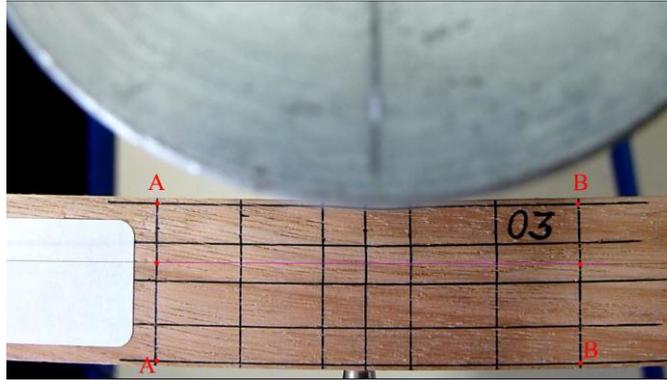


Figura 14. Corpo-de-prova sob carga de 175 kgf, mostrando linhas verticais com inclinação visível a olho nu.

O programa desenvolvido no Matlab facilmente capturou os pontos que compõem essas linhas.

#### 4.2. RIGIDEZ À COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

Para determinar a rigidez à compressão paralela às fibras, foram utilizados corpos-de-prova, de seção 3 x 3 cm e 12 cm de comprimento, esta última dimensão ao longo das fibras, instalados sobre um apoio articulado na máquina universal de ensaio. As amostras foram previamente marcadas com linhas horizontais e verticais, obtidas riscando a madeira com uma lâmina de barbear que se movia dentro de um gabarito (Figura 15). Duas câmeras fotográficas foram montadas em posição ortogonal e filmavam o corpo-de-prova enquanto ele era ensaiado, não necessariamente até a ruptura. O som de uma sineta era disparado, a cada 500 kgf de incremento de carga. Após o ensaio, o filme obtido pela câmera foi processado no computador, a fim de isolar as imagens desejadas a cada carga aplicada.



Figura 15. Esquema adotado para o ensaio de compressão paralela às fibras.

As imagens processadas foram então levadas para serem analisadas em um programa escrito em plataforma MatLab, conforme Anexo B, para calcular a distância entre as duas linhas horizontais. A hipótese gerada pelo trabalho foi que a distância a ser medida deveria reduzir de acordo com a compressão da amostra. Esse programa consiste, essencialmente, de comandos que permitem: (a) isolar os pontos escuros que formam as linhas; (b) determinar a localização x-y desses pontos, (c) ajustar esses pares de pontos a um modelo linear de regressão, obtendo assim as duas equações das linhas horizontais paralelas; e (d) calcular a distância entre dois pontos contidos nessas linhas. No entanto, para simplificar a análise, decidiu-se neste trabalho apenas calcular a distância entre os pontos no centro das linhas.

O diagrama tensão x deformação específica permite calcular rapidamente o módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras ( $E = \sigma / \epsilon$ );  $\sigma$  pode ser dado, por exemplo, em  $\text{kgf.cm}^{-2}$ ;  $\epsilon$ , naturalmente, é adimensional ou está expresso em porcentagem. Não houve, portanto, necessidade de transformar distâncias por intermédio de uma escala, pois todo o tempo trabalhou-se com unidades de pixels.

A distância entre as duas linhas verticais também foi medida numa tentativa de avaliar os coeficientes de Poisson. Alguns corpos-de-prova receberam, ainda, extensômetros elétricos, que permitiam calcular o módulo de elasticidade de uma segunda maneira, podendo-se, dessa forma, comparar os resultados com os mesmos obtidos através da análise de imagens digitais.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os itens que seguem apresentam os resultados dos ensaios de flexão e compressão paralela às fibras. A média da umidade e da densidade ao ar dos corpos-de-prova é de 15,9% e  $0,754 \text{ g.cm}^{-3}$ , respectivamente.

### 5.1. ENSAIO DE FLEXÃO

#### 5.1.1. Rigidez determinada apenas por cálculo da deflexão no centro do vão

A Figura 16a mostra a imagem obtida do filme produzido durante o ensaio de uma amostra, no instante em que a carga começou a ser aplicada. Posteriormente, foi capturado, a partir do mesmo filme, o momento em que a carga atingiu 175 kgf, resultando na Figura 16b.

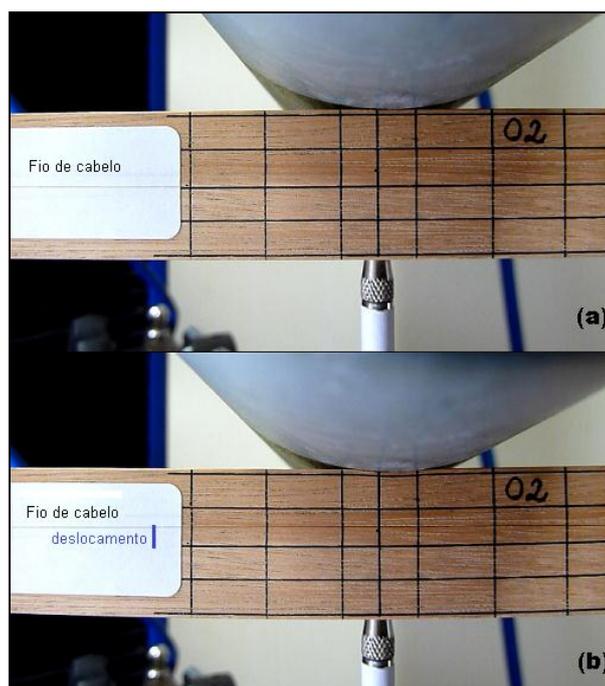


Figura 16. Corpo-de-prova submetido ao ensaio de flexão. (a) antes de aplicar a carga; (b) após o carregamento atingir 175 kgf.

Observa-se, na Figura 16b, o fio de cabelo bastante deslocado (na primeira imagem esse fio não era visível porque coincidia com a linha neutra). A etiqueta à esquerda ajuda na sua visualização.

A distância entre o fio de cabelo e a linha inferior, que aumenta a cada incremento de carga, dá a magnitude da deflexão sofrida pela madeira, permitindo, assim, calcular sua rigidez.

As figuras 17a, b, c a seguir, ilustram os resultados produzidos com o programa MatLab, a partir de imagens capturadas no filme nas posições correspondentes às cargas de 0, de 75 e de 175 kgf.

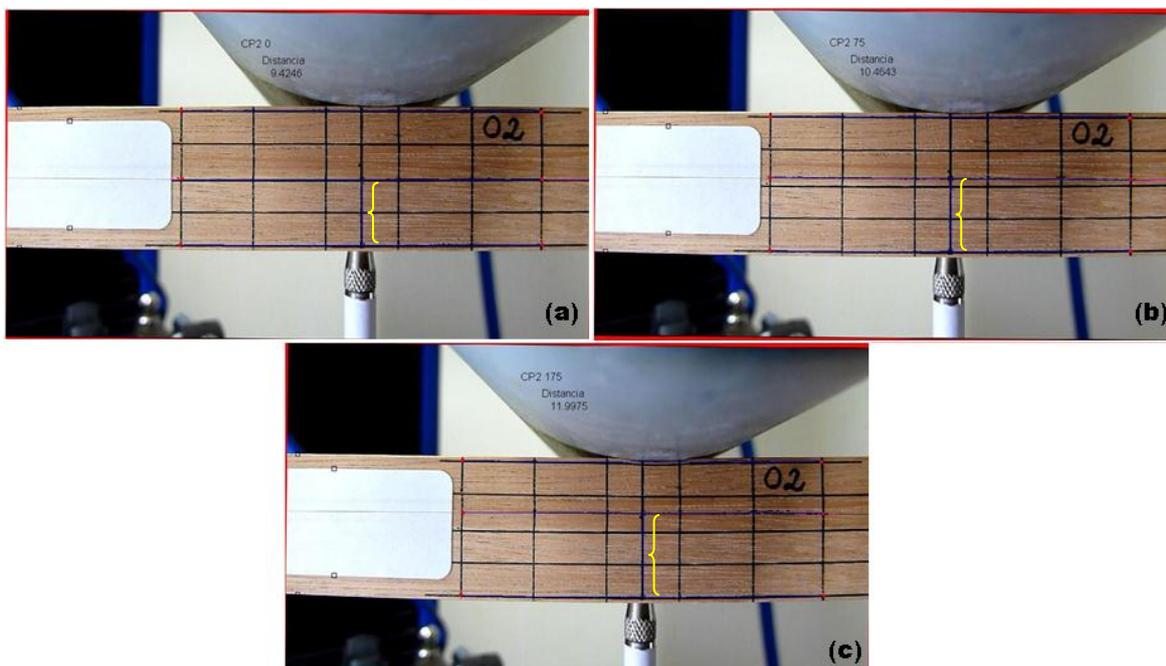


Figura 17. Corpo-de-prova submetido ao ensaio de flexão e seus respectivos resultados com base no programa Matlab, correspondentes aos seguintes carregamentos: (a) sem carregamento; (b) após atingir 75 kgf; (c) quando o carregamento atingiu 175 kgf.

Observa-se na Figura 17, a presença de três linhas azuis, todas produzidas pelo programa. A linha do meio é a solução de um modelo de primeiro grau que foi ajustado aos pontos que descrevem o fio de cabelo. A terceira, abaixo, é também a solução de outro modelo, de segundo grau, ajustado aos pontos da linha inferior. A linha vertical, marcada entre chaves, liga o centro do fio de cabelo e o ponto de mínimo da equação de segundo grau. Essa linha representa a deflexão sofrida com essa carga. O valor dessa flecha é mostrado na parte superior das respectivas figuras ('Distancia').

A Tabela 1 traz como exemplo os resultados obtidos quando analisadas as informações de um corpo-de-prova.

Tabela 1. Exemplo das deflexões sofridas por uma amostra

CARGA (kgf)	DEFLEXÃO (cm)
0	0
25	0,03005
50	0,07624
75	0,1114
100	0,1357
125	0,1702
150	0,1948
175	0,2456
200	0,2850

Essas duplas de valores carga-deflexão, quando submetidos a um programa de análise simples, produzem o diagrama de dispersão, como ilustrado na da Figura 18.

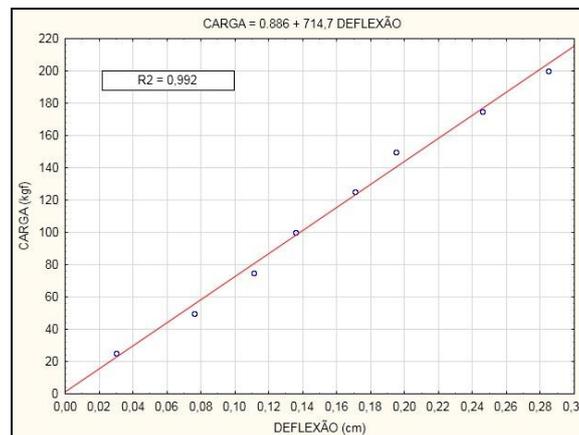


Figura 18. Diagrama carga x deflexão referente aos valores da Tabela 1.

Observa-se que o ajuste foi muito bom, com o  $R^2 = 0,992$ . Até a carga de 175 kgf, o comportamento segue a lei de Hooke. Quando a carga era nula, obtinha-se um valor de deflexão também bem perto do zero, não havendo necessidade de desprezar esse par de pontos, como frequentemente se faz. O mesmo pode-se dizer da carga de 175 kgf, a qual se ajusta bem ao modelo.

De posse desse modelo, pode-se calcular a rigidez à flexão, com o emprego da Equação 5, que é a equação da linha elástica:

$$E = \frac{P \times L^3}{48 \times \delta \times I} \quad (5)$$

Em que  $E$  é o módulo de elasticidade,  $I$  é o momento de inércia e  $L$  é o vão.  $P$  é uma carga qualquer, geralmente dentro do limite elástico, na qual se mediu certa deflexão,  $\delta$ .

Por exemplo, a equação da Figura 18 fornece, quando a carga é 100 kgf, uma deflexão de 0,1791 cm. Esses valores substituídos em (5), sabendo que  $L$  vale 24 cm e que o corpo-de-prova tinha seção transversal  $h = 2,01$  cm e  $b = 2,01$  cm, resultaram em  $E = 120.600 \text{ kgf.cm}^{-2}$ .

O mesmo corpo-de-prova, quando ensaiado e filmado, teve a deflexão medida por relógio comparador, de forma destrutiva. Calculado o módulo com essa deflexão, obteve-se o valor  $E = 144400 \text{ kgf.cm}^{-2}$ .

Esses mesmos procedimentos e cálculos foram repetidos usando outros corpos-de-prova e deram origem à Tabela 2, onde se encontram os módulos de elasticidade calculados utilizando o método através das imagens digitais e o método utilizando o relógio comparador.

Alguns diagramas carga x deflexão são apresentados no Anexo C. O ajuste foi sempre bom e foram poucos os pares de pontos que poderiam ser descartados. Isso realmente não foi feito nesse trabalho. Portanto, o valor do módulo de elasticidade poderia certamente variar, de acordo com a opção do interpretador dos resultados de descartar ou não certos pares de pontos.

Tabela 2. Módulos de elasticidade à flexão de amostras de eucalipto, calculados com as três metodologias através das imagens digitais e através do relógio comparador

Amostra	Erelógio	Ecentro do vão	Ecurva elástica	Eângulo
01	154400*	162600	T = 158900 Q = 161600	118080
02	132500	108200	T = 160045 Q = 165200	144500
03	146600	147500	T = -- Q = 173600	202200
04	166400	163640	T = 168700 Q = 173600	99850
05	141200	139100	T = 111290 Q = 95940	327800
06	144400	154600	T = 124900 Q = 140950	---
07	150300	162900	T = 115130 Q = 132000	209900

\*  $\text{kgf.cm}^{-2}$

### 5.1.2. Rigidez calculada utilizando a curva elástica

Na Figura 17 (c), pode-se visualizar a curva da deflexão sofrida pela amostra na linha azul na borda inferior do corpo-de-prova, sob a carga de 175 kgf. Os pontos (os pixels) que formavam o segmento de reta marcado de cor preta puderam ser facilmente capturados e manipulados. Calculando-se a distância dos pontos até a extremidade esquerda do corpo-de-prova, obteve-se a distância  $x$  que, por sua vez, pôde ser tomada como uma variável que prediz a deflexão  $y$ , calculada subtraindo-se a posição original de cada pixel da nova posição, sob respectiva carga.

Ajustando o modelo da Equação 4, por regressão, utilizando os pares de pontos  $x$  e  $y$ , obteve-se a dispersão que pode ser observada na Figura 19. Deve lembrar-se que a deflexão foi medida apenas em cerca de 5 cm do centro da amostra.

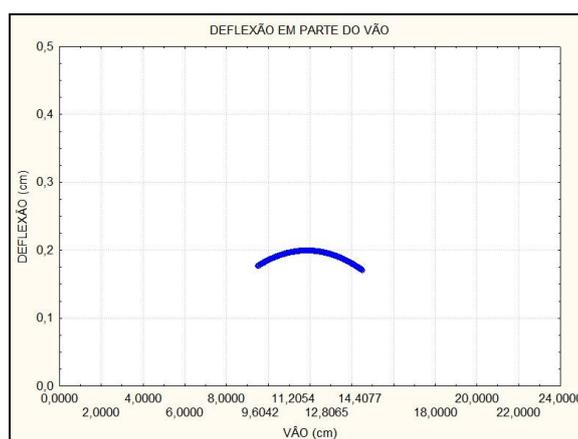


Figura 19. Curva vão x deflexão medida em 5 cm do centro do corpo-de-prova.

Os resultados da regressão múltipla estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Regressão múltipla das deflexões em distância

Variáveis Independentes	Coefficientes	Erros-padrão	Valores de t	Intervalos de confiança 5%
Vão	0,025067	0,000031	819,021	0,025007 até 0,025127
Vão ao cubo	-0,000059	0,0000001	301,727	0,000059 até 0,000058

Da Tabela 3, retira-se o valor de  $T$ , -0,000059, e  $Q_1$  0,025067. Quando substituídos nas Equações 2 e 3, respectivamente, esses valores geram módulos de elasticidade ( $E$ ) de 158900 e 161600 kgf.cm<sup>-2</sup>, muito similares entre si e menos

que 5% superior ao resultado do relógio comparador ( $154400 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ). A razão para essa diferença ainda é obscura e pode ser uma indicação para posteriores estudos. O esmagamento por compressão perpendicular que a madeira sofre pelo cutelo pode estar envolvido nisso, pois diminui a linha vertical, subestimando valores de deflexão e, assim, obtendo valores maiores de módulo de elasticidade.

O intervalo de confiança calculado quando se usa a variável '*Vão ao cubo*' permite calcular valores de  $E$  que variam de 158898 a 161637  $\text{kgf.cm}^{-2}$ , uma diferença de mais de 2000  $\text{kgf.cm}^{-2}$ .

Outros resultados de novos espécimes são dados na Tabela 2, onde, também, se encontram valores de  $E$  obtidos através das metodologias estudadas.

Não se calculou o valor  $R^2$ , utilizado para avaliar a qualidade do ajuste, pois a interseção não foi incluída nesse modelo.

Certamente a metodologia merece aprimoramento. Embora a concordância tenha sido boa em duas amostras (01 e 04), ela não o foi nas demais, sendo muito alta em algumas, muito baixa às vezes em outras.

### 5.1.3. Rigidez calculada pelo ângulo do centro da curvatura

A Figura 20 ilustra uma amostra analisada no programa escrito (Vide Anexo A). A linha reta de cor azul é superposta sobre os pontos vermelhos que foram capturados nos segmentos de reta de cor preta original. A Figura 20 (b), uma mera ampliação da Figura 20(a), mostra a linha direita quase vertical.

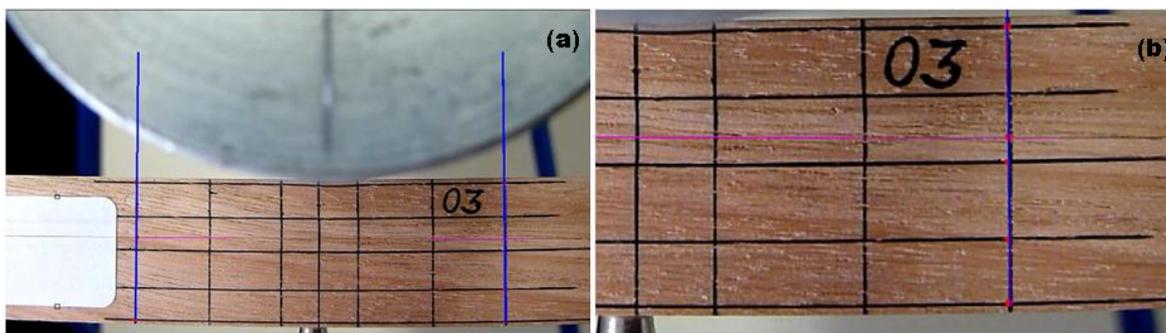


Figura 20. Amostra com as linhas azuis produzidas pelo programa e um pouco estendidas, para melhor visualização. (a) imagem estendida; (b) imagem ampliada, mostrando o ajuste da linha do programa ao segmento de reta marcado previamente e em rosa, o fio de cabelo.

A linha azul sobrepõe perfeitamente a linha negra original. A hipótese da teoria das vigas de que as linhas verticais inicialmente retas permanecem retas durante o carregamento, parece plenamente satisfeita, pelo menos neste corpo-de-prova sob carga de 150 kgf. De fato, essa amostra em particular rompeu-se na carga de 231 kgf, pouco mais elevada.

As linhas retas azuis, obtidas por regressão, têm inclinações de 100 (à esquerda) e de -75, à direita. Esses valores, ou seja, as tangentes dos ângulos que as retas fazem com a horizontal, quando convertidos para graus (porque o MatLab só trabalha com radianos), valem  $89^{\circ}13'57''$  e  $89^{\circ}25'36''$ , respectivamente, e subtendem um ângulo  $d\theta$  (Figura 11) de  $1^{\circ}20'30''$ . O arco  $dx$  tem 5,01 cm e, portanto, o raio  $\rho$  é de aproximadamente 214 cm.

Substituindo-se os valores encontrados na Equação 5, obtém-se  $E = 144500 \text{ kgf.cm}^2$ , valor perfeitamente razoável.

Encontram-se na Tabela 2 os valores de rigidez da madeira medidos pelas quatro diferentes maneiras, ou seja, através das imagens digitais, da curva elástica, do relógio comparador e, também, o módulo de elasticidade através do ângulo formado.

Dos três métodos de determinação de  $E$ , o método de cálculo a partir do centro do vão e pela curva elástica apresentaram resultados muito bons. A medição do ângulo de curvatura falhou, porém pode ser feita se, no futuro, a metodologia for aprimorada, porque ela é a correta.

### 5.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA

O programa identificou com facilidade as linhas previamente traçadas (Figura 21). Mesmo em madeiras escuras o algoritmo foi eficiente, desde que a cor negra da linha seja bem descrita no sistema RGB. Nesse sistema a imagem é decomposta nas cores vermelho, verde e azul, estabelecendo para cada uma dessas cores um valor entre o máximo (255) possível de reprodução daquela cor e o mínimo (0), ou seja, a ausência total dela. Essa descrição pode ser obtida facilmente amostrando o ponto negro em um programa de desenho simples.

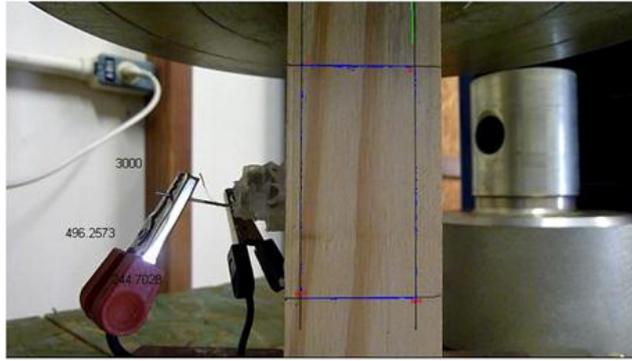


Figura 21. Imagem de um corpo-de-prova após processamento no programa.

As três cores assim identificadas podem alimentar o programa MatLab, originando bons resultados, como se pode ver na Figura 26.

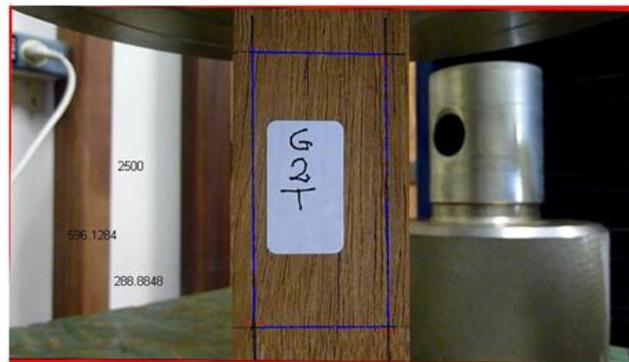


Figura 22. Imagem após processamento, com o ajuste e com os resultados à esquerda.

Na Figura 22, os pontos negros foram transformados em azuis, para melhor inspeção. O grande número de riscos escuros presentes nessa madeira não constituiu obstáculo para a definição das linhas.

Os riscos traçados com lâmina de barbear e gabarito, embora muito finos e nítidos, nem sempre eram adequadamente retilíneos, porque a lâmina procurava seguir as fibras da madeira. Nesses casos, empregou-se uma caneta de tinta nanquim com pena de espessura 0,05 mm.

Os números à esquerda na Figura 22 são a carga em kgf quando a imagem foi tomada, a distância entre as linhas horizontais e a distância entre as verticais.

A iluminação do campo filmado não foi motivo de preocupação. Realmente, o mais importante é o cuidado com o foco. Para tentar diminuir possíveis erros de análise, deve-se desligar o foco automático do aparelho.

Embora câmeras, amostra e máquina de ensaio estivessem sempre imóveis durante todo o ensaio, por alguma razão (vibrações, pequena redução de tamanho da amostra pelo carregamento, pequenas oscilações da luz ambiente), em trabalhos anteriores, houve alterações no tamanho da imagem e quantidade de pixels presentes, o que levou a um exaustivo gasto de tempo durante a pesquisa, até que se resolvesse o problema.

Em algumas ocasiões a captura de certa imagem a partir do filme, utilizando a tecla *PrintScreen* do teclado do computador, levou a obtenção de figuras com distorções que, quando esta ocorria nas linhas de interesse, impediam o seu uso.

A qualidade óptica das câmeras é também importante. As imagens das linhas verticais de uma das câmeras mostravam uma curvatura que proibiu o seu emprego. Essa máquina não pode ser substituída e as suas informações foram perdidas.

Embora a técnica de medição de deformações por imagens, como a empregada aqui, pareça correta, foram obtidos resultados pouco satisfatórios, principalmente quando se analisou os coeficientes de determinação das regressões.

O diagrama da Figura 23a indica que certa amostra de *Eucalyptus cloeziana* tem módulo de elasticidade que vale  $185.970 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , quando a deformação é medida por extensometria elétrica. Quando se usa na mesma amostra o método da câmera fotográfica, o valor é cerca de 5% menor que o obtido pelos extensômetros (Figura 23b).

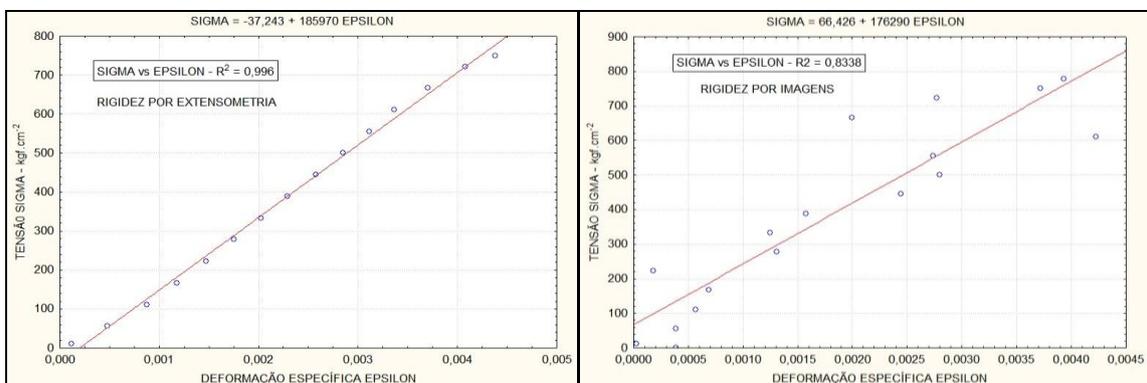


Figura 23. Diagrama tensão x deformação de amostra de *Eucalyptus cloeziana*.  $\epsilon$  obtido com extensômetro elétrico; (b)  $\epsilon$  obtido através da análise de imagens digitais.

O módulo de elasticidade pode, e deve, ser entendido como a inclinação da linha reta nos dois gráficos. As inclinações são essencialmente as mesmas, embora a dispersão dos dados seja um pouco maior pelo método das imagens.

Um segundo exemplo, ilustrado nas Figuras 24a e 24b, mostra uma situação menos interessante. O extensômetro elétrico indica  $E$  de cerca de  $200.000 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , com  $R^2$  próximo a 1 (um). Utilizando o método das imagens, o módulo é 7,65% maior ( $215.310 \text{ kgf.cm}^{-2}$ ) e as deformações unitárias são menores. A dispersão é mais forte e o  $R^2$  explica apenas 47% da variação de  $\epsilon$ , parecendo ser casual os resultados obtidos. A inclinação é quase a mesma, novamente.

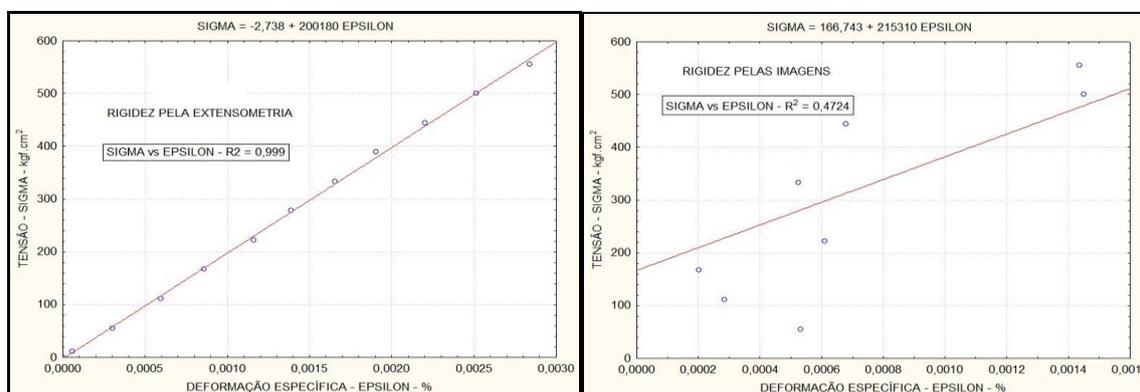


Figura 24. Diagrama tensão x deformação de amostra de eucalipto. (a)  $\epsilon$  obtido por extensometria; (b)  $\epsilon$  obtido por interpretação de imagens.

Outros exemplos semelhantes aos anteriores estão sumariados na Tabela 4. Os gráficos que os ilustram constam do Anexo D.

Tabela 4. Resultados da rigidez das amostras ensaiadas por extensometria e por interpretação de imagens digitais

Espécie de madeira	Rigidez por imagens ( $\text{kgf.cm}^{-2}$ )	$R^2$	Rigidez por extensometria ( $\text{kgf.cm}^{-2}$ )	$R^2$
<b>PINUS</b>	100.440	0,699	59.458	0,9991
<b>PINUS</b>	28.323	0,757	101.530	0,9972
<b>ANGELIM</b>	127.510	0,5285	171.430	0,999

Uma possível explicação para esse insucesso pode residir no fato da câmera possuir baixa resolução. Uma amostra de madeira, representada pelos resultados da Figura 24a, com o mesmo módulo de elasticidade deveria apresentar, quando a tensão fosse de, por exemplo,  $700 \text{ kgf.cm}^{-2}$ , uma

deformação específica de 0,35%. Isso significa apenas dois pixels, quando duas linhas que distam entre si cerca de 600 pixels são submetidas à compressão.

O que também pode ser observado na Tabela 4 é que nas duas amostras de pinus, ora o valor da rigidez por extensometria foi 40% menor que o valor obtido pelas imagens digitais e ora foi 72% maior que o método das imagens. Esse fato torna ainda mais complexa a procura pela falha da metodologia. É provável que algum erro embutido no ensaio por extensometria também esteja influenciando nos resultados.

## 6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados gerados pela análise de imagens digitais no ensaio de flexão, pode-se concluir que essa nova metodologia permite inferir com exatidão o valor da rigidez, tanto quando se usou a medida da deflexão no centro do vão, quanto quando foram obtidos, por regressão, os parâmetros utilizados na derivação da curva elástica. Já a definição do ângulo de curvatura por interpretação das imagens digitais nem sempre gerou bons resultados. Amostras maiores de madeira talvez permitam maior precisão nessa definição.

Quanto ao cálculo da rigidez por compressão paralela às fibras da madeira, conclui-se que o método não foi tão exato, provavelmente porque a deformação é muito pequena. É necessário buscar equipamentos ainda melhores que os utilizados no presente trabalho.

Conclui-se, também, que a utilização de análise de imagens digitais no estudo da rigidez da madeira gera, de modo geral, resultados bastante satisfatórios. O procedimento deverá ser, portanto, aprimorado em futuros trabalhos, se desejar-se fazer uso da câmera fotográfica em trabalhos rotineiros de determinação de propriedades mecânicas de materiais.

As vantagens são inúmeras, especialmente o custo das câmeras fotográficas, que é pequeno. Além disso, elas podem gravar sons e filmar, requerendo-se apenas um técnico para montagem do esquema de ensaio, condução do mesmo e coleta de dados.

Quanto às utilidades práticas da utilização de imagens digitais, a conclusão gerada ao longo do trabalho é que ela pode ser amplamente utilizada em indústrias madeireiras como forma de testar amostras por um ensaio não-destrutivo e que permite arquivamento simples, organizado e sem necessidade de espaço físico e sim espaço virtual.

Além disso, essa metodologia poderá ser amplamente difundida na sociedade acadêmica, principalmente sendo podendo ser utilizada em aulas laboratoriais, auxiliando no entendimento do comportamento da madeira a solicitações mecânicas e agregando outros conhecimentos aos alunos, como o uso de programação, por exemplo.

## 7. BIBLIOGRAFIA

ABRAHÃO, C. P.; VARELLA, C. A. A.; PINTO, F. A. C.; KHOURY JUNIOR, J. K. Quantificação da falha na madeira em juntas coladas utilizando técnicas de visão artificial. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 71-78, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143: Standard test methods for small clear specimens of timber**. West Conshohocken, Pennsylvania, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Ensaio físicos e mecânicos da madeira – MB-26/40**. Rio de Janeiro: 1940. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT/NBR 7190/97: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997. 107 p.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2006. 1255 p.

BYARS, E.F.; SNYDER, R.D. **Engineering mechanics of deformable bodies**. Scranton, Penn.: International Textbook Co, 1969. 444p.

CHAPMAN, S. J. **Programação em MATLAB® para engenheiros**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

CLAIR, B.; JAOUEN, G.; BEAUCHÊNE, J.; FOURNIER, M. Mapping radial, tangential and longitudinal shrinkages and relations to tension wood in discs of the tropical tree *Symphonia globulifera*. **Holzforschung**, Berlin, v. 57, 665-671, 2003.

Comité Européen de Normalisation. **EN 384:2004 – Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density**. CEN Comité Européen de Normalisation. Bruxelles.

Em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Euler-Bernoulli\\_beam\\_theory-2.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Euler-Bernoulli_beam_theory-2.svg)> Acesso em: 31 mai 2011a.

Em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Rigidez>> Acesso em: 31 mai 2011b.

FOREST PRODUCTS LABORATORY - FPL. **Wood Handbook: Wood as an engineering material**. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p. 1999.

GAVA, M. **Método da Thin-Plate Spline – TPS aplicado ao estudo das deformações específicas de retração ( $\epsilon_r$ ) da madeira de *Eucalyptus urophylla*, *E. saligna* e *E. urograndis***. 2009. 116 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 5<sup>o</sup> ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 670 p.

MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; JORGE, L. A. C.; NAIME, J. M.; CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S.; MATTOS, P. P.; PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G. Técnicas radiográficas, tomográficas e de análise de imagens para estudo da madeira. In: **Comunicado Técnico Embrapa Florestas**, Colombo, PR, n. 26, p. 1-6, jul. 1998, 1998.

PAIVA, Y. G.; SILVA, K. R.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, A. Q.; CECÍLIO, R. A. Delimitação de sítios florestais e análise dos fragmentos pertencentes na bacia do Rio Itapemirim. **IDESIA**, Chile, v. 28, n. 1, p. 17-22, 2010.

PERRÉ, P.; HUBER, F. Measurement of free shrinkage at the tissue level using an optical microscope with an immersion objective: results obtained for Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) and spruce (*Picea abies*). **Ann. For. Sci.**, v. 64, n. 3, p. 255-265, 2007.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003. 224 p.

RALL, R. **Processamento de imagens digitais para detecção e qualificação de defeitos na madeira serrada de coníferas de reflorestamento de uso não estrutural**. 2010, 123 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2010)

RAMOS, L.P.; GAVA, M.; GARCIA, J. N. **Ensaio de flexão estática com carregamentos sucessivos em madeira de *Pinus caribaea* var. hondurensis**. Disponível em: <<http://www.usp.br/siicusp/Resumos/16Siicusp/2558.pdf>> Acesso em: 30 mai 2011.

RAMOS, L. P.; GAVA, M.; GARCIA, J. N. **Análise digital de imagens aplicada à medição de deslocamentos impostos e auto equilibrados**. Disponível em: <<http://www.usp.br/siicusp/Resumos/16Siicusp/3478.pdf> > Acesso em: 24 mai 2010.

RIBEIRO, D. M. **Determinação dos coeficientes de contração tangencial e radial da madeira por meio de imagens digitais**. 2007. 24 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

ROSOT, M. A. D.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DISPERATI, A. A.; EMERENCIANO, D. B. Análise de tronco digital: uma nova metodologia para a medição de anéis de crescimento. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 33, n. 3, p. 235-255, 2003.

SANTOS, J. A.; **Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira**. 2007. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Guimarães, 2007.

SCHAITZA, E. G.; MATTOS, P. P.; PEREIRA, J. C. D. Metodologias simples e baratas para análise de imagens planas. In: **Comunicado Técnico Embrapa Florestas**, Colombo, PR, n. 90, p. 1-4, dez. 2003, 2003.

SCHOENINGER, E. R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Uso de redes neurais artificiais como uma alternativa para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de florestas naturais. **Ambiência**, Guarapuava, v. 4, n. 3, p. 529-549, 2008.

SILVA, D. A. da; TRUGILHO, P. F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 56-65, 2003.

SILVA, M. R.; MORI, F. A.; RABELO, G. F.; BRAGA JR, R. A. 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.

SILVA, R. E. **Avaliação das constantes elásticas da madeira por intermédio de imagens digitais**. 2007. 25 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

SILVA FILHO, B. S. Apostila: **Curso de MATLAB® 5.1: Introdução à Solução de Problemas de Engenharia**, 2a. edição, UERJ/Lab. de Eng. Elétrica, 181 p.

VIEIRA, J. M. N. **MATLAB® num instante**. Disponível em: <<http://www.ieeta.pt/~vieira/MatlabNumInstante.pdf>> Acesso em: 16 set 2010.

ZERBINI, N. J. **Madeiras tropicais com potencial comercial da região do Rio Xingu (Pará, Brasil): propriedades tecnológicas e cadeia produtiva**. 2008. 187 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

## ANEXO A

### PROGRAMA PARA MEDIÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA À FLEXÃO - DEFINIÇÃO DA CURVA ELÁSTICA

```
%%COLOQUE O ENDERECO DO ARQUIVO DA FIGURA.
ss=strcat('F:\FLEXAO\TIRADAS FLEX CP6\FLEXCP6 175 BOM.jpg');
%% CRIA ARQUIVO COM DADOS DISTANCIA E DEFLEXAO
savefile2=strcat('F:\FLEXAO\TIRADAS FLEX CP6',' elastymm');
savefile3=strcat('F:\FLEXAO\TIRADAS FLEX CP6',' elastxmm');
%% MOSTRA A FIGURA ORIGINAL
figura=imread(ss);
imshow(figura);
[linhas,colunas,cores]=size(figura);
format long
%% CLICAR 2 VEZES, UMA ACIMA E OUTRA ABAIXO DA AMOSTRA,
ONDE BEM NITIDO,
%% PARA DEFINIR ESCALA

[etx,ety]=ginput(2);
etx=round(etx);ety=round(ety);alto1=0;alto2=0;
for by=ety(1):ety(1)+100
    if (figura(by,etx(1),1) >180) && (figura(by,etx(1),2) >180)
&&(figura(by,etx(1),3) >140),
        alto1=by;
        break
    end
end
rectangle('position',[etx(1)-5,alto1-5,10,10])
for by=ety(2):-1:ety(2)-200
    if (figura(by,etx(2),1) >180) && (figura(by,etx(2),2) >180) &&
(figura(by,etx(2),3) >140),
        alto2=by;
        break
```

```

    end
end
rectangle('position',[etx(1)-5,alto2-5,10,10])
    difetq=alto2-alto1;

    escalaetq=difetq/20.0;
    escalaetqs=num2str(escalaetq);
    text(510,170,escalaetqs);

%% CAPTURA FIO DE CABELO - COMECO E FIM

[cabx,caby]=ginput(2);

cabx=round(cabx);
caby=round(caby);

cabex=0;cabey=0;bb=0;
for fx=cabx(1):cabx(2)
    for fy=caby(1)-3:caby(1)+3
        if (figura(fy,fx,1)>72 && figura(fy,fx,1) <140 && figura(fy,fx,2) >45 &&
figura(fy,fx,2) <125 && figura(fy,fx,3) >32 && figura(fy,fx,3)) <93;
            bb=bb+1;break;end
        end
        cabex(bb)=fx;cabey(bb)=fy;
        rectangle('position',[fx-1.5,fy-1.5,3,3],'FaceColor','b')
    end
end
%% CALCULA EQUAÇÃO PRIMEIRO GRAU AJUSTADA AO FIO DE
CABELO
coefcab=polyfit(cabex,cabey,1)

%% CAPTURA INICIO DAS DUAS LINHAS - PONTOS ROSA
[zx,zy]=ginput(2);

```

```

zx=round(zx);
zy=round(zy);

%% distancia vertical entre linha central e a mais baixa
distvert=(zy(2)-zy(1))/escalaetq;

px=zx(1);py=zy(1);
pxd=zx(2);pyd=zy(2);
for txe=px:px+30;
    if (figura(py,txe,1) <50) %% && figura(tye,px,2) <5 && figura(tye,px,3))
>250;
        break;end
    end
for tye=py:py+30;
    if (figura(tye,px,1) <50) %% && figura(tye,px,2) <5 && figura(tye,px,3))
>250;
        break;end
    end
    rectangle('position',[txe-2.5,tye-2.5,5,5],'FaceColor','b')

for txd=pxd:pxd+30;
    if (figura(pyd,txd,1) <70) %%&& figura(tye,px,2) <5 &&
figura(tye,px,3)) >250;
        break;end
    end
for tyd=pyd:pyd+30;
    if (figura(tyd,pxd,1) <70) %% && figura(tye,px,2) <5 && figura(tye,px,3))
>250;
        break;end
    end
    linmeiox=txe;linmeioy=tye;
    linbaiox=txd;linbaiox=tyd;
    rectangle('position',[txd-2.5,tyd-2.5,5,5],'FaceColor','r')

```

```

%% COMEÇA A CAPTURAR PONTOS ESCUROS DA DEFORMADA
pont=0;elastx=0;elasty=0;

    yps=tyd;
    for kx=zx(2):cabx(2)
    for ky=yps-1:yps+4

        if (figura(ky,kx,1) <106) && (figura(ky,kx,2) < 109) %%&&
(figura(ky,kx,3) <= 8),
            pont=pont+1;yps=ky;
            elastx(pont)=kx;
            elasty(pont)=ky;
            rectangle('position',[kx-2.5,ky-2.5,5,5],'FaceColor','r')
        break; end
    end

end

end

%%CALCULA REGRESSÕES segundo GRAU
cbbb=polyfit(elastx,elasty,2);

coef(1)=cbbb(1);
coef(2)=cbbb(2);
coef(3)=cbbb(3);
%% CALCULA DISTANCIA ENTRE CABELO E LINHA BAIXA; TIRA
DISTANCIA ENTRE
%% CENTRAL E BAIXA; EM CENTIMETROS
deflex=0;localx=0;cc=0;
for gx=cabx(1):cabx(2)
    cc=cc+1;
    ycab=coefcab(1)*gx+coefcab(2);
    ydef=coef(1)*gx*gx+coef(2)*gx+coef(3);

```

```
defley(cc)=((ydef-ycab)-distvert)/escalaetq/10;  
localx(cc)=(gx-cabx(1))/escalaetq/10+9;  
end  
defleytr=defley' ;  
localxtr=localx';  
save(savefile2, 'defleytr', '-ASCII');  
save(savefile3, 'localxtr', '-ASCII');  
  
clearvars
```

## ANEXO B

### PROGRAMA PARA MEDIÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA À COMPRESSÃO PARALELA

```
%% PEDE NOME DO ARQUIVO DA FIGURA
savefilecarg = 'F:\COMP G2\G2T carga.asc';
savefiledistv = 'F:\COMP G2\G2T distvert.asc';
savefiledisth = 'F:\COMP G2\G2T disthori.asc';
savefilecoefh = 'F:\COMP G2\G2T coefich.asc';
savefilecoefv = 'F:\COMP G2\G2T coeficv.asc';
%% SEM ESCALA - SOMENTE PIXELS
ARQUIVO=input('NOME DO ARQUIVO, SEM A EXTENSAO, DEPOIS ENTER =
','s');
ss=strcat('F:\COMP G2\AAA COMP G2T ', ARQUIVO, '.jpg');
arch=str2num(ARQUIVO);
%% MOSTRA A FIGURA ORIGINAL
figura=imread(ss);imshow(figura);
[linhas,colunas,cores]=size(figura);
disp(['ARQUIVO NOME = ',ARQUIVO]);
text(230,350,ARQUIVO);
        save(savefilecarg, 'arch','-ascii','-append')
%% CALCULA O CENTRO BEM ABAIXO
ycent=500;
for xc=1:colunas
if figura(ycent,xc,1)>130 && figura(ycent,xc,2)>110;
extesq=xc;
break;end;end
for xc=colunas:-1:1
if figura(ycent,xc,1)>130 && figura(ycent,xc,2)>110;
extdir=xc;
break;end;end
diff=extdir-extesq;
xcent=diff/2+extesq;
```

```

%% FAZER CLICK PERTO DO CRUZAMENTO ACIMA, ESQUERDA E DIREITA
%% CLICK NO CRUZAMENTO ABAIXO, ESQUERDA E DIREITA
[xcx,ycy]=ginput(6);
xcxi=xcx;ycyi =ycy;
xcx=round(xcx);ycy=round(ycy);
for kl=1:6
    vx=xcx(kl);vy=ycy(kl);
    rectangle('position',[vx-2.5,vy-2.5,5,5],'edgecolor','r')
end
%% TIRA AMOSTRA LINHAS HORIZ ACIMA, HORIZ ABAIXO
for f=1:2
    bh=0;linhaxxx=0;linhayyy=0;
    for cimaxx=xcx(2*f-1):xcx(2*f)
        fim=0;
        for cimayy=ycy(2*f-1):ycy(2*f)
            if figura(cimayy,cimaxx,1)<10 && figura(cimayy,cimaxx,1)>2;
                bh=bh+1;fim=fim+1;
                rectangle('position',[cimaxx-.5,cimayy-.5,1,1],'edgecolor','b')
                linhaxxx(bh)=cimaxx;linhayyy(bh)=cimayy;
                if fim==2; break;end;
            end;end
        end
    end
    %% CALCULA A POLINOMIAL DE GRAU UM
    format long
    coefregrh=polyfit(linhaxxx,linhayyy,1);
    save(savefilecoefh, 'coefregrh','-append','-ascii')
    %% TRACA AS LINHAS
    bbb=0;kx=0;ky=0;
    for cimaxx=xcx(2*f-1):xcx(2*f)
        bbb=bbb+1;
        kx(bbb)=cimaxx;
        ky(bbb)=coefregrh(1)*cimaxx+coefregrh(2);
    end
    line(kx,ky,'Color','b','LineWidth',1)

```

```

%% CALCULA O PONTO MEDIO
meioy=coefregrh(1)*xcent+coefregrh(2);
%%rectangle('position',[xcent-2.5,meioy-2.5,5,5],'edgecolor','b')
meioyy(f)=meioy;
end
    distante=meioyy(2)-meioyy(1);
    sdisth=num2str(distante);
    text(130,500,sdisth);
        save(savefiledistv, 'distante','-append','-ascii')
%% ACHA AS VERTICAIS
for f=1:2
    bh=0;linhaxxx=0;linhayyy=0;
    if f==1; d=-1;else d=1;end
    for cimayy=ycy(f):ycy(f+4)
        fim=0;
        for cimaxx=xcx(f):d:xcx(f+4)
            if figura(cimayy,cimaxx,1)<30 && figura(cimayy,cimaxx,1)>27;
                bh=bh+1;fim=fim+1;
                rectangle('position',[cimaxx-.5,cimayy-.5,1,1],'edgecolor','b')
                linhaxxx(bh)=cimaxx;linhayyy(bh)=cimayy;
                if fim==1;break;end;
            end
        end
    end;end
    %% CALCULA A POLINOMIAL DE GRAU UM
    format long
    coefregrv=polyfit(linhaxxx,linhayyy,1);
        save(savefilecoefv, 'coefregrv','-append','-ascii')
%% TRACA AS LINHAS VERTICAIS
bbb=0;kx=0;ky=0;
    for cimaxx=xcx(2*f-1):xcx(2*f)
        bbb=bbb+1;
        kx(bbb)=cimaxx;
        ky(bbb)=coefregrv(1)*cimaxx+coefregrv(2);
    end
end

```

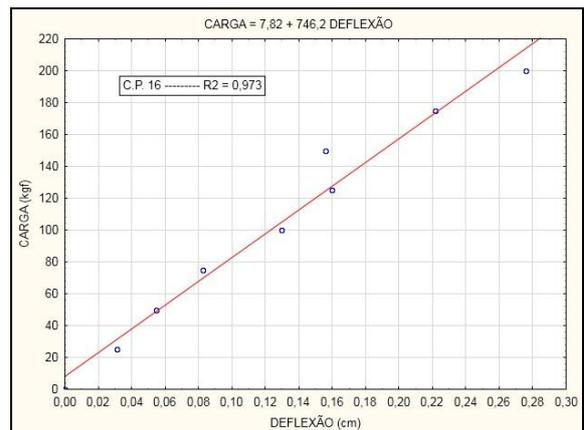
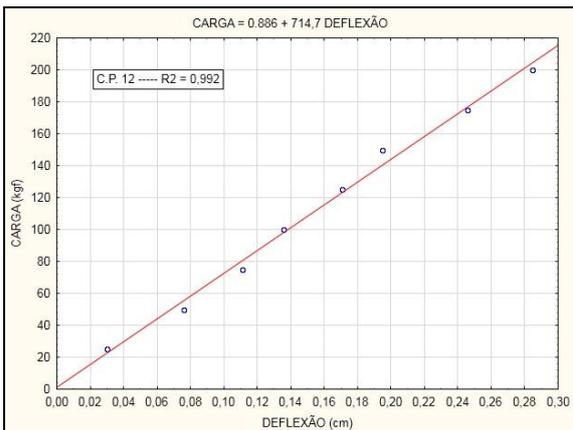
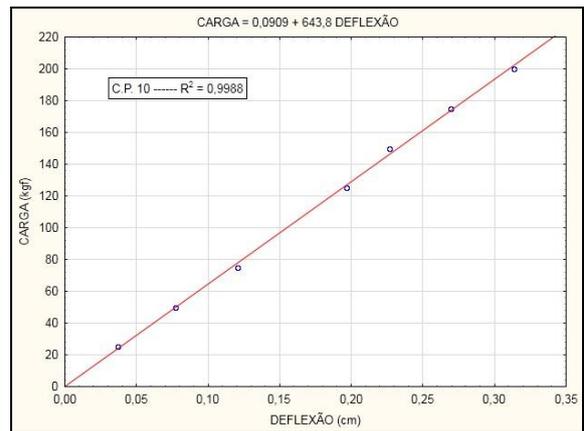
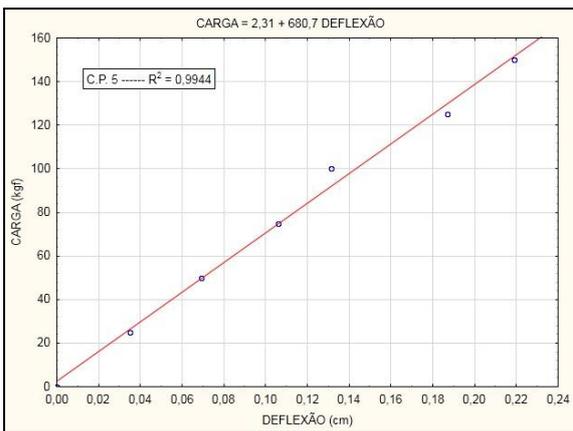
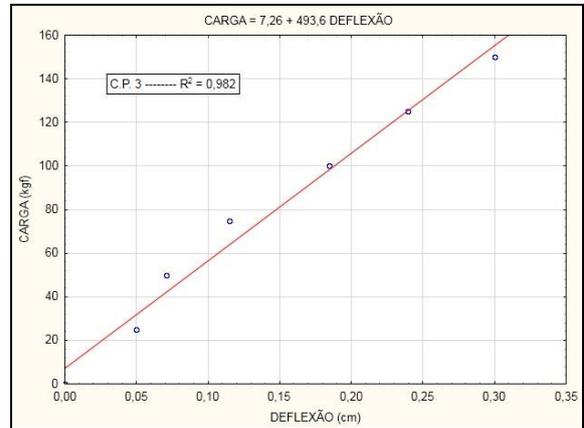
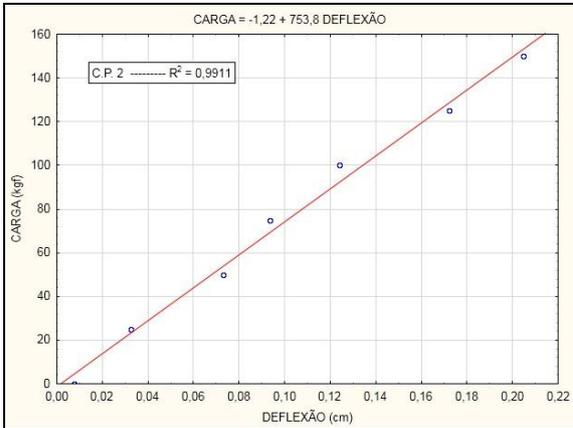
```

%%line(kx,ky,'Color','g','LineWidth',1)
    %% CALCULA O PONTO MEDIO
    diffvert=ycyi(5)-ycyi(1);
    ycentvert=ycyi(1)+(diffvert/2);
    meiox=(ycentvert-coefregrv(2))/coefregrv(1);
    meiox(f)=(ycentvert-coefregrv(2))/coefregrv(1);
%%rectangle('position',[meiox-2.5,ycentvert-2.5,5,5],'edgecolor','b')
meioyy(f)=meioy;
end
distanteh=meiox(2)-meiox(1);
sdisth=num2str(distanteh);
text(230,600,sdisth);
        save(savefiledisth, 'distanteh','-append','-ascii')
clearvars

```

## ANEXO C

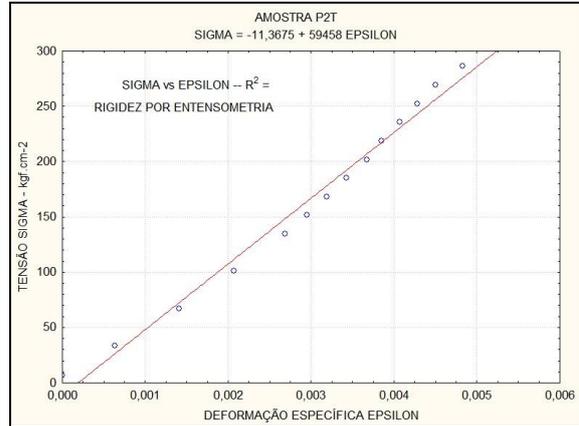
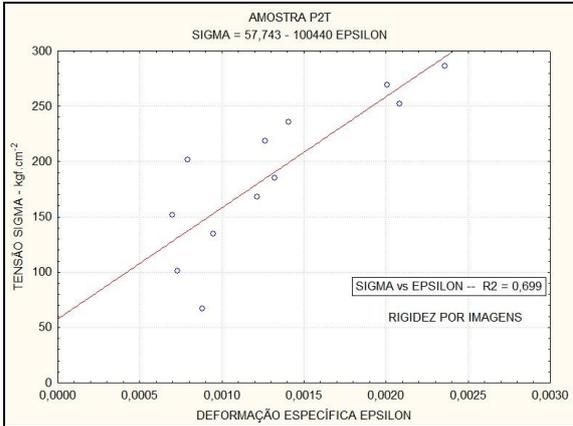
### DIAGRAMAS CARGA X DEFLEXÃO NO ENSAIO DE FLEXÃO, MEDIDOS POR INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS



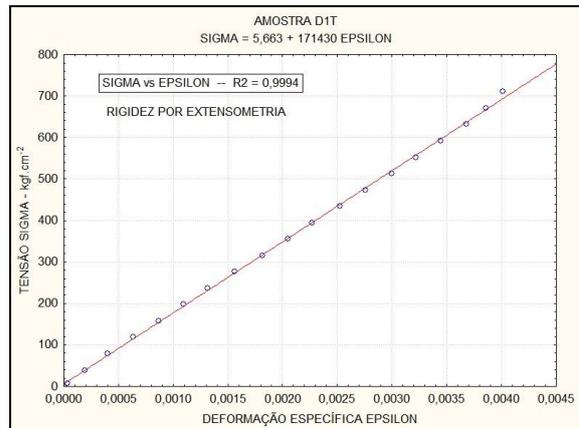
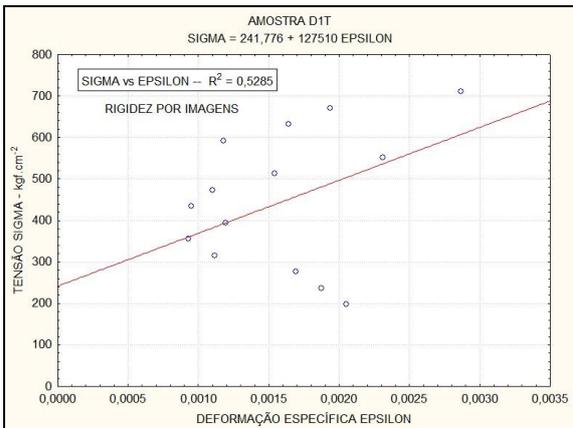
## ANEXO D

### DIAGRAMAS CARGA X DEFLEXÃO NO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

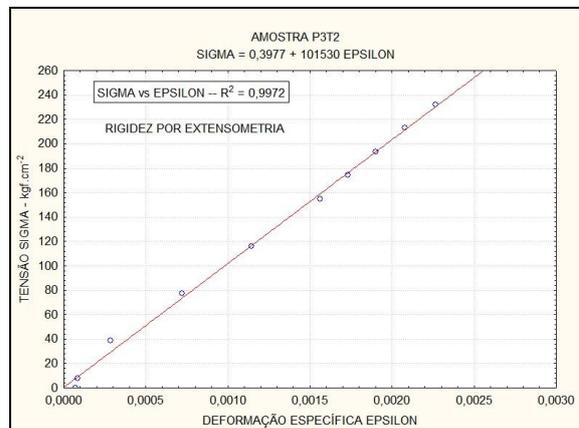
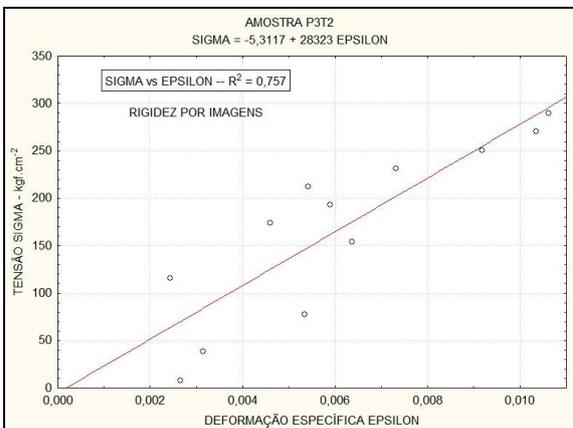
#### Exemplo amostra P2T



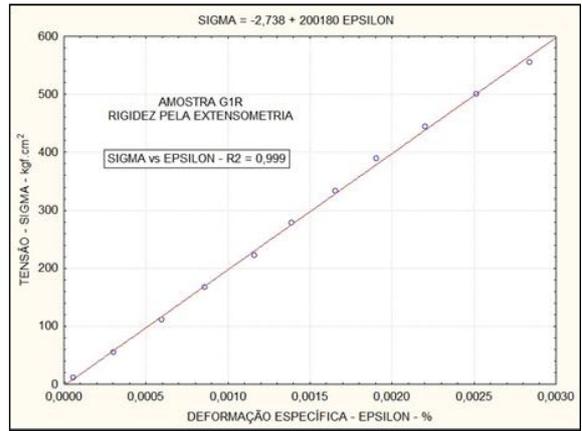
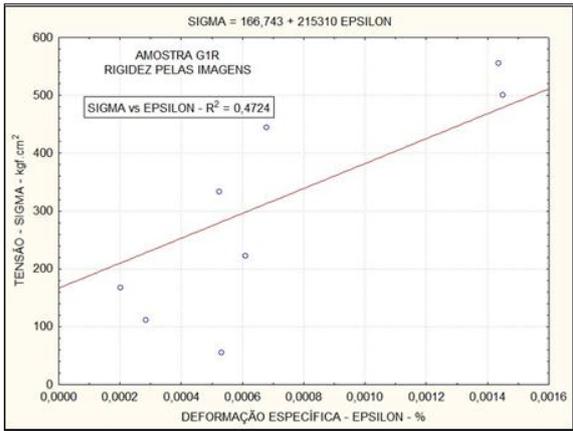
#### Exemplo amostra D1T



#### Exemplo amostra P3T2



## Exemplo amostra G1R



## Exemplo amostra T1T

