

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

FRANCO SIMÕES POLETTI

VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL COM
O COMPRIMENTO DAS PEÇAS DE MADEIRA

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2013

FRANCO SIMÕES POLETTI

VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL COM
O COMPRIMENTO DAS PEÇAS DE CEDRO AUSTRALIANO

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2013

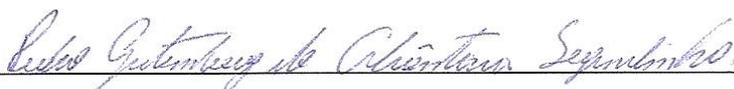
FRANCO SIMÕES POLETTI

VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL COM O
COMPRIMENTO DAS PEÇAS DE CEDRO AUSTRALIANO

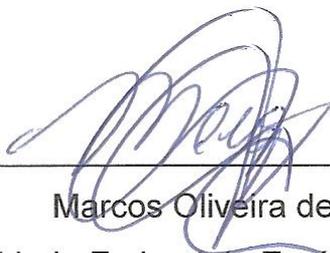
Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 10 de setembro de 2013.

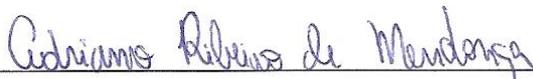
COMISSÃO EXAMINADORA



Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Orientador



Marcos Oliveira de Paula
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Conselheiro



Adriano Ribeiro de Mendonça
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo a Universidade Federal do Espírito Santo, ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e a todos os funcionários que trabalham a favor do ensino na instituição.

Agradeço de coração a toda minha família maravilhosa por todo carinho, educação e incentivo dado a mim por todos esses anos, vocês são o que tenho de mais precioso na vida.

Agradeço imensamente a minha namorada Samantha Pereira Nunes pelo amor, compreensão, paciência, ajuda e por ser quem ela é que me fez e faz feliz ontem, hoje e sempre.

Meus melhores, grandes e fiéis amigos Doahn, Arthur, Pedro, Marco, Bona, Thiago, Lucas, Allan, Jairo, Lairó, Fernando, Michel, Pedro, José, Bruno, Ivan, Luca e tantos outros que me deram força, suporte e descontração para aguentar até o final.

Sou muito grato aos professores que contribuíram diretamente com minha formação, principalmente ao meu orientador Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho e ao conselheiro Marcos Oliveira de Paula que contribuíram imensamente por essa conquista.

Quero acrescentar que todos os citados foram cruciais para minha formação como homem e me fizeram mais feliz e mais sábio. Obrigado a todos e fiquem com Deus.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo utilizar uma técnica eficiente para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal levando em conta a relação comprimento/altura L/h e verificar a influência do cisalhamento no módulo de elasticidade por meio da comparação de ensaios não destrutivos com ensaios destrutivos. Os benefícios das técnicas não destrutivas são claros, pois não danificam as peças ensaiadas possibilitando a realização de outros ensaios ou do uso estrutural da peça. A madeira ensaiada no trabalho foi o cedro australiano (*Toona ciliata*). Os ensaios não destrutivos foram realizados com a técnica de vibração longitudinal e transversal, enquanto os destrutivos por meio da flexão estática. Concluiu-se que o ensaio de vibração longitudinal é o método mais adequado para obtenção do módulo de elasticidade aparente E_a , pois os esforços cortantes devidos às tensões de cisalhamento não influenciaram com a variação da relação L/h .

Palavras chave: flexão estática. vibração longitudinal. vibração transversal. tensões cisalhantes.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O problema e sua importância	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo geral	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Madeira	5
2.1.1 Cedro australiano (<i>Toona ciliata</i>)	5
2.2 Módulo de elasticidade obtido na flexão estática	6
2.3 Módulo de elasticidade longitudinal obtido na vibração longitudinal	6
2.4 Módulo de elasticidade transversal obtido na vibração transversal	7
2.5 Influência do módulo de cisalhamento no módulo de elasticidade longitudinal	8
3 METODOLOGIA	10
3.1 Delineamento da pesquisa	10
3.2 Dimensionamento das amostras	10
3.3 Caracterização das propriedades da madeira	11
3.4 Ensaio de vibração longitudinal	12
3.5 Ensaio de vibração transversal livre	13
3.6 Ensaio de flexão estática	14
3.7 Ensaio de Umidade	15
3.8 Análise dos dados	15
i) Modelo Polinomial Quadrático com Resposta em Platô (MPQ)	16
ii) Modelo Não-Linear Exponencial 1 com Resposta em Platô (MNLE1)	16
iii) Modelo Não-Linear Exponencial 2 com Resposta em Platô (MNLE2)	17
3.9 Coeficiente de determinação (R^2)	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5 CONCLUSÕES	25
6 REFERÊNCIAS	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica da influência do módulo de elasticidade longitudinal aparente E_a em função da relação L/h	9
Figura 2 – Esquema de corpos de prova de ensaios de flexão.....	11
Figura 3 – Corpo de prova de compressão paralela às fibras madeira.....	11
Figura 4 – Corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.....	12
Figura 5 – Ensaio de vibração longitudinal.....	13
Figura 6 – Ensaio de vibração transversal.....	14
Figura 7 – Ensaio de flexão estática.....	15
Figura 8 – Curvas do módulo de elasticidade aparente E_a em função da relação L/h para a madeira de cedro australiano, referente a carga aplicada formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial nos ensaios de flexão estática (a), de vibração transversal livre (b) e de vibração longitudinal (c).....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade aparente, teor de umidade, resistência média à compressão paralela às fibras e resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira de cedro australiano.....	19
Tabela 2 – Análise de variância e teste F, verificando a falta de ajustamento para os modelos analisados na madeira de cedro australiano com a carga aplicada formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial no ensaio de flexão estática.....	19
Tabela 3 – Equações ajustadas para os diferentes modelos, coeficiente de determinação, relação máxima L/h e platô na madeira de cedro australiano com a carga aplicada formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial no ensaio de flexão estática.....	20
Tabela 4 – Análise de variância e teste F, verificando a falta de ajustamento para os modelos analisados na madeira de cedro australiano para o ensaio de vibração transversal livre formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial.....	21
Tabela 5 – Equações ajustadas para os diferentes modelos, coeficiente de determinação, relação máxima L/h e platô na madeira de cedro australiano para o ensaio de vibração transversal livre formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial.....	22
Tabela 6 – Equação de regressão linear ajustada ($\hat{y} = ax + b$)	22

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos principais materiais utilizados para a construção civil e, basicamente, pelo único motivo de ser ambientalmente sustentável. A madeira apresenta algumas vantagens quando comparada com outros materiais de construção (cimento, concreto, aço e alumínio), principalmente com a importância ambiental que se tem atualmente, por ser reciclável, renovável, biodegradável e de baixa necessidade de energia para seu processamento (MARQUES, 2008).

Com suas peculiaridades, a madeira, se torna um material interessante para o emprego no setor de construção. Dentre algumas vantagens principais podemos destacar o seu encaixe no conceito de material eco eficiente, suas boas propriedades mecânicas, fácil trabalhabilidade de forma que exige ferramentas simples, ótimo isolamento térmico e baixa energia de processamento (REMADE, 2001).

A madeira tem origem biológica, é renovável, de características próprias e tem limitações como os demais produtos e matérias primas de mesma origem. É um material de ampla utilização podendo ser empregado na construção civil, combustível para geração de energia, fabricação de móveis e utensílios, suportes, moldes, dentre outros mais. A utilização de madeira maciça na construção civil apresenta inúmeras restrições, como as dimensões das peças dependerem do tamanho e diâmetro da árvore, além de outras anatômicas. Por essas restrições a madeira maciça tem perdido certa competitividade no mercado para os produtos derivados, como os laminados colados, painéis OSB, entre outros.

Assim como acontece com todos os materiais empregados na construção civil, a madeira para uso estrutural deve ser classificada pelas suas propriedades físicas e mecânicas (SEGUNDINHO et al., 2012). A norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece o uso da madeira pelo sistema de classes de resistência, isto é, a norma prescreve possíveis classes de resistência ao engenheiro, atribuindo a cada uma delas sua resistência característica, módulo de elasticidade e densidades. No projeto de revisão da NBR 7190 que se encontra em análise, desde 2011, sugere-se a inclusão de regras de classificação visual para distribuição da madeira em lotes de uso estrutural, conforme sugerido por Carreira e Dias (2005), a partir da qual poderá ser feita a classificação mecânica. Dessa forma o processo se inicia por meio de métodos não destrutivos, onde é feita uma inspeção visual a fim de examinar algumas

características intrínsecas (inclinação das fibras, nós, empenamento, anéis de crescimento, encurvamento, racha anelar e fenda), agrupando-as em lotes menos heterogêneos (FIORELLI; DIAS; COIADO, 2009) e, em seguida, faz-se a classificação mecânica da madeira com equipamentos capazes de quantificar adequadamente o módulo de elasticidade das peças.

Quando se quer avaliar a resistência mecânica de peças estruturais de madeira deve-se ter em mente que há diversas formas diferentes de ensaiar. De acordo com Segundinho et al. (2012), algumas das técnicas não destrutivas, isto é, que não destrói o corpo de prova, são as de ultrassom, vibração transversal, vibração longitudinal, raio X e *stress wave* ou ondas de tensão. Uma vez capazes de oferecer rápidas respostas e correlações lineares elevadas, tendo custos de equipamentos baixos, tais métodos de ensaios não destrutivos estão se tornando cada vez mais relevantes.

1.1 O problema e sua importância

É notória a importância da indústria da construção civil quando se atenta para algumas de suas características principais: ela atua de forma significativa no PIB de qualquer país, sendo de 3% a 5% nos países desenvolvidos, e de 5% a 10% nos em desenvolvimento, e, ainda, absorve um número elevado de mão-de-obra, independente do nível de desenvolvimento econômico (MACHADO; MOUCO; SOARES, 2006).

O conceito de construção eco eficiente tem sido muitas vezes associado à diminuição dos consumos energéticos nos edifícios. No entanto, o conceito é mais abrangente, por incluir preocupações ao nível da redução da delapidação dos recursos naturais, da produção de resíduos e emissão de gases poluentes nocivos aos ecossistemas e à saúde humana, e ao nível da conservação da biodiversidade (Elkington; Hailes, entre 2004 e 2012). Elkington e Hailes (entre 2004 e 2012) afirmam que, um dos argumentos favoráveis à construção civil com o uso da madeira versus a alvenaria é a questão do impacto ambiental, menos emissões de CO₂, consumo de água, consumo de energia e maior possibilidade de reciclagem. Como a madeira pode ser utilizada de diversas formas na área de construção, diz-se que quanto maior uso da madeira maior a sustentabilidade da construção (MARQUES, 2008).

Para fazer construções de qualidade, é fundamental um bom conhecimento do material para o uso racional da madeira. Como material de construção, a madeira oferece muitas peculiaridades (REMADE, 2001) que influencia diretamente desde a qualidade da madeira escolhida e, por fim, da construção no geral. Faz-se, então, necessário o completo conhecimento da madeira e suas potencialidades estruturais para seu uso racional na construção civil.

Na norma brasileira, ABNT NBR 7190 (1997), não está definido a obtenção do módulo de elasticidade por meio de ensaios não destrutivos, como o método de vibração longitudinal e transversal. Atualmente a relação comprimento/altura L/h para ensaios destrutivos (flexão estática), para que não ocorra influência do cisalhamento é L/h recomendado maior do que 21. Para os ensaios não destrutivos ainda não está definido essa relação L/h . A definição normativa da razão L/h para os métodos não destrutivos facilitará a obtenção do módulo de elasticidade por meio dessas técnicas, pois a norma poderá ser consultada e lá encontrará a caracterização da madeira e a relação L/h usada para estes métodos. Outro ponto a se destacar é a praticidade e economia dos ensaios feitos pelo método não destrutivo, já que são poucos equipamentos utilizados e o corpo de prova não é destruído. Dessa forma ao desenvolver essa pesquisa espera-se que venha a ser de grande utilidade nas empresas e na comunidade científica, pois pode vir a influenciar os métodos de cálculo para os projetos de estrutura de madeira.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve por finalidade apresentar uma técnica não destrutiva, no que se refere à confiabilidade de resultados, para determinação do módulo de elasticidade longitudinal aparente e verificar a influência do cisalhamento neste por meio da comparação de ensaios não destrutivos, vibração longitudinal e transversal, com ensaios destrutivos, flexão estática.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar os valores dos módulos de elasticidade longitudinal aparente obtidos por meio das técnicas não destrutiva e destrutiva;
- Avaliar a influência do cisalhamento no módulo de elasticidade longitudinal aparente obtidos por meio das técnicas destrutivas e não destrutivas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Madeira

A madeira é um material complexo, heterogêneo, anisotrópico, higroscópico, poroso e de origem biológica. Proporciona uma ótima resistência mecânica e se comparada ao seu peso se torna o melhor dentre os materiais utilizados nas construções. Quando usada estruturalmente, a madeira ajuda a reduzir a dimensão da fundação, por ser leve, e o efeito da ação sísmica. Quando preservada em boas condições de manutenção, isto é, mantendo-a seca, arejada e preferencialmente sem contato com o solo, ela proporciona uma boa durabilidade, isolamento térmico, elétrico e acústico excelentes. Tem madeiras com cores atrativas e agradáveis, bem como sua textura e possibilita uma ampla escolha de formas, que agrada desde os arquitetos, pois liberta uma gama de soluções a se adotar, até os clientes que ficam satisfeitos com o resultado da construção (MARQUES, 2008).

2.1.1 Cedro australiano (*Toona ciliata*)

Segundo Investagro (2013) o cedro australiano é uma árvore nativa das regiões tropicais da Austrália, pertence a família das *meliaceae*, e foi trazida ao Brasil com o objetivo de recompor projetos de reflorestamento. É uma espécie de rápido crescimento que se desenvolve melhor em altitudes compreendidas entre 500 e 1500 m de altura e com índices pluviométricos acima de 1100 mm, prefere solos com ph entre 5,5 a 7,00, geralmente possui tronco reto podendo atingir 40 m de altura e até 2,00 m de diâmetro em solo fértil. O cedro australiano tem, ainda, a capacidade de brotar 4 vezes, isto reduz os custos, pois é indispensável plantar uma nova muda isso faz com que a atividade produtiva da árvore chegue aos 30 anos.

O cedro australiano é da mesma família do cedro brasileiro. É uma árvore exótica, ainda pouco conhecida, que se adaptou bem no Brasil. Sua principal vantagem em relação ao cedro brasileiro é a ausência de ataques pela broca *Hypsipyla grandella*, praga que ataca a gema apical de Meliáceas, fazendo com que o tronco da árvore fique bifurcado (SOUZA; BARROSO; CARNEIRO, 2010).

A madeira do cedro australiano é de boa qualidade, cor avermelhada e utilizada para confecção de instrumentos musicais, acabamentos internos na construção civil e móveis finos. De acordo com Investagro (2013) alguns estudiosos consideram a madeira de cedro australiano uma verdadeira poupança verde, porque árvores acima de 11 anos pode render mais de 1 m³ de madeira serrada.

2.2 Módulo de elasticidade obtido na flexão estática

De acordo com Amishev e Murphy (2008) o módulo de elasticidade à flexão é uma das propriedades mecânicas mais importantes e o indicador mais frequentemente utilizado, no caso da madeira, como indicador da competência para resistir aos carregamentos. Ensaio de flexão estática foram realizados para determinar o módulo de elasticidade e de ruptura.

Para entender a flexão é preciso imaginar uma peça fina de madeira com as fibras orientadas paralelamente ao seu comprimento. A viga é deformada em forma de arco circular, devido à carga externa. Esta deformação provoca o encurtamento das fibras no lado côncavo e um alongamento, no lado convexo. Portanto, as fibras no lado côncavo estão comprimidas e, no lado convexo, tracionadas. O ponto onde se encontra a inversão de tensão é conhecido como linha neutra (ROCHA; PAULA; SIQUEIRA, 1988).

Fazendo menção ao trabalho de Rocha, Paula e Siqueira (1988), em ensaios de peças de madeira, pode-se verificar que na tração se encontra maior resistência e menor deformação do que na compressão. No ensaio de flexão, a peça sofre ações simultâneas de tração e compressão. Logo, ao analisar o diagrama de tensão de uma viga sob diferentes valores de momento, verifica-se que sob medidas inferiores de tensão, sua distribuição é linear, aumentando a força atuante, a tensão máxima na compressão é atingida e a linha neutra se aproxima da borda tracionada. A viga somente é rompida quando a fibra mais externa, tracionada, rompe (ROCHA; PAULA; SIQUEIRA, 1988).

2.3 Módulo de elasticidade longitudinal obtido na vibração longitudinal

Os métodos dinâmicos têm como característica calcular os módulos elásticos por meio da frequência natural de vibração do corpo de prova e de seus parâmetros

geométricos. Estes métodos detêm a vantagem de valer-se de pequenas amostras e de serem rápidos e não destrutivos podendo utilizar o mesmo corpo de prova para vários outros ensaios (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Existem diversas técnicas de métodos não destrutivos para obtenção do módulo de elasticidade de uma peça de madeira, por exemplo, classificação por meio de ultrassom e onda de tensão. O “resonance method” tem a vantagem de ser um método confiável e com um custo baixo, já que para sua aplicação necessita de aparelhagens de pequeno valor, além da economia de material, já que ao final dos ensaios o mesmo se encontra intacto.

Conforme Cossolino e Pereira (2010), Pedroso (2011) e Carreira e Dias (2012) mencionam em seus trabalhos, existem, basicamente, três modos de vibração que são empregados: vibração longitudinal, vibração transversal ou flexional e vibração torcional. Os dois primeiros permitem calcular com boa coerência o módulo de Young, ou módulo de elasticidade, e o último permite a obtenção do módulo de cisalhamento e a razão de Poisson. Sendo que no modo de vibração longitudinal podem-se obter resultados mais precisos e confiáveis.

Partindo para um ponto de vista experimental, a metodologia pode ser dividida em duas etapas: a primeira consiste na excitação, detecção e obtenção da frequência de vibração, e a segunda, no emprego de equações matemáticas e dos procedimentos computacionais, para a determinação do módulo de elasticidade da madeira (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

Ondas longitudinais são aquelas cujo movimento ocorre na mesma direção da vibração. A técnica de vibração longitudinal de barras de seção transversal quadrada ou circular é tida por diversos autores entre os métodos dinâmicos como o de maior precisão na determinação do módulo de elasticidade ou módulo de Young. A técnica de vibração longitudinal é aludida na literatura internacional como “resonance method” e foi um dos primeiros métodos não destrutivos desenvolvidos para a determinação do módulo de elasticidade da madeira (CANDIAN, 2007).

2.4 Módulo de elasticidade transversal obtido na vibração transversal

A técnica de vibração transversal é referida na literatura internacional como “*resonance method*” e existe há muitos anos para medir o módulo de elasticidade

dinâmico. O primeiro homem a emprega-lo foi o cientista francês Savart, em uma barra de ferro, comprovando a possibilidade de uso de características vibracionais para estimativa do módulo de elasticidade.

Atualmente a técnica de vibração transversal é considerada um teste confiável para apresentar o módulo de elasticidade, sobretudo pela grande aderência do modelo físico do fenômeno e seu correspondente modelo matemático. Esta técnica faz uso da relação entre a frequência de oscilação e o módulo de elasticidade de uma viga apoiada. Essa relação já é bem conhecida e pode ser obtida através da mecânica fundamental (CANDIAN, 2007).

De acordo com Candian (2007), a técnica de vibração transversal permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico, este é obtido pela frequência de vibração, do comprimento, da densidade e da altura da peça estrutural utilizada. Esse módulo pode ser correlacionado ao módulo de flexão estática.

Carlil Júnior e Miná (2003) mostraram que existe correlação entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico, obtidos através de ensaios de flexão estática e vibração transversal, respectivamente, em peças de Pinus. Carreira et. al (2012) testou a técnica de vibração transversal na avaliação do módulo de ruptura na flexão de toras de *Eucalyptus* sp. e concluiu que esta técnica não foi eficiente para fornecer estimativas confiáveis do módulo de ruptura de toras de madeira para fim de dimensionamento.

2.5 Influência do módulo de cisalhamento no módulo de elasticidade longitudinal

Lahr (1983) argumenta que não há influência da relação vão livre-altura no módulo de ruptura de peças de madeira submetidas a esforços de flexão. Com isto, torna-se indiferente a adoção de corpos de prova com quaisquer valores de L/h para a determinação da resistência da madeira à flexão, podendo ser aproveitados para este objetivo, os mesmos corpos de prova utilizados para se estabelecerem os valores do módulo de elasticidade longitudinal real e o módulo de elasticidade transversal na flexão.

Segundo Carreira (2012), conforme recomendação da norma NBR 7190 (ABNT, 1997), o esforço cortante pode ser desvalido no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico pelo ensaio de vibração transversal para valores de $L/h \geq 21$, para o caso de toras.

Segundo Lahr (1983) existe dependência linear entre o módulo de elasticidade longitudinal real e o módulo de resistência à ruptura e à flexão, apresentando satisfatório coeficiente de correlação. Existe também dependência linear entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura à compressão paralela às fibras da madeira, e, igualmente satisfatória o coeficiente de correlação. Os citados coeficientes foram obtidos mediante análise de resultados válidos para corpos de prova individuais, das diversas espécies ensaiadas.

O conhecimento destas relações permitirá a previsão, sem ensaios destrutivos, dos parâmetros de ruptura à flexão e à compressão paralela às fibras, possibilitando aproveitamento mais racional da madeira, por meio da prévia classificação das peças a serem empregadas estruturalmente Lahr (1983).

Na Figura 1 tem-se a representação gráfica da influência do módulo de elasticidade longitudinal aparente E_a em função da relação L/h .

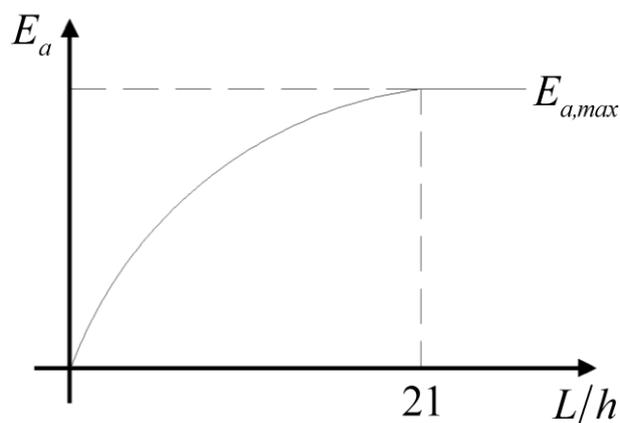


Figura 1 – Representação gráfica da influência do módulo de elasticidade longitudinal aparente E_a em função da relação L/h .

Fonte: autor (2013).

3 METODOLOGIA

3.1 Delineamento da pesquisa

Existem várias sistemáticas de classificação e pesquisa. Seguindo a sistemática de classificação NBR 7190 (ABNT, 1997), para monografias, esta pesquisa se classifica, quanto aos fins, como descritiva, pois estuda características e propriedades intrínsecas da madeira com o fim de obter relações entre as variáveis obtidas por ensaios de resistência. A pesquisa também é classificada como aplicada, que foi motivada pela falta de informação técnica, o qual é representado pela ausência de informações sobre a relação L/h em ensaios de vibração longitudinal na norma brasileira de projetos de estruturas de madeira, NBR 7190 (ABNT, 1997).

Já quanto aos meios, a pesquisa é classificada como experimental, pois através de um objeto de estudo faz-se diversos experimentos e determina-se uma relação entre variáveis.

O problema investigado pode ser classificado de duas formas distintas: qualitativa e quantitativa. A presente pesquisa foi considerada como quantitativa, porque utiliza a linguagem matemática e técnicas estatísticas para explicar os resultados ou relações de causalidade entre fenômenos.

3.2 Dimensionamento das amostras

As peças de madeira de cedro australiano com idade de 6 anos foram processadas na marcenaria da Universidade Federal do Espírito Santo para obtenção dos corpos de prova utilizados para determinar o módulo de elasticidade longitudinal de dimensões de 30 mm x 30 mm ($b \times h$) e comprimento variável (L) nas seguintes razões de L/h : 23, 21, 19, 17, 14, 11, 8 e 5, conforme apresentado no esquema da Figura 2. Para cada razão de L/h foram utilizadas 6 repetições conforme sugerido por norma, NBR 7190 (ABNT, 1997). Todas as peças de madeira foram armazenadas em local coberto e mantidas em equilíbrio higroscópico com o meio.

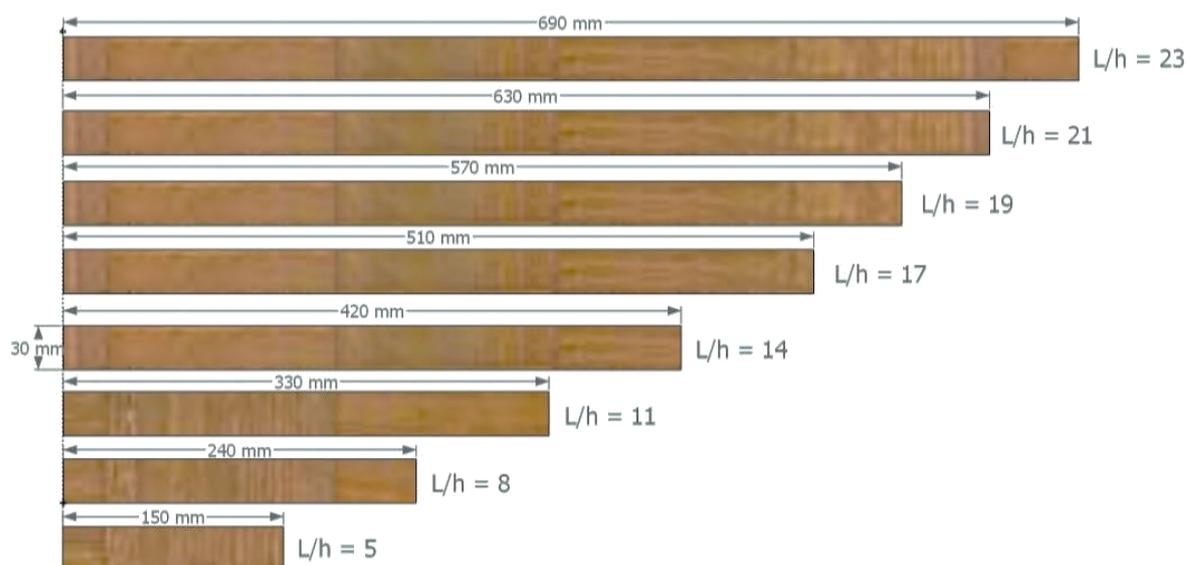


Figura 2 – Esquema de corpos de prova de ensaios de flexão.

3.3 Caracterização das propriedades da madeira

A caracterização das propriedades físicas e mecânicas do lote de madeira foi realizada de acordo com os métodos de ensaios definidos na NBR 7190 (ABNT, 1997) – Projeto de Estruturas de Madeira, logo foram determinados o teor de umidade, a densidade básica, às resistências à compressão paralela às fibras e cisalhamento paralelo às fibras, conforme Figuras 3 e 4.

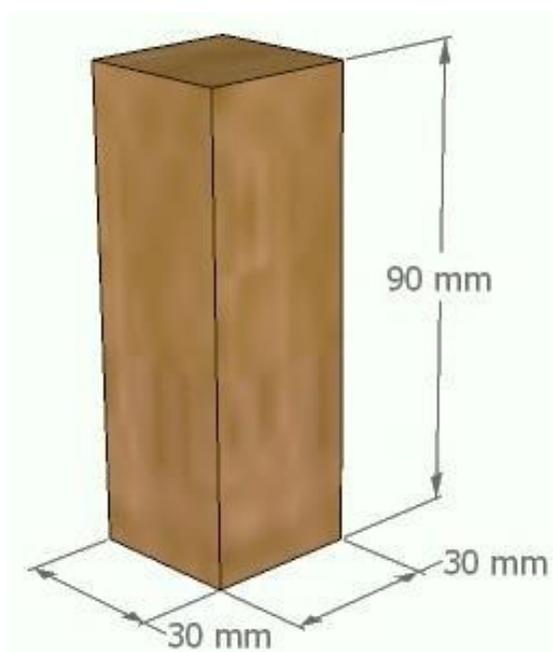


Figura 3 – Corpo de prova de compressão paralela às fibras madeira.

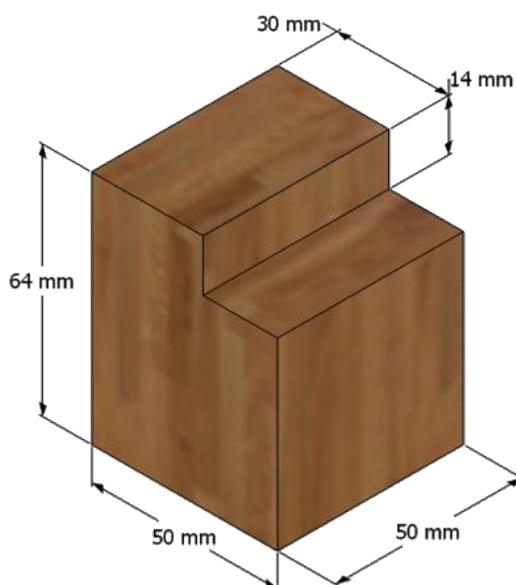


Figura 4 – Corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

3.4 Ensaio de vibração longitudinal

Para realização do experimento foi utilizado um microfone para captar a vibração, um suporte para o corpo de prova e o computador com um programa para capturar a frequência natural de vibração. No ensaio de vibração longitudinal, através de uma resposta acústica composta por uma ou mais frequências naturais de vibração que se é calculado o módulo de elasticidade longitudinal.

Foi aplicado um impacto no corpo de prova na direção longitudinal conforme instruções da norma ASTM E1876 (2007), Figura 5, no qual a direção do movimento da onda ocorre na mesma direção do modo de vibração longitudinal. O cálculo do módulo de elasticidade devido à primeira frequência de ressonância de vibração longitudinal $E_{a,l}$ é dado pela Equação 1.

$$E_{a,l} = 4 \times \left(\frac{m \cdot f_l^2}{b} \right) \times \left(\frac{l}{h} \right) \quad (1)$$

em que: $E_{a,l}$ = módulo de elasticidade (MPa); m = massa (kg); f_l = frequência de vibração longitudinal (Hz); b = largura (mm); h = altura (mm); l = comprimento (mm).

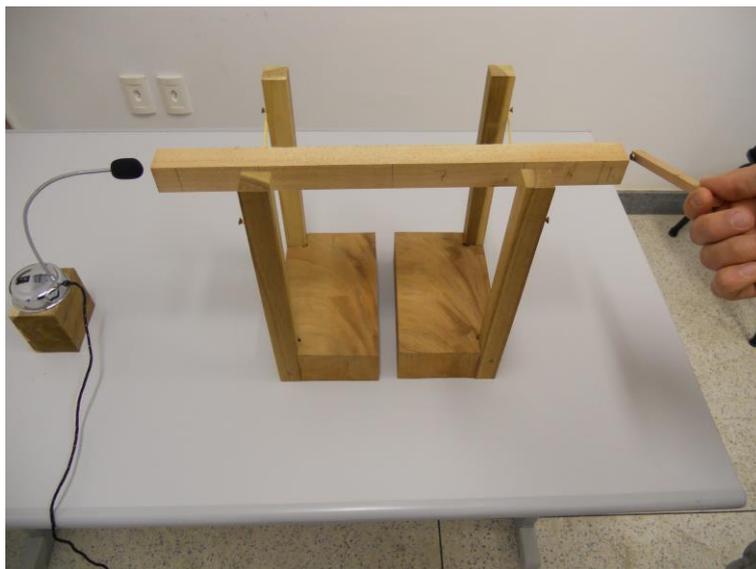


Figura 5 – Ensaio de vibração longitudinal.

3.5 Ensaio de vibração transversal livre

Os ensaios de vibração transversal foi realizado de forma semelhante ao de vibração longitudinal, com diferença do sentido do impacto e captação do som. O impacto aplicado na madeira foi no sentido transversal e captação do sinal, ambos de acordo com a norma americana ASTM E1876, Figura 6. O cálculo do módulo de elasticidade devido à primeira frequência de ressonância de vibração transversal $E_{a,vt}$ é dado pela Equação 2.

$$E_{a,vt} = \left(\frac{2 \cdot f_1}{\gamma_1 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{m \cdot l^3}{I} \quad (2)$$

em que: $E_{a,vt}$ = módulo de elasticidade dinâmica obtido pelo método de vibração transversal; f_1 = frequência do primeiro harmônico; $\gamma_1 = (n + 0,5)^2$, n é o número do modo harmônico; m = massa do corpo de prova; l = comprimento do corpo de prova; I = momento de inércia da seção transversal.

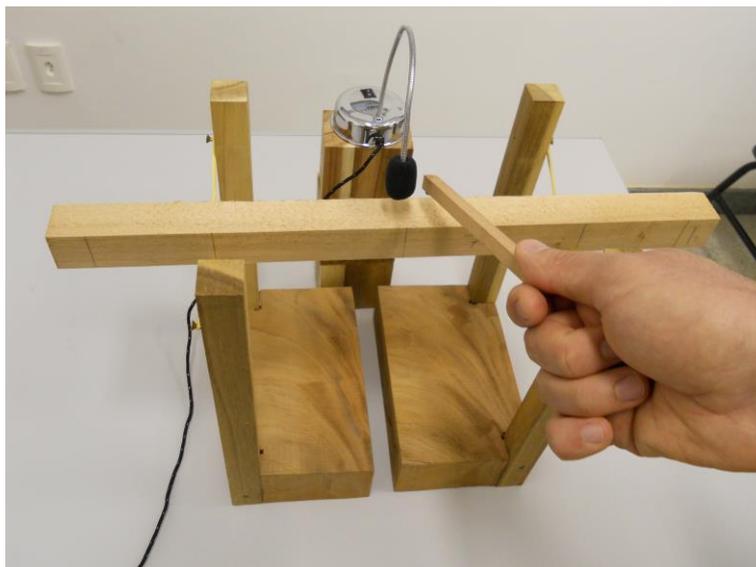


Figura 6 – Ensaio de vibração transversal.

3.6 Ensaio de flexão estática

Os ensaios de flexão estática nas peças de madeira foram realizados com o objetivo de se obter o módulo de elasticidade à flexão. O ensaio é feito a três pontos nas peças de madeira, conforme a norma ASTM D 198 (2009), Figura 7. O módulo de elasticidade à flexão E_a é calculado por meio da Equação 3.

$$E_a = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (3)$$

em que: E_a = módulo de elasticidade à flexão (MPa); P = incremento de força (N); L = distância entre apoios (mm); δ = deslocamento vertical devido à força aplicada (mm); I = momento de inércia da seção transversal (mm⁴).



Figura 7 – Ensaio de flexão estática.

3.7 Ensaio de Umidade

Os ensaios de umidade foram realizados de acordo com normais nacionais da NBR 7190 da ABNT. Os corpos de prova tinham seção transversal retangular de 2,0 x 3,0 cm e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm.

Primeiramente determinou-se a massa inicial (m_i) do corpo-de-prova com exatidão de 0,01 g. Após a determinação da m_i , colocou-se o corpo de prova na estufa para secagem. Durante a secagem a massa do corpo-de-prova foi medida a cada 6 h, até que ocorresse uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Esta massa foi considerada como a massa seca (m_s). Conhecida a massa seca (m_s) determinou-se a umidade à base seca pela expressão definida abaixo:

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \cdot 100$$

3.8 Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada por meio dos modelos estatísticos i, ii e iii. O ajuste dos modelos de platô de resposta foi realizado considerando as médias estimadas experimentalmente para as relações L/h estudadas, para posterior ajuste dos modelos por meio do procedimento NLIN (PROC NLIN) do sistema SAS Institute (1995).

i) Modelo Polinomial Quadrático com Resposta em Platô (MPQ)

Considerou-se os seguintes modelos:

$$Y = a + bx + cx^2 + e \quad \text{se} \quad x < x_0 \quad (\text{quadrático}) \quad (4)$$

$$Y = p + e \quad \text{se} \quad x \geq x_0 \quad (\text{platô}) \quad (5)$$

em que: Y é o módulo de elasticidade aparente E_a referente a relação L/h . Dessa forma, para valores de x menores que x_0 , o modelo que descreve a resposta Y é uma função quadrática, e para valores de x maiores ou iguais a x_0 , o modelo é uma constante ou platô. Para estimação dos parâmetros, o modelo deve apresentar propriedades matemáticas adequadas, isto é, deve ser uma função contínua e diferenciável em x_0 . Derivando a equação e igualando a zero sendo $x = x_0$. Esta condição implica que: $x_0 = -b/2c$ e $p = a - b^2/4c$, em que: x_0 é o módulo de elasticidade aparente máximo para uma máxima relação L/h e o ponto de intercessão das duas linhas p é o platô, sendo a , b e c os parâmetros do modelo a serem estimados.

ii) Modelo Não-Linear Exponencial 1 com Resposta em Platô (MNLE1)

Considerou-se os seguintes modelos:

$$Y = a \cdot \exp[-c(x-b)^2] + e \quad \text{se} \quad x < x_0 \quad (\text{exponencial}) \quad (6)$$

$$Y = p + e \quad \text{se} \quad x \geq x_0 \quad (\text{platô}) \quad (7)$$

Da mesma forma que no modelo (i), ao se derivar Y em relação a x , tem-se:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial \{a \cdot \exp[-c(x-b)^2]\}}{\partial x} = a \cdot \exp[-c(x-b)^2] \cdot [-2c(x-b)] \quad (8)$$

Igualando-se o resultado da derivação a zero e resolvendo-se para $x = x_0$, obtém-se $x_0 = b$. Substituindo-se x pelo valor de x_0 no modelo inicial, encontra-se $p = f(x_0) = a \cdot \exp\left[c(b-b)^2\right]$, que resulta em $p = a$, sendo x_0 o estimador do módulo de elasticidade aparente máxima E_a , para uma máxima relação L/h , p é o estimador do ponto do platô e a , b e c são parâmetros do modelo a serem estimados.

iii) Modelo Não-Linear Exponencial 2 com Resposta em Platô (MNLE2)

Considerou-se os seguintes modelos:

$$Y = a \cdot \exp(bx - cx^2) + e \quad \text{se } x < x_0 \text{ (exponencial)} \quad (9)$$

$$Y = p + e \quad \text{se } x \geq x_0 \text{ (platô)} \quad (10)$$

em que Y é o módulo de elasticidade aparente para uma relação L/h e o ponto de intercessão das duas linhas p é o platô, sendo a , b e c os parâmetros do modelo a serem estimados.

Como apresentado nos modelos anteriores, a primeira derivada parcial deve ser idêntica no ponto $x = x_0$ para que a condição de continuidade das curvas antes e após o platô seja atendida. Assim, ao se derivar y em relação à x , tem-se:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial \left[a \cdot \exp(bx - cx^2) \right]}{\partial x} = a \cdot (b - 2cx) \cdot \exp(bx - cx^2) \quad (11)$$

Igualando-se o resultado da derivação a zero e resolvendo-se para $x = x_0$, obtém-se $x_0 = b/2c$. Substituindo-se x pelo valor de x_0 no modelo inicial, encontra-se $p = f(x_0) = a \cdot \exp\left[\frac{b^2}{2c} - c\left(\frac{b^2}{4c^2}\right)\right]$, que resulta em $p = a \cdot \exp\left(\frac{b^2}{4c}\right)$ em que x_0 é o estimador da máxima relação L/h , para uma das duas linhas; p é o estimador do ponto do platô e a , b e c são parâmetros do modelo a serem estimados.

3.9 Coeficiente de determinação (R^2)

O R^2 foi calculado pela seguinte expressão $R^2 = (r_{y\hat{y}})^2$, sendo o quadrado da correlação entre as médias do tratamento observado (y) e as previstas (\hat{y}) pelo modelo de platô.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, são apresentados os valores de densidade aparente (ρ), umidade (U), resistências média à compressão paralela às fibras ($f_{c0,m}$) e resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras ($f_{v0,m}$) da madeira de cedro australiano (*Toona ciliata*).

Tabela 2 – Densidade aparente, teor de umidade, resistência média à compressão paralela às fibras e resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira de cedro australiano.

	ρ (kg.m ⁻³)	$f_{c0,m}$ (MPa)	$f_{v0,m}$ (MPa)
Média	367,1	24,66	7,06
U%	13,32	13,32	13,32

A madeira aproxima-se da classe de resistência C20 das folhosas, que define valores mínimos de resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) de 20 MPa, módulo de elasticidade médio paralelo às fibras ($E_{c0,m}$) de 9500 MPa e densidade aparente de 650 kg.m⁻³, na condição padrão de referência de 12% de umidade.

Na Tabela 2 está apresentado o teste F para falta de ajuste para os três modelos estatísticos aplicados na madeira de cedro australiano com a carga aplicada formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial no ensaio de flexão estática.

Tabela 2 – Análise de variância e teste F, verificando a falta de ajustamento para os modelos analisados na madeira de cedro australiano com a carga aplicada formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial no ensaio de flexão estática.

Modelos	Fonte de Variação	G. L.	Q. M.	F	Valor-P
MPQ	Mod. Reg. não Cor.	3	442949068,4		
	Falta de Ajust.	5	163063,2	0,92 ^{ns}	0,4781
	Resíduo (Erro Puro)	40	177490,9		
MNLE1	Mod. Reg. não Cor.	3	442080000		
	Falta de Ajust.	5	689706	3,89*	0,0057
	Resíduo (Erro Puro)	40	177490,9		

	Mod. Reg. não Cor.	3	442080000		
MNLE2	Falta de Ajust	5	689706	3,89*	0,0057
	Resíduo (Erro Puro)	40	177490,9		

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($P < 0,05$) e ^{ns}Não significativo ($P > 0,05$).

Pela Tabela 2 podemos observar que a falta de ajuste do MPQ não foi significativa ao nível de 5% de probabilidade. Já para os modelos MNLE1 e MNLE2 a falta de ajuste ao nível de 5% de probabilidade foi significativa.

Na Tabela 3 está apresentado as equações ajustadas para os diferentes modelos de regressão na madeira de cedro australiano para o ensaio de flexão estática, com os coeficientes de determinação (R^2), relação máxima (x_0) e platô (p).

Tabela 3 – Equações ajustadas para os diferentes modelos, coeficiente de determinação, relação máxima L/h e platô na madeira de cedro australiano com a carga aplicada formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial no ensaio de flexão estática.

Modelos	Equações ajustadas	R^2 (%)	x_0 (L/h)	p (MPa)
MPQ	$\hat{y} = -3097,2 + 1003,1x - 26,8987x^2$	99,44	18,65	6253,88
MNLE1	$\hat{y} = 6209,0 \exp\left[-0,0107(x - 16,3061)^2\right]$	97,66	16,31	6209,01
MNLE2	$\hat{y} = 361,3 \exp(0,3488x - 0,0107x^2)$	97,68	16,31	6209,01

Analisando a Tabela 3 podemos notar que os modelos MNLE1 e MNLE2 obtiveram os mesmos valores de R^2 , x_0 (L/h) e de p (MPa) para o ensaio de flexão estática. Para o coeficiente de determinação podemos observar que todos os modelos se mostraram adequados, sendo que o MPQ foi o que apresentou maiores valores de R^2 , ou seja, 99,44% das variações no ensaio de flexão estática podem ser explicadas pelo modelo MPQ.

Para a relação máxima (x_0) e platô (p) o modelo MPQ se mostrou mais apropriado, pois fornece a relação (L/h) máxima (18,65) e o ponto inicial do platô de resposta (6253,88 MPa).

Na Tabela 4 está apresentado o teste F para falta de ajuste para os três modelos aplicados na madeira de cedro australiano para o ensaio de vibração transversal livre formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial.

Tabela 4 – Análise de variância e teste F, verificando a falta de ajustamento para os modelos analisados na madeira de cedro australiano para o ensaio de vibração transversal livre formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial.

Modelos	Fonte de Variação	G. L.	Q. M.	F	Valor-P
MPQ	Mod. Reg. não Cor.	3	110072325,4		
	Falta de Ajust.	5	99172,68	0,32 ^{ns}	0,8980
	Resíduo (Erro Puro)	40	308216,90		
MNLE1	Mod. Reg. não Cor.	3	110076666,7		
	Falta de Ajust.	5	81796,44	0,27 ^{ns}	0,9268
	Resíduo (Erro Puro)	40	308216,90		
MNLE2	Mod. Reg. não Cor.	3	110076666,7		
	Falta de Ajust.	5	81796,44	0,27 ^{ns}	0,9268
	Resíduo (Erro Puro)	40	308216,90		

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($P < 0,05$) e ^{ns}Não significativo ($P > 0,05$).

De acordo com a Tabela 4 nenhum dos modelos descritos se mostraram significativos ao nível de 5% de significância para o ensaio de vibração transversal.

Na Tabela 5 está apresentado as equações ajustadas para os diferentes modelos de regressão na madeira de cedro australiano para o ensaio de vibração transversal livre formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial, com os coeficientes de determinação (R^2), relação máxima (x_0) e platô (p).

Tabela 5 – Equações ajustadas para os diferentes modelos, coeficiente de determinação, relação máxima L/h e platô na madeira de cedro australiano para o ensaio de vibração transversal livre formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial.

Modelos	Equações ajustadas	R^2 (%)	x_0 (L/h)	p (MPa)
MPQ	$\hat{y} = 3389,2 + 369,1x - 9,7790x^2$	97,56	18,90	6883,01
MNLE1	$\hat{y} = 6881,8 \exp[-0,00183(x - 18,1990)^2]$	98,05	18,20	6881,81
MNLE2	$\hat{y} = 3758,0 \exp(0,06656x - 0,00183x^2)$	98,06	18,20	6881,81

Pela Tabela 5 é possível notar que os modelos MNLE1 e MNLE2 apresentaram os mesmos valores de R^2 (%), x_0 (L/h) e de p (MPa) para o ensaio de vibração transversal.

Todos os modelos exibiram um bom coeficiente de determinação apresentando valores de (R^2) muito próximos. No entanto, o modelo MPQ obteve maiores valores para a relação máxima (x_0) e platô (p) em comparação com os demais modelos.

Na Tabela 6 é apresentada a equação de regressão linear ajustada entre cada o módulo de elasticidade aparente em função da relação L/h para o ensaio de vibração longitudinal, juntamente com o respectivo coeficiente de determinação (R^2).

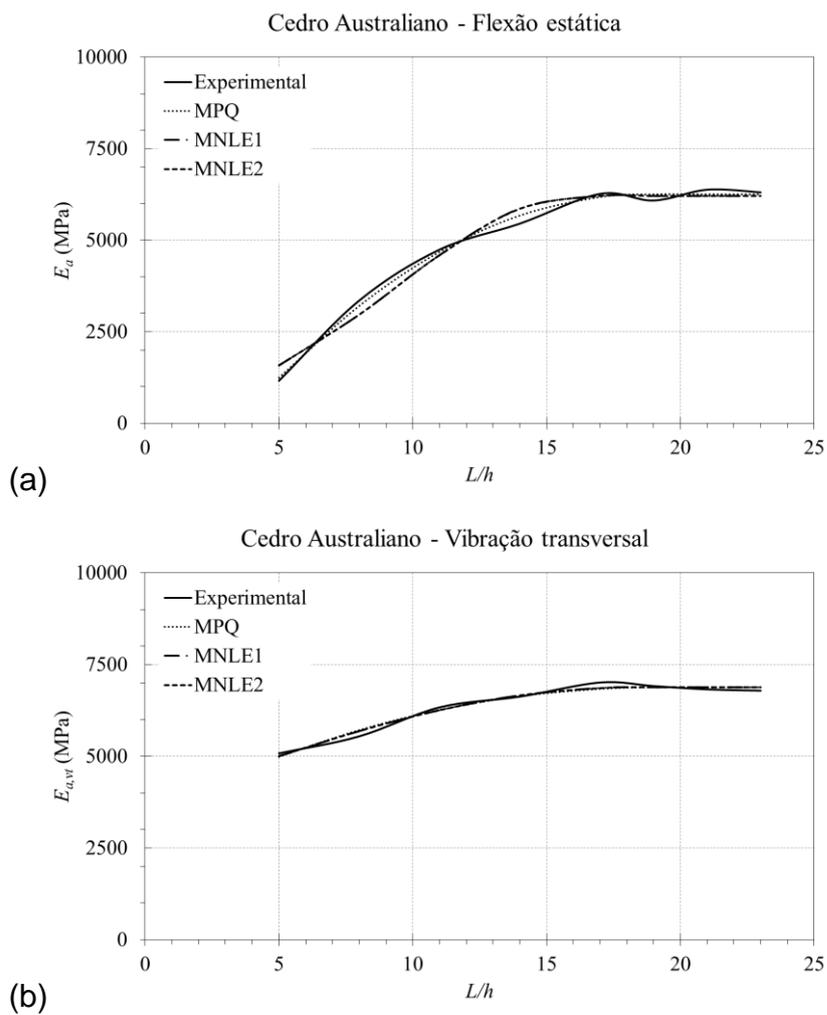
Tabela 6 – Modelo de regressão linear ajustada ($\hat{y} = ax + b$).

\hat{y} (MPa)	x	a (MPa)	b (MPa)	R^2 (%)
E_a	L/h	26,72 ^{ns}	6712,97*	7,89 ^{ns}

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($P < 0,05$) e ^{ns} não significativo ($P > 0,05$).

Pela Tabela 6 pode-se notar que o modelo de regressão linear explica somente 7,89% da variabilidade do processo, ou seja, ele não se ajusta bem aos dados experimentais.

Na Figura 8 são apresentadas e comparadas graficamente as curvas experimentais e teóricas dos três modelos de regressão para o módulo de elasticidade aparente E_a em função da relação L/h para a madeira de cedro australiano, com a carga aplicada formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial nos ensaios de flexão estática, de vibração transversal livre e de vibração longitudinal.



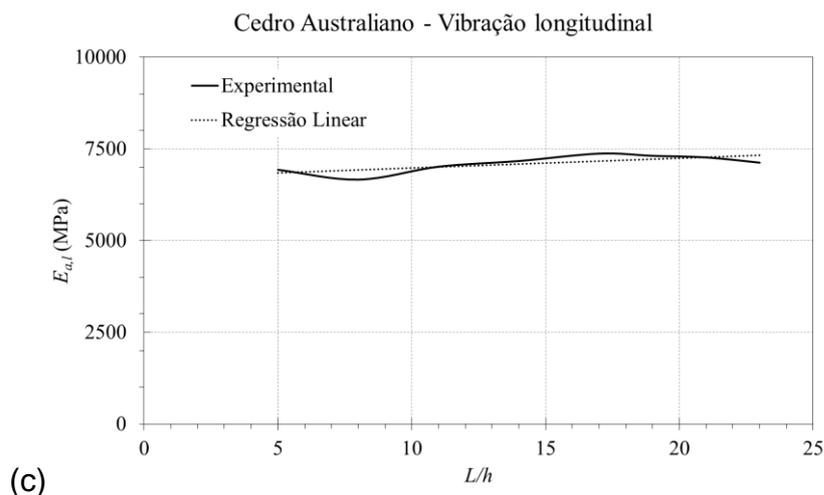


Figura 8 – Curvas do módulo de elasticidade aparente E_a em função da relação L/h para a madeira de cedro australiano, referente a carga aplicada formando ângulos quaisquer com as direções tangencial e radial nos ensaios de flexão estática (a), de vibração transversal livre (b) e de vibração longitudinal (c).

A figura 8 (a) mostra a curva do módulo de elasticidade aparente do ensaio de flexão aparente que demonstra a comparação dos modelos estatísticos em um único gráfico, facilitando a visualização do ponto onde a linha deixa de ser curva e tende a ser reta. Isto significa que a partir do ponto em que tende a ser uma reta a influência do cisalhamento é mínima, de modo que consideramos ser insignificante. Além disso, o gráfico muito curvo mostra a baixa eficácia do teste de flexão estática quando se deseja obter a elasticidade da madeira em peças com razão L/h menor que a recomendável.

Seguindo a mesma linha de raciocínio temos a figura 8 (b) que mostra a curva do módulo de elasticidade aparente do ensaio de vibração transversal, sendo possível visualizar a comparação dos modelos estatísticos no gráfico. Após o ponto que a linha tende ser uma reta é o quando o cisalhamento não influencia, ou é insignificante, no módulo de elasticidade da peça.

Da mesma forma que as figuras 8 (a) e (b) a (c) é sobre vibração longitudinal. Observando analiticamente a figura, notamos que ela tem uma pequena curva, porém está muito pouco acentuada, praticamente uma linha retilínea. Isso é devido ao grau de precisão do teste não destrutivo de vibração longitudinal. O teste se mostra fiel aos resultados verídicos de elasticidade aparente, sendo muito pouco alterado pelas forças cisalhantes.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir desse trabalho proporcionaram condições para o aperfeiçoamento dos projetos de estruturas de madeira, cujos elementos estejam submetidos à solicitação de flexão. A relação ($L/h \geq 21$) atualmente encontrada na norma brasileira de projetos de estruturas de madeira. NBR 7190 (ABNT, 1997) atende com segurança e como sugestão, tal valor pode ser reduzido para ($L/h \geq 19$) sem comprometer a segurança, quando se tratar de módulo de elasticidade aparente obtido por de ensaio de flexão estática e vibração transversa livre.

Todos os modelos avaliados mostraram-se adequados ao estudar a relação (L/h) e E_a , sendo impossível indicar aquele de maior qualidade. O modelo polinomial quadrático com platô é recomendado por ser mais adequado no ensaio de flexão estática e vibração transversa livre, uma vez que fornece a relação (L/h) máxima e o ponto inicial do platô de resposta que fisicamente significa o módulo de elasticidade longitudinal aparente E_a .

A partir dos dados concluiu-se que o ensaio de vibração longitudinal é o método mais adequado para obtenção do módulo de elasticidade aparente E_a , pois os esforços cortantes devidos às tensões de cisalhamento não influenciaram com a variação da relação (L/h).

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 143 – **Standard test methods for small clear specimens of timber**. Philadelphia, PA, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198**: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. Philadelphia: ASTM, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM C 215 – Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens**. . West Conshohocken, Pennsylvania, USA. 2008.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIAL. **ASTM E 1876 – Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. West Conshohocken, Pennsylvania, USA. 2009.

AMISHEV, D.; MURPHY, G. E. In-forest assessment of veneer grade Douglas-fir logs based on acoustic measurement of wood stiffness. **Forest Products Journal**, Inist-cnrs, Cote Inist, v. 58, n. 11, p. 42-47. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: 1997 – Projeto de Estruturas de Madeira: 1997**. Rio de Janeiro, 1997.

CANDIAN, M. **Estudo da classificação não destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas**. 2007. 51 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)–Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

CARLIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A. J. S. **Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira**. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, v. 7, n. 2, Campina Grande, May/Aug, 2003.

CARREIRA, M. R. **Avaliação da Rigidez à Flexão de Toras de Madeira por meio de Vibração Transversal**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A. Classificação visual de coníferas: análise da aplicação do método norte-americano às espécies de Pinus sp plantadas no Brasil. **Scientia Forestalis**, n.67, p.78-87, 2005.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Informativo Técnico-Científico/ATCP Engenharia Física**. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. 2010. Disponível em: <<http://www.investagro.com.br>>. Acesso em: 14 mar. 2013.

ELKINGTON, J.;HAILES, J. **NOVAS TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS COM VISTA À SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO**. Entre 2004 e 2012. 79 p. Mestrado em Engenharia Civil–Departamento de Engenharia Civil, ESCOLA DE ENGENHARIA.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A.; COIADO, B. Propriedades mecânicas de peças com dimensões estruturais de Pinus sp: correlação entre resistência à tração e classificação visual. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v.33, n.4, p.741-750, 2009.

Grupo Investagro. **CEDRO AUSTRALIANO**. 2013. Disponível em: <<http://www.investagro.com.br/cedro-australiano>>. Acesso em: 16 mar. 2013.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) – **Madeira uso Sustentável na Construção Civil**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2009.

LAHR, F. A. R. **Sobre a Determinação de Propriedades de Elasticidade da Madeira**. 1983. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas)–Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 1983.

MACHADO, F. M.; MOUCO, J. C.; SOARES, C. A. P. **Gestão sustentável: o gerenciamento dos resíduos sólidos da indústria da construção civil.** XIII SIMPEP – Bauru, SP, Brasil, novembro de 2006. Disponível em: http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/1030.pdf Acesso em: 15 mar. 2013.

Madeira de Eucalipto na construção civil. **REVISTA DA MADEIRA.** Ed. N° 59. Set. 2001. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=7&subject=Constru%E7%E3o%20Civil&title=Madeira%20de%20Eucalipto%20na%20Constru%E7%E3o%20Civil#. Acesso em: 16 mar. 2013.

MARQUES, L. E. M. M. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção.** 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil)–Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

PEDROSO, C. B. **Estimativa de propriedades de rigidez da Madeira a partir de avaliação acústica na Árvore e em toras recém abatidas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)– Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP: [s.n.], 2011.

ROCHA, J. de S.; PAULA, E. V. C. M. de; SIQUEIRA, M. L. Flexão extática em amostras pequenas livre de defeitos. **ACTA AMAZÔNICA.** Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA, Manaus, AM. p. 147 – 162. 1988.

SEGUNDINHO, P. G. A. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore,** Viçosa, MG, v.36, n.6, p.1155-1161, 2012.

SOUZA, J. C. A. V; BARROSO, D. G.; CARNEIRO, J. G. A. **Manual Técnico – Cedro Australiano.** Programa Rio Rural. Niterói, RJ, 2010.

ANEXOS

Para o ensaio de vibração longitudinal, transversal e flexão estática, foi preenchida uma planilha.

A seguir estão os resultados do ensaio de vibração longitudinal, transversal e flexão estática, Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente.

Tabela 7 – Resultados experimentais do ensaio de vibração longitudinal.

<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_1 (GPa)	E_1 (MPa)	Erro (%)
5	1	30,36	30,60	200	0,0525	11657,00	6,15	6147,63	456,19
5	2	30,21	30,39	200	0,0661	11282,33	7,33	7328,52	563,38
5	3	30,21	30,52	200	0,0656	11307,33	7,28	7282,06	503,32
5	4	30,63	30,63	201	0,0780	10665,33	7,58	7580,82	343,05
5	5	30,51	30,46	200	0,0611	11345,00	6,77	6766,36	625,37
5	6	29,93	30,62	200	0,0638	10785,00	6,48	6481,06	615,24
<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_1 (GPa)	E_1 (MPa)	Erro (%)
8	1	30,52	30,31	290	0,1079	7259,00	7,13	7131,39	78,33
8	2	30,27	30,55	289	0,0982	6885,33	5,82	5821,77	116,54
8	3	30,42	30,55	290	0,0922	7825,33	7,05	7050,38	109,79
8	4	30,56	30,63	290	0,0928	7519,67	6,50	6504,24	88,55
8	5	30,47	30,61	290	0,0995	7556,00	7,06	7064,30	127,08
8	6	30,18	30,48	290	0,1030	7022,67	6,41	6406,92	82,66
<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_1 (GPa)	E_1 (MPa)	Erro (%)
11	1	30,50	30,46	381	0,1489	5359,67	7,02	7019,14	63,93
11	2	30,63	30,42	381	0,1136	5875,67	6,41	6411,80	46,41
11	3	30,30	30,45	381	0,1194	6137,33	7,43	7430,05	55,57
11	4	30,06	30,61	381	0,1463	5480,67	7,28	7277,23	43,27
11	5	30,25	30,45	381	0,1417	5572,67	7,28	7280,45	41,36
11	6	30,15	30,31	381	0,1560	5064,33	6,67	6672,45	39,26
<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_1 (GPa)	E_1 (MPa)	Erro (%)
14	1	30,42	30,48	471	0,1765	4547,00	7,41	7413,95	27,98
14	2	30,50	30,54	470	0,1392	4956,33	6,90	6903,22	41,54
14	3	30,54	30,47	470	0,1671	4735,00	7,57	7569,81	27,31
14	4	30,66	30,50	470	0,1711	4509,67	6,99	6994,69	34,68
14	5	30,47	30,49	470	0,1337	4924,00	6,56	6558,99	25,86
14	6	30,57	30,70	471	0,1614	4836,67	7,58	7582,96	33,03
<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_1 (GPa)	E_1 (MPa)	Erro (%)
17	1	30,50	30,43	562	0,1838	3980,00	7,05	7051,52	12,31
17	2	30,49	30,37	561	0,1959	4084,33	7,92	7920,71	25,94
17	3	30,42	30,50	561	0,1829	4066,67	7,32	7316,88	19,70
17	4	30,48	30,52	561	0,1900	3851,00	6,80	6798,58	16,10
17	5	30,68	30,49	562	0,1822	4039,33	7,14	7143,37	16,82
17	6	30,49	30,66	561	0,2021	4060,33	8,00	7999,73	15,13

L/h	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_l (GPa)	E_l (MPa)	Erro (%)
19	1	30,72	30,60	620	0,2206	3035,67	5,36	5363,72	7,44
19	2	30,53	30,41	620	0,2204	3519,67	7,29	7292,95	16,37
19	3	30,59	30,62	620	0,2235	3739,33	8,28	8275,92	27,81
19	4	30,47	30,49	620	0,2289	3573,00	7,80	7801,30	21,94
19	5	30,65	30,57	620	0,2243	3552,67	7,50	7495,70	21,14
19	6	30,55	30,63	620	0,2092	3712,33	7,64	7643,48	23,55
L/h	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_l (GPa)	E_l (MPa)	Erro (%)
21	1	30,53	30,68	680	0,2169	3390,67	7,24	7243,82	18,14
21	2	30,64	30,60	680	0,2051	3343,00	6,65	6649,30	7,21
21	3	30,60	30,74	680	0,2379	3462,33	8,25	8249,35	12,24
21	4	30,61	30,50	680	0,2360	3196,33	7,02	7024,60	14,27
21	5	30,61	30,70	680	0,2421	3307,00	7,67	7666,69	15,19
21	6	30,60	30,70	680	0,2023	3400,33	6,77	6771,92	16,82
L/h	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_l (GPa)	E_l (MPa)	Erro (%)
23	1	30,50	30,66	740	0,2703	2812,00	6,77	6765,20	11,15
23	2	30,43	30,47	740	0,2478	2962,67	6,95	6945,29	12,98
23	3	30,43	30,47	740	0,2779	2864,33	7,28	7278,83	11,10
23	4	30,61	30,54	740	0,2706	2837,33	6,90	6897,50	10,01
23	5	30,50	30,52	740	0,2310	3116,67	7,14	7135,96	19,79
23	6	30,53	30,53	740	0,2470	3138,67	7,73	7727,59	13,11

Tabela 8 – Resultados experimentais do ensaio de vibração transversal.

L/h	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)	E_{vt} (GPa)	Erro (%)
5	1	30,36	30,60	72443,66	0,05252	200,0	3325,00	5057,19	5,06	357,54
5	2	30,21	30,39	70623,17	0,06606	200,0	2898,67	4958,95	4,96	348,89
5	3	30,21	30,52	71521,68	0,06562	200,0	3059,67	5419,37	5,42	348,99
5	4	30,63	30,63	73315,20	0,07795	200,5	2899,33	5681,64	5,68	232,05
5	5	30,51	30,46	71806,80	0,06105	200,0	2942,67	4645,20	4,65	397,98
5	6	29,93	30,62	71569,55	0,06382	200,0	2897,33	4723,10	4,72	421,24
L/h	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)	E_{vt} (GPa)	Erro (%)
8	1	30,52	30,31	70785,80	0,10791	290,0	1532,00	6882,38	6,88	72,10
8	2	30,27	30,55	71887,20	0,09822	289,0	1350,67	4745,15	4,75	76,49
8	3	30,42	30,55	72278,91	0,09224	290,0	1507,00	5574,94	5,57	65,88
8	4	30,56	30,63	73183,49	0,09282	290,0	1407,00	4829,73	4,83	40,00
8	5	30,47	30,61	72789,44	0,09947	290,0	1504,00	5946,00	5,95	91,14
8	6	30,18	30,48	71216,87	0,10302	290,0	1379,00	5291,43	5,29	50,85
L/h	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)	E_{vt} (GPa)	Erro (%)
11	1	30,50	30,46	71818,63	0,14893	381,0	822,27	6115,86	6,12	42,84
11	2	30,63	30,42	71852,75	0,11355	381,0	904,30	5637,10	5,64	28,72
11	3	30,30	30,45	71289,12	0,11942	381,0	918,23	6160,94	6,16	29,00
11	4	30,06	30,61	71809,99	0,14625	381,0	890,43	7043,70	7,04	38,67
11	5	30,25	30,45	71124,67	0,14165	381,0	870,77	6586,98	6,59	27,90
11	6	30,15	30,31	69916,05	0,15595	381,0	814,80	6459,48	6,46	34,81
L/h	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)	E_{vt} (GPa)	Erro (%)
14	1	30,42	30,48	71747,89	0,17645	471,0	586,40	6969,07	6,97	20,30

14	2	30,50	30,54	72362,30	0,13921	470,0	632,30	6298,10	6,30	29,14
14	3	30,54	30,47	71995,47	0,16712	470,0	606,93	7001,82	7,00	17,76
14	4	30,66	30,50	72480,23	0,17105	470,0	574,10	6369,19	6,37	22,63
14	5	30,47	30,49	71960,17	0,13366	470,0	636,17	6155,40	6,16	18,11
14	6	30,57	30,70	73662,43	0,16142	471,0	621,27	6970,15	6,97	22,28
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	l₁ (mm)	f_{m,vt} (Hz)	E_{vt} (MPa)	E_{vt} (GPa)	Erro (%)
17	1	30,50	30,43	71606,63	0,18376	562,0	457,70	7526,28	7,53	19,88
17	2	30,49	30,37	71172,23	0,19593	561,0	437,57	7339,72	7,34	16,71
17	3	30,42	30,50	71889,24	0,18290	561,0	430,30	6559,84	6,56	7,31
17	4	30,48	30,52	72172,85	0,19001	561,0	421,40	6510,17	6,51	11,17
17	5	30,68	30,49	72456,21	0,18215	562,0	430,57	6524,62	6,52	6,70
17	6	30,49	30,66	73194,79	0,20211	561,0	444,90	7610,85	7,61	9,53
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	l₁ (mm)	f_{m,vt} (Hz)	E_{vt} (MPa)	E_{vt} (GPa)	Erro (%)
19	1	30,72	30,60	73302,81	0,22055	620,0	310,13	5439,64	5,44	8,97
19	2	30,53	30,41	71547,56	0,22039	620,0	341,00	6732,75	6,73	7,43
19	3	30,59	30,62	73135,80	0,22347	620,0	352,60	7140,70	7,14	10,28
19	4	30,47	30,49	71960,17	0,22888	620,0	360,03	7749,75	7,75	21,14
19	5	30,65	30,57	72932,72	0,22434	620,0	352,33	7177,59	7,18	16,00
19	6	30,55	30,63	73111,75	0,20920	620,0	367,17	7250,83	7,25	17,20
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	l₁ (mm)	f_{m,vt} (Hz)	E_{vt} (MPa)	E_{vt} (GPa)	Erro (%)
21	1	30,53	30,68	73458,24	0,21694	680,0	292,43	6263,13	6,26	2,14
21	2	30,64	30,60	73159,68	0,20509	680,0	310,43	6699,59	6,70	8,02
21	3	30,60	30,74	74035,47	0,23794	680,0	312,57	7786,67	7,79	5,94
21	4	30,61	30,50	72373,84	0,23600	680,0	285,07	6571,46	6,57	6,89
21	5	30,61	30,70	73758,84	0,24212	680,0	296,57	7159,78	7,16	7,58
21	6	30,60	30,70	73770,77	0,20225	680,0	308,67	6477,72	6,48	11,74
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	l₁ (mm)	f_{m,vt} (Hz)	E_{vt} (MPa)	E_{vt} (GPa)	Erro (%)
23	1	30,50	30,66	73254,62	0,27029	740,0	236,57	6599,47	6,60	8,43
23	2	30,43	30,47	71724,36	0,24782	740,0	249,70	6885,16	6,89	12,00
23	3	30,43	30,47	71724,36	0,27786	740,0	237,27	6970,11	6,97	6,39
23	4	30,61	30,54	72658,96	0,27059	740,0	238,43	6766,49	6,77	7,92
23	5	30,50	30,52	72243,87	0,23099	740,0	250,57	6415,73	6,42	7,70
23	6	30,53	30,53	72362,34	0,24697	740,0	255,23	7105,81	7,11	4,01

Tabela 9 – Resultados experimentais do ensaio de flexão estática.

<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	MOR (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)	E_{st} (GPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
5	1	30,36	30,60	72443,66	0,05252	298,00	11271,00	1,11	282,76
5	2	30,21	30,39	70623,17	0,06606	310,00	11265,00	1,10	359,83
5	3	30,21	30,52	71521,68	0,06562	361,00	12308,00	1,21	355,97
5	4	30,63	30,63	73315,20	0,07795	354,00	17448,00	1,71	414,46
5	5	30,51	30,46	71806,80	0,06105	329,00	9512,00	0,93	328,57
5	6	29,93	30,62	71569,55	0,06382	361,00	9240,00	0,91	348,25
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	MOR (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)	E_{st} (GPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
8	1	30,52	30,31	70785,80	0,10791	425,00	40778,00	4,00	402,31
8	2	30,27	30,55	71887,20	0,09822	349,00	27416,00	2,69	367,58
8	3	30,42	30,55	72278,91	0,09224	308,00	34270,00	3,36	342,26
8	4	30,56	30,63	73183,49	0,09282	361,00	35177,00	3,45	341,93

8	5	30,47	30,61	72789,44	0,09947	381,00	31722,00	3,11	367,81
8	6	30,18	30,48	71216,87	0,10302	431,00	35768,00	3,51	386,18
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	MOR (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)	E_{st} (GPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
11	1	30,50	30,46	71818,63	0,14893	500,00	43661,00	4,28	420,82
11	2	30,63	30,42	71852,75	0,11355	355,00	44658,00	4,38	319,86
11	3	30,30	30,45	71289,12	0,11942	432,00	48702,00	4,78	339,72
11	4	30,06	30,61	71809,99	0,14625	463,00	51797,00	5,08	417,24
11	5	30,25	30,45	71124,67	0,14165	404,00	52517,00	5,15	403,76
11	6	30,15	30,31	69916,05	0,15595	503,00	48860,00	4,79	448,05
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	MOR (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)	E_{st} (GPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
14	1	30,42	30,48	71747,89	0,17645	507,00	59071,00	5,79	404,11
14	2	30,50	30,54	72362,30	0,13921	381,00	49733,00	4,88	318,03
14	3	30,54	30,47	71995,47	0,16712	505,00	60631,00	5,95	382,11
14	4	30,66	30,50	72480,23	0,17105	418,00	52961,00	5,19	389,25
14	5	30,47	30,49	71960,17	0,13366	423,00	53142,00	5,21	306,16
14	6	30,57	30,70	73662,43	0,16142	377,00	58124,00	5,70	365,30
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	MOR (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)	E_{st} (GPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
17	1	30,50	30,43	71606,63	0,18376	420,00	64022,00	6,28	352,36
17	2	30,49	30,37	71172,23	0,19593	439,00	64131,00	6,29	377,17
17	3	30,42	30,50	71889,24	0,1829	429,00	62333,00	6,11	351,45
17	4	30,48	30,52	72172,85	0,19001	438,00	59713,00	5,86	364,15
17	5	30,68	30,49	72456,21	0,18215	454,00	62354,00	6,11	346,54
17	6	30,49	30,66	73194,79	0,20211	575,00	70857,00	6,95	385,45
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	MOR (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)	E_{st} (GPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
19	1	30,72	30,60	73302,81	0,22055	380,00	50905,00	4,99	378,54
19	2	30,53	30,41	71547,56	0,22039	540,00	63908,00	6,27	382,87
19	3	30,59	30,62	73135,80	0,22347	478,00	66027,00	6,48	384,93
19	4	30,47	30,49	71960,17	0,22888	456,00	65236,00	6,40	397,43
19	5	30,65	30,57	72932,72	0,22434	435,00	63095,00	6,19	386,24
19	6	30,55	30,63	73111,75	0,2092	441,00	63086,00	6,19	360,71
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	MOR (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)	E_{st} (GPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
21	1	30,53	30,68	73458,24	0,21694	404,00	62527,00	6,13	340,66
21	2	30,64	30,60	73159,68	0,20509	412,00	63242,00	6,20	321,68
21	3	30,60	30,74	74035,47	0,23794	505,00	74948,00	7,35	372,05
21	4	30,61	30,50	72373,84	0,236	439,00	62688,00	6,15	371,74
21	5	30,61	30,70	73758,84	0,24212	516,00	67868,00	6,66	379,02
21	6	30,60	30,70	73770,77	0,20225	375,00	59114,00	5,80	316,66
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	MOR (kgf/cm²)	MOE (kgf/cm²)	E_{st} (GPa)	ρ_{ap} (kg/m³)
23	1	30,50	30,66	73254,62	0,27029	381,00	62063,00	6,09	390,59
23	2	30,43	30,47	71724,36	0,24782	420,00	62685,00	6,15	361,24
23	3	30,43	30,47	71724,36	0,27786	486,00	66806,00	6,55	405,03
23	4	30,61	30,54	72658,96	0,27059	476,00	63934,00	6,27	391,15
23	5	30,50	30,52	72243,87	0,23099	464,00	60744,00	5,96	335,39
23	6	30,53	30,53	72362,34	0,24697	449,00	69666,00	6,83	358,12