

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

DOAHN SIMÕES FLORES

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE PEÇAS DE
MADEIRA REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2014

DOAHN SIMÕES FLORES

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE PEÇAS DE
MADEIRA REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO

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 obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2014

DOAHN SIMÕES FLORES

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE PEÇAS DE
MADEIRA REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO

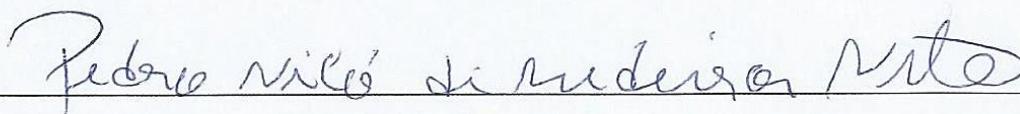
Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em...*14* de ...*julho*..... de 2014.

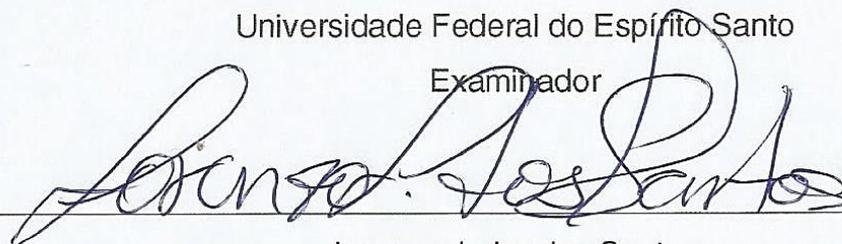
COMISSÃO EXAMINADORA



Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Pedro Nicó de Medeiros Neto
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Lorenzo Lube dos Santos
Faculdade Multivix
Examinador

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais Ademir e Rita, pois todas minhas conquistas são frutos do comprometimento que tiveram sobre a minha vida.

Ao meu irmão Diego, por sempre me apoiar e acreditar nas minhas convicções.

Aos meus familiares e amigos, por toda a valorização pessoal e respeito.

Ao Prof. Dr. Pedro Segundinho, que caminhou comigo rumo ao sucesso do trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me permitir cumprir mais uma etapa da minha vida e por nunca me desamparar.

Aos meus pais, Ademir e Rita, pelo amor, dedicação e ensinamentos ao longo da minha vida. Obrigado por estarem sempre presentes e confiarem em mim.

À Bianca, pelo carinho, por sempre me incentivar e estar ao meu lado como grande companheira e amiga.

A todos os meus familiares e especialmente a meu irmão Diego, por todo apoio e por acreditar no meu potencial.

Ao meu sobrinho Ícaro, por chegar de forma imprevista, mas ao mesmo tempo radiante na minha vida.

Aos colegas do curso de Engenharia Industrial Madeireira e demais amigos pela ajuda, amizade e alegrias que compartilhamos. Em especial aos meus grandes amigos Franco, Vinicius e Ivan por estarem junto comigo, incentivando, descontraindo e contribuindo com seus diferentes pontos de vista para vida acadêmica e pessoal.

A todos os Professores e em especial ao Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela orientação, dedicação, conselhos e amizade. Obrigado pelos conhecimentos transmitidos e por acreditar no desenvolvimento do trabalho.

Ao Alaor e Thais pela ajuda na execução dos experimentos do projeto.

Aos técnicos de laboratório e demais funcionários do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira pelo apoio, sabedoria, paciência e assistência prestada.

E por fim a todas as pessoas não citadas, que fazem parte diretamente e indiretamente da minha vida.

RESUMO

A utilização da madeira no setor de construção civil é notável em muitas pesquisas, principalmente por sua escassez e necessidade de novas tecnologias para melhor aproveitamento do material. A fim de incrementar os estudos existentes sobre a aplicação de reforços de fibras sintéticas em estruturas de madeira, por meio de ensaios de resistência não destrutivos, este trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente o sistema de estruturas mista, composta de madeira reforçada com fibras de vidro, bem como comparar a eficiência dos métodos dinâmicos de determinação do módulo de elasticidade. A madeira utilizada para ensaio neste trabalho foi o cedro australiano (*Toona ciliata*), com idade de seis anos, reforçadas com tecidos de fibra de vidro e aderidas por meio de adesivo à base de resina epóxi. Para a determinação do módulo de elasticidade foram empregadas duas técnicas, a de vibração longitudinal e a de vibração transversal, sendo avaliados oito diferentes razões de comprimento/altura (L/h) e a influência do módulo de cisalhamento. Desta forma, foram confeccionados seis corpos de prova para cada razão (L/h), sem reforço e com reforço de fibra de vidro, que totalizou uma amostragem de 96 peças. Os dados foram analisados por estatística descritiva e pela comparação dos Ganhos Absolutos Médios. Em geral, aplicação de reforços de fibra sintética provocou um acréscimo na rigidez das peças. Entre os métodos estudados, o de vibração longitudinal mostrou-se mais eficiente e apresentou maior ganho no módulo de elasticidade sobre as peças reforçadas.

Palavras chave: vibração longitudinal. vibração transversal. cedro australiano. resistência mecânica.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O problema e sua importância	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Madeira	4
2.1.1 Cedro australiano (<i>Toona ciliata</i>)	4
2.2 Reforço de fibras	5
2.2.1 Reforço de fibras de vidro	6
2.3 Módulo de elasticidade (MOE) obtido na vibração longitudinal	7
2.4 Módulo de elasticidade (MOE) obtido na vibração transversal.....	8
2.5 Influência do módulo de cisalhamento no módulo de elasticidade longitudinal.....	9
3 METODOLOGIA.....	11
3.1 Delineamento da pesquisa	11
3.2 Caracterização das propriedades da madeira.....	11
3.3 Caracterização das propriedades da fibra de vidro	13
3.4 Dimensionamento das amostras	13
3.5 Confeção dos corpos de prova com reforço de fibras de vidro.....	14
3.6 Ensaios de tração das fibras de vidro	16
3.7 Ensaio de vibração longitudinal.....	17
3.8 Ensaio de vibração transversal	19
3.9 Determinação da Umidade.....	20

3.10 Análise dos dados	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 Propriedades da madeira	22
4.2 Propriedades da fibra de vidro	23
4.3 MOE a partir de ensaios de vibração transversal	23
4.4 MOE a partir de ensaios de vibração longitudinal	25
5 CONCLUSÕES	30
6 REFERÊNCIAS	31
APÊNDICES.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geometrias recomendadas para os corpos de prova à tração.	13
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.	22
Tabela 3 – Valores médios e coeficiente de variação de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro.	23
Tabela 4 – Médias dos módulos de elasticidade (E_t) e coeficiente de variação (CV) obtidos no ensaio de vibração transversal, para cada relação de L/h	24
Tabela 5 – Médias dos módulos de elasticidade (E_l) e coeficiente de variação (CV) obtidos no ensaio de vibração longitudinal, para cada relação de L/h	26
Tabela 6 – Valores de Ganho Absoluto Médio (GAM) e Ganho Percentual Absoluto Médio (GPAM) para as razões L/h , obtidos pelo método de vibração transversal e de vibração longitudinal.	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corpo de prova de compressão paralela às fibras madeira.	12
Figura 2 – Corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.	12
Figura 3 – Esquema das variações da razão razões de L/h dos corpos de prova.	14
Figura 4 – Resina epóxi rígida 324 (a) e endurecedor 01410 (b).	15
Figura 5 – Aplicação de reforços de fibras de vidro aos corpos de prova de madeira.	15
Figura 6 – Peças de madeira com reforço de fibras de vidro em tempo de cura.	16
Figura 7 – Tecido unidirecional de vidro.	17
Figura 8 – Ensaio de tração na máquina universal de ensaios com corpo de prova inteiro (a) e corpo de prova rompido (b).	17
Figura 9 – Ensaio de vibração longitudinal.	18
Figura 10 – Ensaio de vibração transversal.	19
Figura 11 – Curvas das médias dos módulos de elasticidade em função das razões L/h , obtidos através do método de vibração transversal.	25
Figura 12 – Curvas das médias dos módulos de elasticidade em função das razões L/h , obtidos através do método de vibração longitudinal.	27
Figura 13 – Comparação do Ganho Percentual Absoluto Médio (GPAM) para as razões L/h , obtidos pelo método de vibração transversal e de vibração longitudinal.	29

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a utilização da madeira na construção civil tem se tornado ainda mais expressiva, principalmente pelas questões de sustentabilidade, visando à redução de gás carbônico e do consumo de energia no processo produtivo, e pela implantação de florestas plantadas. Tal fato se justifica por algumas características da madeira, de ser um material renovável, de fácil trabalhabilidade, alta relação resistência:peso, de propriedades isolantes desejáveis e do seu valor estético. Apesar do crescente uso de madeiras de reflorestamento no Brasil, ainda assim, busca-se utilizar esta matéria prima de forma mais racional, sendo cada vez mais frequente o desenvolvimento de novas técnicas para seu uso como um produto estrutural. Desta forma, torna-se indispensável a classificação da madeira quanto às suas características físico-mecânicas para fins estruturais.

Na Associação brasileira de normas técnicas - NBR 7190 (ABNT, 1997) encontram-se classes de resistência preestabelecidas de acordo com a finalidade e o tipo de madeira a ser empregada. A abordagem é feita de forma genérica e apresenta as seguintes características: resistência característica, módulo de elasticidade (MOE) e densidade da madeira. Além dessas características, existe outro tipo de classificação para pré-seleção de madeiras, a classificação visual. É uma análise que antecede o ensaio mecânico, a fim de se obter lotes mais homogêneos na distribuição de madeiras para fins estruturais, sendo estas peças classificadas e separadas quanto à inclinação de fibras, nós, empenamento, anéis de crescimento, encurvamento, rachaduras e fenda, conforme previsto no projeto de revisão da NBR 7190 (FIORELLI; DIAS; COIADO, 2009).

De acordo com Segundinho et al. (2012), técnicas como ultrassom, vibração transversal, vibração longitudinal, são métodos de ensaios mecânicos capazes de conferir resultados rápidos e de elevada correlação linear, sem que haja perda de material pós ensaio, chamados de ensaios não destrutivos.

Na busca para se obter melhores desempenhos de resistência e rigidez nas peças estruturais de madeira, uma das alternativas é a aplicação de reforço de fibras sintéticas. Trata-se de um elemento aderido a peça de madeira, por meio de adesivo aplicado à superfície de contato, podendo gerar alterações no modo de ruptura.

1.1 O problema e sua importância

O Brasil tem um grande potencial no setor madeireiro, devido a sua vasta extensão territorial e diversidade florestal, tanto de árvores nativas quanto de exóticas. Sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável, a madeira apresenta um papel importante no contexto da construção civil, por apresentar características de material renovável e excelente fixação de carbono. Neste contexto, novos estudos e técnicas estão sendo desenvolvidas para se obter maior eficiência no processo produtivo e a utilização mais racional desta matéria prima, principalmente por meio de ensaios não destrutivos.

As razões pelas quais se sustenta a utilização da madeira na construção civil são em virtude da mesma ser versátil, de características físicas e mecânicas desejáveis como produto estrutural, além da vantagem no apelo ambiental se comparado a materiais de fontes não renováveis (ELKINGTON, HAILES 2004). Desta forma, entende-se a importância da busca por melhoramentos para aplicação deste material de grande relevância na área da construção. Deste modo, a utilização de reforços de fibras de vidro são recursos suplementares para se conferir maiores resistências e rigidez às peças de madeira empregadas nas construções, como por exemplo, em vigas de pontes e edificações. Sobre tudo, sempre se deve buscar adquirir bons conhecimentos com relação aos métodos mais eficientes de avaliar a madeira em meio estrutural, a fim de se conseguir executar uma construção de qualidade e custos competitivos com outros materiais, como no caso do concreto armado e estruturas metálicas (REMADE, 2001).

No entanto, apesar de ser um importante material de referência normativa de estruturas de madeira, a NBR 7190 (ABNT 1997) não apresenta em seu conteúdo as condições gerais para obtenção do módulo de elasticidade através de métodos de ensaio não destrutivo como, por exemplo, o método de vibração longitudinal e transversal. Com relação aos ensaios destrutivos de flexão estática, recomenda-se, por norma, que a relação comprimento/altura L/h seja maior que 21, sendo assim, não ocorrerá influência do cisalhamento sobre as peças ensaiadas. Porém, ainda não se têm definido valores para a relação L/h em métodos não destrutivos.

A definição normativa da relação L/h para obtenção do módulo de elasticidade através de métodos não destrutivos seria de grande relevância para o conhecimento e a aplicação direta das características da madeira como elemento estrutural, possibilitando obter os dados de forma mais rápida e padronizada.

Embora seja comumente utilizada madeira serrada como solução estrutural na construção civil, existem outros produtos estruturais derivados de madeira que também podem ter a aplicação de reforços de fibras, como no caso da madeira laminada colada (MLC). Contudo, neste trabalho foram analisadas as características pertinentes à associação entre peças de madeira de *Toona ciliata* (Cedro Australiano) e reforços de fibras de vidro (RFV).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar experimentalmente o sistema de estruturas mista, composta de madeira reforçada com fibras de vidro, e a correlação entre os métodos não destrutivos aplicados.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar os principais aspectos sobre madeira reforçada com fibras;
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas da madeira de cedro;
- Determinar o módulo de elasticidade pelo método de vibração transversal e longitudinal;
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas do reforço de fibras de vidro (RFV);
- Comparar os valores dos módulos de elasticidade obtidos por meio das técnicas utilizadas;
- Avaliar a influência do cisalhamento no módulo de elasticidade de cada técnica utilizada, e;
- Verificar a relação comprimento/altura (L/h) para os métodos não destrutivos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Madeira

A madeira é um material de origem biológica, anisotrópico, heterogêneo, higroscópico e poroso. Com relação resistência:peso, apresenta um ótimo desempenho de resistência mecânica ao ser comparada a outros materiais (concreto e ferro) utilizados nas construções. Por ser um material leve em relação aos outros produtos utilizados, a madeira ajuda a reduzir a dimensão da fundação e o efeito da ação sísmica, quando aplicada como estrutura. Também apresenta um bom comportamento quanto as característica de durabilidade, isolamento térmico, elétrico e acústico, uma vez que preservada em boas condições de manutenção, isto é, mantendo-a seca e preferencialmente sem contato direto com o solo. Existem inúmeros tipos de madeiras, com cores atrativas e agradáveis visualmente, bem como sua textura que possibilita uma ampla escolha de formas, que satisfaz desde arquitetos, pois possibilita uma vasta possibilidade de aplicações, até os clientes, pelo resultado da construção acabada (MARQUES, 2008).

2.1.1 Cedro australiano (*Toona ciliata*)

O cedro australiano é uma espécie nativa das regiões tropicais da Austrália, pertence à família das *meliaceae*, e por ser de rápido crescimento, foi trazida ao Brasil com o objetivo de recompor projetos de reflorestamento. Desenvolve-se melhor em altitudes compreendidas entre 500 e 1500 m de altura e com índices pluviométricos acima de 1100 mm, preferencialmente em solos com ph entre 5,5 a 7,00. Geralmente apresenta 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 (INVESTAGRO, 2013).

O cedro australiano é da mesma família do cedro brasileiro. É uma espécie ainda pouco conhecida, mas que se adaptou bem às condições climáticas do 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 e provoca bifurcação no tronco da árvore (SOUZA; BARROSO; CARNEIRO, 2010).

De acordo com Investagro (2013), a madeira do cedro australiano apresenta cor avermelhada e é de boa qualidade, sendo bastante utilizada na construção civil, para acabamentos internos, na produção de móveis finos e na confecção de instrumentos musicais. Esta madeira pode ser considerada uma verdadeira poupança verde, uma vez que uma única árvore acima de 11 anos pode render mais de 1 m³ de madeira serrada.

2.2 Reforço de fibras

A finalidade de se utilizar materiais reforçados com fibras (compósitos) é de melhoria nas propriedades mecânicas do material, como rigidez e durabilidade natural, que quando empregado sem estes reforços não apresentam um bom enquadramento às exigências estruturais da engenharia (AGOPYAN, 1988).

Segundo Dagher (2000), uma combinação compatível entre materiais com propriedades físicas e mecânicas complementares pode gerar grande evolução técnica no cenário da construção, como no caso do concreto armado. Carvalho (2005) utilizou fibras de sisal com resina epóxi e poliuretana derivada do óleo de mamona como material de investigação, avaliando o desempenho deste material quanto à resistência à tração, e observou o melhor resultado para os compósitos com resina epóxi. Desta forma, apresenta-se uma de muitas vertentes da linha de estudo sobre as aplicações de fibras associadas à madeira, que podem ser tanto naturais quanto sintéticas.

2.2.1 Reforço de fibras de vidro

As fibras de vidro são materiais feitos a partir da sílica, por meio da adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. São compósitos amorfos cristalizados a partir de longos tratamentos térmicos e de elevadas temperaturas (HULL, 1995). A fibra de vidro é amplamente utilizada para reforço de compósitos poliméricos, pois elas apresentam boa resistência à tração. Além disso, são materiais muito flexíveis, podendo ser desenvolvido em concordância com as propriedades da madeira (FIORELLI, 2002).

Mesmo as madeiras de baixo custo, que geralmente são de qualidade inferior, apresentam alta resistência à compressão e baixa resistência à tração, no sentido perpendicular às fibras, que se combinadas com as propriedades mecânicas das fibras de vidro, pode-se gerar um produto estrutural confiável e competitivo economicamente, tal como outros materiais já utilizados, como o aço, o concreto armado e o plástico (DAGHER, 2000).

Segundo Dagher (2000), como os reforços de fibras sintéticas apresentam propriedades físicas, mecânicas e químicas muito versáteis, elas podem ser desenvolvidas de modo a apresentar características similares e complementarem às propriedades ortotrópicas da madeira. Sendo que as principais razões para isto são:

- Aumento da resistência e rigidez;
- Aumento da ductilidade, a qual fornece um mecanismo de ruptura seguro;
- Melhoria das características de deformação lenta;
- Utilização de madeira de qualidade inferior;
- Melhoria na eficiência estrutural e redução das dimensões e pesos dos elementos estruturais;
- Redução de custos;
- Redução das pressões no suprimento de madeira.

De acordo com Dagher et al. (2002), nos Estados Unidos da América já foram executados projetos de pontes e píeres utilizando madeira reforçada com fibras de vidro. Ainda, conforme os mesmo autores, estudos realizados na Universidade de Maine têm revelado que as fibras de vidro, aplicadas como reforço na região

tracionada a uma razão de 2% a 3%, proporciona um aumento da resistência à flexão de vigas de MLC em mais de 100% e a rigidez em 10% a 15%. Bui, Milner e Williams (1996) utilizaram compósitos de fibra de vidro e resina epóxi para aumentar a resistência à tração das emendas dentadas. Os resultados da resistência à tração mostraram aumentos entre 40% e 60% com 400 g/m² e 800 g/m² de tecido de fibra de vidro, respectivamente.

Segundo Dagher et al. (2002), a produção de superestruturas de pontes utilizando madeira reforçada com fibras de vidro, tem apresentado custo satisfatório, quando comparada às construções similares feitas de concreto armado, para alguns vãos. Estudos realizados até o século XXI têm apontado que os compósitos de madeira reforçada com fibras de vidro são possíveis, duráveis e demonstram uma relação custo-benefício interessante em aplicações tanto de reparo em estruturas já existente quanto para um novo componente estrutural, desde que sejam projetados apropriadamente.

Dagher (2000) ressalta ainda uma característica importante sobre o tipo de ruptura deste material. O reforço faz com que haja uma grande plastificação da região comprimida da viga, causando grandes deslocamentos verticais na fase de ruptura, o que caracteriza um comportamento dúctil, apesar de, em condições normais de ruptura à flexão, a viga de madeira ser tipicamente frágil.

2.3 Módulo de elasticidade (MOE) obtido na vibração longitudinal

Através dos métodos não destrutivos (dinâmicos) consegue-se avaliar os módulos de elasticidade e, também, obter informações qualitativas sobre a integridade de um componente mecânico. Além disso, diferentemente dos métodos destrutivos, o corpo de prova não fica inutilizado e ainda pode ser empregado normalmente em outros ensaios ou em sua função normal (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Os métodos dinâmicos são normatizados e amplamente utilizados, principalmente para materiais frágeis. Segundo Candian (2007), um dos primeiros métodos não destrutivo desenvolvido para a determinação do módulo de elasticidade da madeira, foi o de vibração longitudinal conhecido como “*resonance method*”. Este método apresenta boas vantagens, pois além de ser um método de baixo custo, não se tem perdas dos materiais durante os ensaios e possui resultados confiáveis.

Basicamente, existem três modos de vibração: vibração longitudinal, vibração transversal 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 a técnica do modo de vibração longitudinal apresenta resultados mais precisos e confiáveis (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

Os mesmos autores relatam que as ondas longitudinais são aquelas em que o movimento ocorre na mesma direção da vibração. Esta vibração, tanto em barras de seção transversal quadrada como em seção circular, é recomendada para determinação do módulo de Young, em virtude da sua precisão. De modo experimental, a metodologia se divide em duas fases, primeiramente na excitação, detecção e obtenção da frequência de vibração, e posteriormente no emprego de equações matemáticas e dos procedimentos computacionais, para a determinação dos módulos de elasticidade.

2.4 Módulo de elasticidade (MOE) obtido na vibração transversal

A técnica de vibração transversal é considerada um teste confiável para se aplicar e determinar o módulo de elasticidade, principalmente pela grande aderência do modelo físico do fenômeno e seu correspondente modelo matemático. O método de vibração transversal correlaciona a frequência de oscilação e o módulo de elasticidade de uma viga apoiada. É uma relação bastante conhecida e pode ser obtida por meio da mecânica fundamental (CANDIAN, 2007).

Segundo o mesmo autor, com este método é possível se determinar o módulo de elasticidade dinâmico, que é obtido pela frequência de vibração, do comprimento, da densidade e da altura da peça estrutural utilizada. Este módulo também pode ser relacionado ao módulo de flexão estática.

Calil 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. Entretanto, Carreira e Dias (2005) empregaram a técnica de vibração transversal na avaliação do módulo de ruptura na flexão de toras de *Eucalyptus* sp. e concluíram que esta 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

Com relação à influência do vão livre sobre o módulo de ruptura de peças de madeira, não se verifica interferência para esforços de flexão. Contudo, são indiferentes os valores da relação L/h dos corpos de prova para se determinar a resistência à flexão. Sendo assim, podem ser aproveitados os mesmos corpos de prova utilizados para se estabelecer valores do módulo de elasticidade longitudinal real e do módulo de elasticidade transversal na flexão (LAHR, 1983).

Carreira (2012) enfatiza que o esforço cortante pode ser desconsiderado no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, para ensaio de vibração transversal, com valores de L/h iguais ou superiores que 21 para o caso de utilização de toras, conforme é recomendado pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997),

De acordo com Lahr (1983), existe dependência linear entre o módulo de elasticidade longitudinal real e o módulo de resistência à ruptura e à flexão, apresentando um coeficiente de correlação apropriado. Além disso, existe dependência linear entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura à compressão paralela às fibras da madeira, onde o coeficiente de correlação também se mostra satisfatório. Estes coeficientes foram obtidos por meio de análise

experimental, sendo válidos para corpos de prova individuais de diversas espécies ensaiadas. O conhecimento destas relações permite a previsão dos parâmetros de ruptura à flexão e à compressão paralela às fibras em ensaios não destrutivos, o que possibilita o reaproveitamento da madeira, por meio de classificação prévia das peças estruturais (LAHR, 1983).

3 METODOLOGIA

3.1 Delineamento da pesquisa

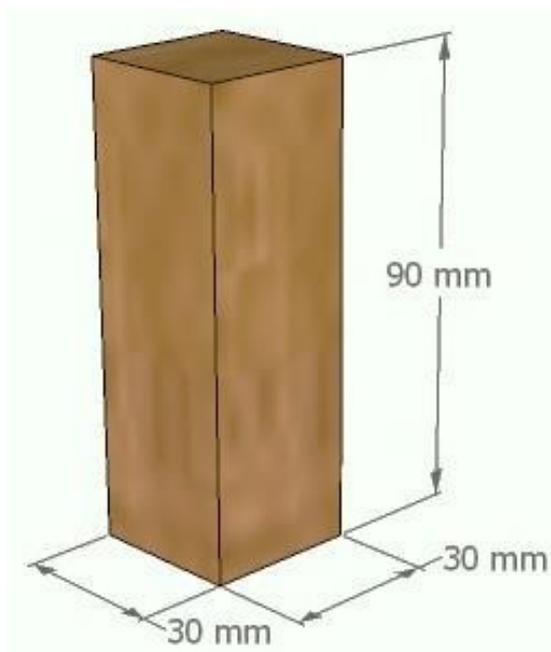
Este projeto de pesquisa tem como característica, ser do tipo de pesquisa experimental, onde se buscou analisar as propriedades físicas e mecânicas da madeira, bem como a interferência das características de resistência, ocasionada pela adição de compósitos de fibras, estabelecendo a relação de causa e efeito entre as variáveis.

Quanto à classificação da população estudada, enquadra-se no tipo probabilístico, e os dados coletados foram levantados através da análise de conteúdo e posteriormente expressos como forma de análise estatística. Desta forma, a pesquisa se enquadra tanto em quantitativa como qualitativa, pois além de apresentar tratamentos estatísticos, também aborda características específicas da madeira.

3.2 Caracterização das propriedades da madeira

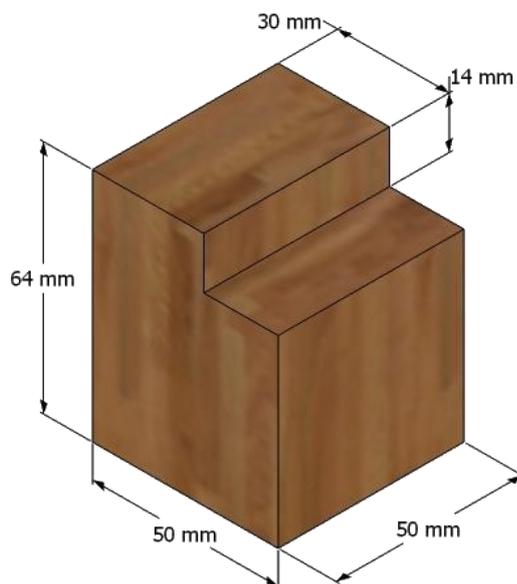
Para o estudo, foram utilizadas madeiras de cedro australiano, de 6 anos de idade e todas as etapas de processamento delas foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, da Universidade Federal do Espírito Santo. Os procedimentos adotados para caracterização das propriedades físicas e mecânicas do lote de madeira foram realizados conforme os métodos de ensaios definidos na NBR 7190 (ABNT, 1997) – Projeto de Estruturas de Madeira (Figuras 1 e 2). Com isso, foi possível determinar o teor de umidade, a densidade aparente, às resistências à compressão paralela às fibras e cisalhamento paralelo às fibras.

Figura 1 – Corpo de prova de compressão paralela às fibras madeira.



Fonte: O autor.

Figura 2 – Corpo de prova de cisalhamento paralelo às fibras da madeira.



Fonte: O autor.

3.3 Caracterização das propriedades da fibra de vidro

Os procedimentos empregados na caracterização das propriedades mecânicas das fibras de vidro foram seguidos conforme recomendações da norma *American Society for Testing and Materials*. ASTM D3039 (ASTM, 95), que especifica os procedimentos para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de materiais compósitos reforçados com matriz polimérica.

As fibras avaliadas neste trabalho são de 0° unidirecionais, seguindo as dimensões mínimas dos corpos-de-prova para os ensaios de tração, conforme apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Geometrias recomendadas para os corpos de prova à tração.

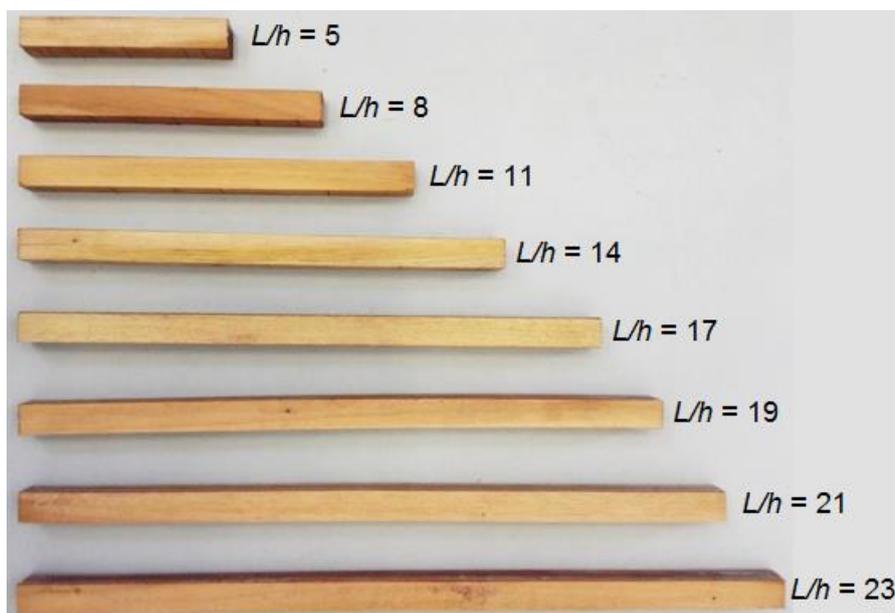
Orientação das fibras	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Comprimento Aba (mm)	Espessura Aba (mm)	Ângulo Aba (°)
0° unidirecional	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
90° unidirecional	25	175	2,0	25	1,5	90
Fios descontínuos	25	250	2,5	-	-	-

Fonte: ASTM D3039: 1995.

3.4 Dimensionamento das amostras

Para determinação do módulo de elasticidade longitudinal, foram obtidos corpos de prova com as seguintes dimensões: base (b) e altura (h) 30 x 30 mm e comprimento de peça variável (L) nas seguintes razões (L/h): 5, 8, 11, 14, 17, 19, 21, 23 (Figura 3). Para cada razão de L/h foram realizadas seis repetições conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Figura 3 – Esquema das variações da razão razões de L/h dos corpos de prova.



Fonte: O autor.

O material ensaiado foi dividido em dois grupos, madeiras sem reforço de fibra de vidro (Sem RFV) e com reforço de fibra de vidro (Com RFV), e seus resultados comparados.

3.5 Confeção dos corpos de prova com reforço de fibras de vidro

Os reforços de fibras de vidro foram confeccionados de acordo com as dimensões estabelecidas para os corpos de prova de madeira, ou seja, variando-se o comprimento de acordo com as razões de L/h uma vez que as fibras foram adquiridas em rolos de fita unidirecional com largura e espessura padronizada, 25 mm por 0,12 mm, respectivamente. Para adesão das fibras de vidro aos corpos de prova de madeira, preparou-se um adesivo contendo mistura de resina epoxídica mais catalisador (epóxi rígida 324 e endurecedor 01410 fabricados por Huntsman), na proporção de 2:1, respectivamente (Figura 4). Estes materiais foram fixados, com auxílio de um rolo de desaeração, em apenas uma das faces do corpo de prova, de

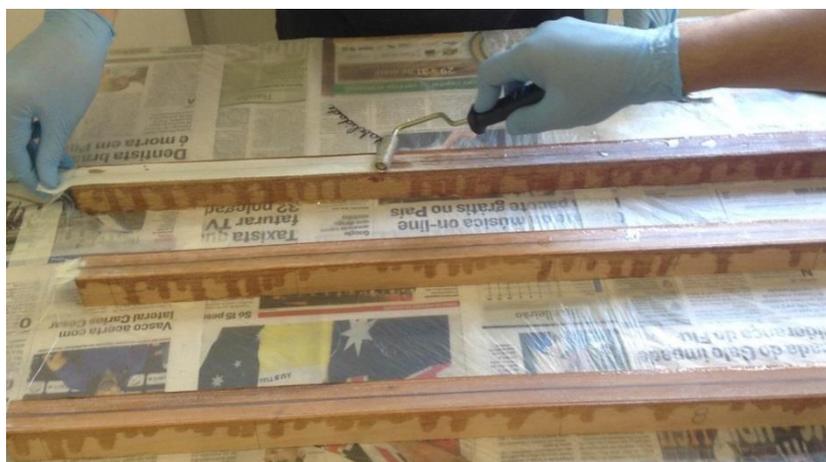
forma que as fibras de vidro ficassem paralelas às fibras da madeira. Foram aplicadas três camadas de fibras de vidro alternadamente com aplicação do adesivo (Figura 5). O material permaneceu 24 horas em tempo de cura, ou seja, até que a resina estivesse completamente seca e que um material estivesse totalmente aderido ao outro (Figura 6). Adotou-se uma porcentagem máxima de 3,3% de fibra para aplicação do reforço em relação à altura das peças de madeira, pois de acordo com Fiorelli (2002), em seu estudo com vigas de MLC, a partir deste ponto o ganho de resistência e rigidez não é significativo.

Figura 4 – Resina epóxi rígida 324 (a) e endurecedor 01410 (b).



Fonte: O autor.

Figura 5 – Aplicação de reforços de fibras de vidro aos corpos de prova de madeira.



Fonte: O autor.

Figura 6 – Peças de madeira com reforço de fibras de vidro em tempo de cura.

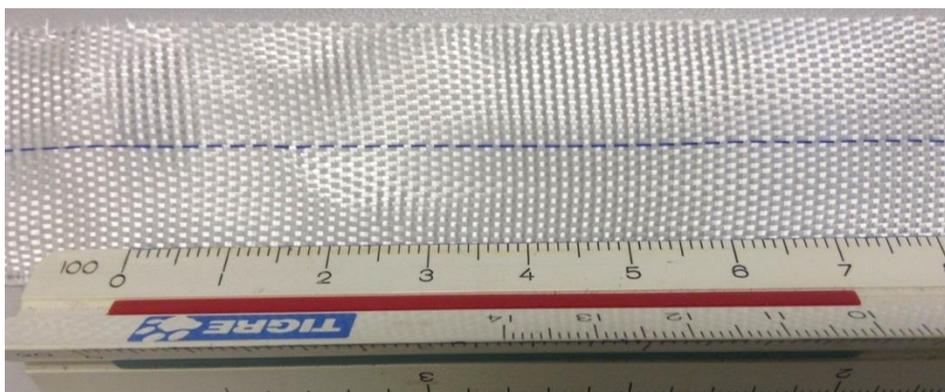


Fonte: O autor.

3.6 Ensaio de tração das fibras de vidro

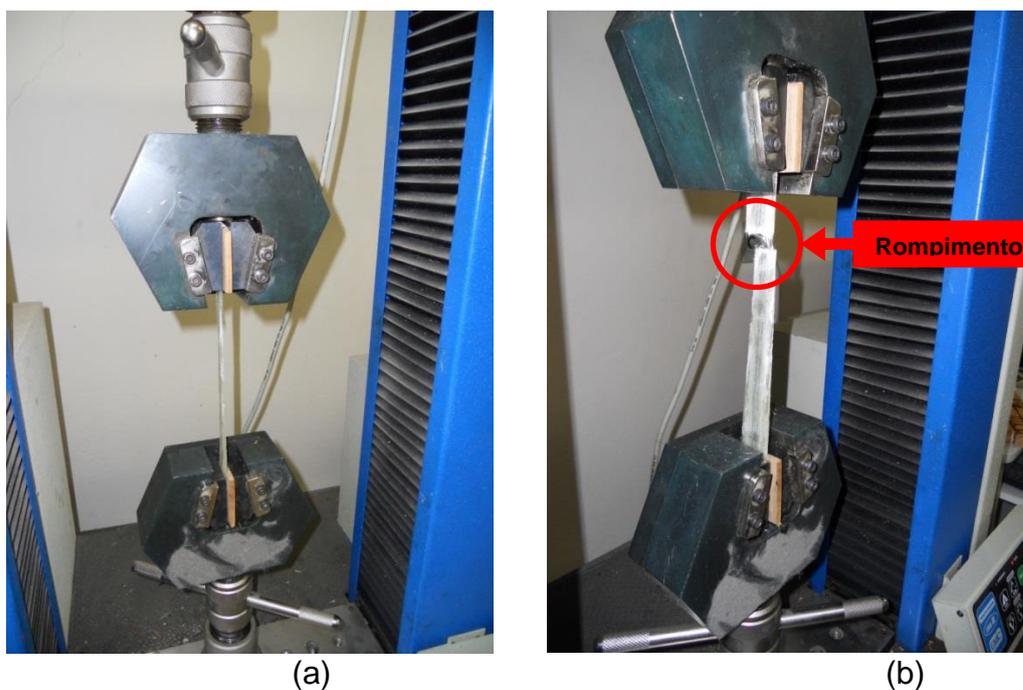
Os ensaios avaliaram o comportamento à tração do tecido unidirecional de vidro (Figura 7). Foram confeccionados e avaliados 3 corpos de prova do tecido de vidro, tendo como largura e espessura médias, 27,10 mm e 2,07 mm, respectivamente. Os corpos de prova foram laminados em cima de uma superfície impermeável e com auxílio de um pincel aplicou-se a mesma resina epóxi para todos. Em seguida, retirou-se o ar do material com a utilização de um rolo de desaeração. Após o período requerido para cura do adesivo, o material foi submetido aos ensaios de tração, realizados na máquina universal de ensaios mecânicos (Figura 8).

Figura 7 – Tecido unidirecional de vidro.



Fonte: O autor.

Figura 8 – Ensaio de tração na máquina universal de ensaios com corpo de prova inteiro (a) e corpo de prova rompido (b).



Fonte: O autor.

3.7 Ensaio de vibração longitudinal

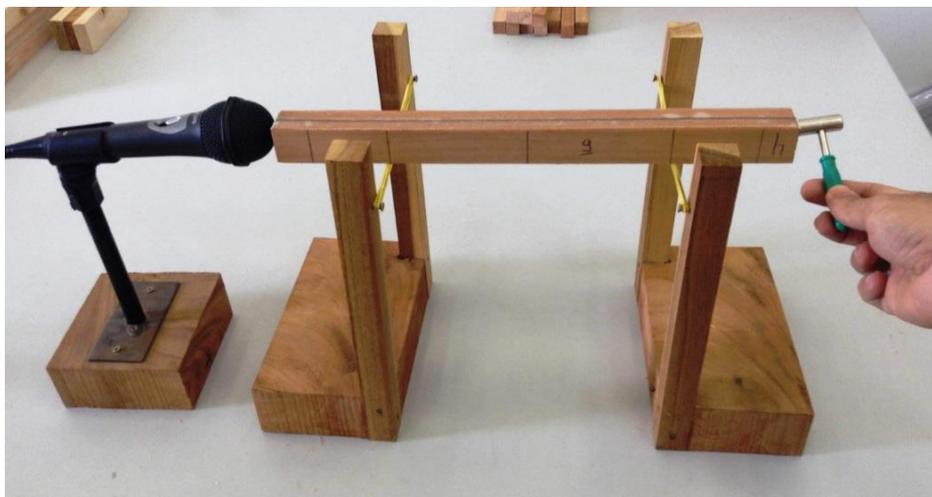
No ensaio de vibração longitudinal, os corpos de prova foram apoiados sobre dois suportes, um em cada extremidade da peça, com a face que contém o reforço voltado para cima. Em seguida, foi posicionado um microfone em uma das

extremidades do corpo de prova, que conectada a um computador, permitiu a captação das frequências de ondas através do *software* “*Fast Fourier Vibration Analyzer*”. Na extremidade oposta a captação, o corpo sofreu um impacto na direção longitudinal, conforme prescrito na norma ASTM E1876 (2009), no qual a direção do movimento da onda ocorre na mesma direção do modo de vibração longitudinal (Figura 9). Desta forma, obtém-se uma resposta acústica composta por uma ou mais frequências naturais de vibração a partir das quais é calculado o módulo de elasticidade. O cálculo do módulo de elasticidade (MOE) devido à primeira frequência de ressonância de vibração longitudinal $E_{a,l}$ é dado pela Equação 1.

$$E_{a,l} = 4 \times \left(\frac{m \cdot f_1^2}{b} \right) \times \left(\frac{l}{h} \right) \quad (1)$$

em que: $E_{a,l}$ = módulo de elasticidade (MPa); m = massa (kg); f_1 = frequência de vibração longitudinal (Hz); b = largura (mm); h = altura (mm); l = comprimento (mm).

Figura 9 – Ensaio de vibração longitudinal.



Fonte: O autor.

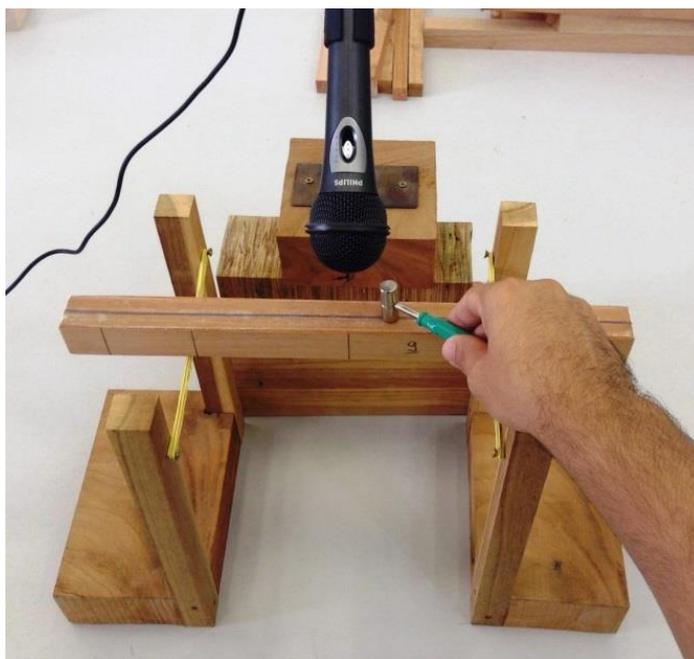
3.8 Ensaio de vibração transversal

O ensaio de vibração transversal foi realizado de forma análoga ao ensaio de vibração longitudinal, diferenciando-se apenas o sentido do impacto e o posicionamento do microfone para captação das frequências, conforme esquematizado na figura 10. O impacto aplicado na madeira foi realizado no sentido transversal e captação do sinal posicionada na metade do comprimento da peça, ambos de acordo com a norma americana ASTM E1876. 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 10 – Ensaio de vibração transversal.



Fonte: O autor.

3.9 Determinação da Umidade

Na realização do ensaio de umidade, seguiu-se as orientações da norma brasileira 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) dos corpos de prova com exatidão de 0,01 g. Após a determinação da m_i , foram colocados os corpos de prova na estufa para secagem, a uma temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Durante a secagem a massa dos corpos 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), onde foi determinada a umidade à base seca pela Equação (3):

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (3)$$

3.10 Análise dos dados

Os dados foram analisados estatisticamente, sendo as médias comparadas pelo Ganho Absoluto Médio e Ganho Percentual Absoluto Médio, para os módulos de elasticidade obtidos por meio da vibração longitudinal e vibração transversal, antes e depois do reforço com fibra de vidro.

Ganho Absoluto Médio (GAM) (Equação 4):

$$\text{GAM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_{i,lsRFV} - E_{i,lcRFV}| \text{ e } \text{GAM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_{i,tsRFV} - E_{i,tcRFV}| \quad (4)$$

em que: $E_{i,sRFV}$ = módulo de elasticidade dinâmica sem reforço de fibra de vidro; $E_{i,cRFV}$ = módulo de elasticidade dinâmica com reforço de fibra de vidro.

Ganho Percentual Absoluto Médio (GPAM) (Equação 5):

$$GPAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |GP_i| \quad (5)$$

Em que $GP_i = 100 \left(\frac{E_{i,lsRFV} - E_{i,lcRFV}}{E_{i,lsRFV}} \right)$ e $GP_i = 100 \left(\frac{E_{i,tsRFV} - E_{i,tcRFV}}{E_{i,tsRFV}} \right)$ são os ganhos em porcentagem para a i -ésima observação ($i = 1, 2, \dots, n$). Este valor leva em conta um sinal, designando se a função subestima (+) ou superestima (-) o valor observado.

A Equação 5 pode ser escrita da mesma forma que a Equação 6:

$$GPAM = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_{i,lsRFV} - E_{i,lcRFV}}{E_{i,lsRFV}} \right| \text{ e } GPAM = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_{i,tsRFV} - E_{i,tcRFV}}{E_{i,tsRFV}} \right| \quad (6)$$

Utilizou-se também estatística descritiva ao serem avaliadas médias e coeficiente de variação (CV).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades da madeira

Na Tabela 2, estão apresentados os valores de densidade aparente (ρ), umidade (U), resistências média à compressão paralela às fibras ($f_{c0,m}$) e resistência média ao cisalhamento paralela às fibras ($f_{v0,m}$) da madeira de cedro australiano.

Tabela 2 – Densidade aparente, teor de umidade, resistência média à compressão paralela às fibras e resistência média ao cisalhamento paralela 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

Fonte: O autor.

A madeira aproxima-se da classe de resistência C20 das folhosas, segundo NBR 7190 que define valores mínimos de resistência característica à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) de 20 MPa e densidade aparente de 650 kg.m⁻³, na condição padrão de referência de 12% de umidade.

Em estudos de propriedades tecnológicas da madeira de *Toona ciliata*, Pedroso (2011) e Remade (2011) verificaram valores médios de densidade aparente similares ao deste trabalho, de 326 kg.m⁻³ e 320 kg.m⁻³, respectivamente. Para valores de resistência à compressão Pedroso (2011) e Nassur (2010) encontraram valores de 30 MPa e de 27,36 MPa, constatando a semelhança das características físicas e mecânicas da madeira de cedro australiano com o presente estudo realizado.

4.2 Propriedades da fibra de vidro

Na Tabela 3 estão apresentadas as propriedades da fibra de vidro, para os corpos de prova ensaiados.

Tabela 3 – Valores médios e coeficiente de variação de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro.

	Média	Coeficiente de variação (%)
Densidade (g/cm ³)	1,16	1,88
Resistência (MPa)	51,96	20,26
Módulo de elasticidade (MPa)	2576,60	20,26

Fonte: O autor.

Ao fazer a caracterização de tecidos de fibras de vidro, Fiorelli (2005) e Mito (2009) fizeram referência de valor de densidade de 2,55 g.cm⁻³. Para as propriedades mecânicas de resistência à tração, os mesmos autores obtiveram valores de 1.247 MPa e 955,8 MPa, e de módulo de elasticidade longitudinal de 56.154 MPa e 59.463 MPa, respectivamente. Algumas variações durante o processo de confecção dos corpos de prova e da execução dos ensaios podem influenciar nos resultados, justificando as diferenças constatadas entre os dados.

4.3 MOE a partir de ensaios de vibração transversal

Os valores médios do MOE para cada razão da relação L/h obtidos a partir dos ensaios de vibração transversal, estão apresentados na Tabela 4. Na Figura 11 estão demonstrados graficamente os resultados do E_t em função da razão L/h para

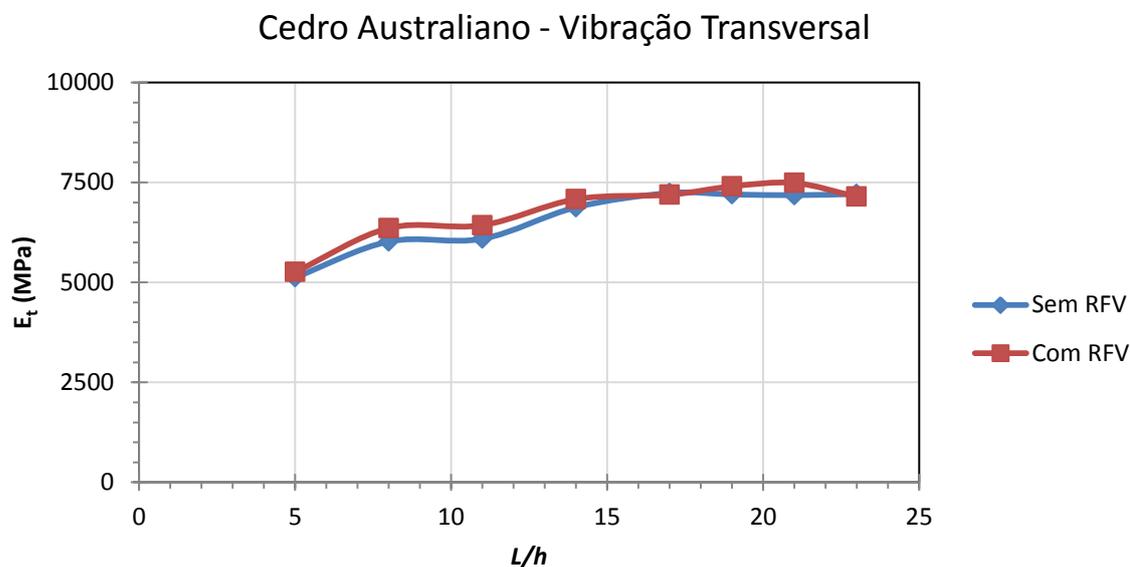
cada grupo. No Apêndice A são apresentados os dados analisados, para os 96 corpos de prova ensaiados.

Tabela 4 – Médias dos módulos de elasticidade (E_t) e coeficiente de variação (CV) obtido no ensaio de vibração transversal, para cada relação de L/h .

Cedro Australiano - Vibração Transversal				
L/h	Sem RFV		Com RFV	
	E_t (MPa)	C.V (%)	E_t (MPa)	C.V (%)
5	5125,24	7,35	5262,16	7,19
8	6021,15	16,06	6357,25	11,50
11	6089,21	8,25	6429,28	7,38
14	6877,58	19,18	7080,51	16,95
17	7234,86	4,54	7191,94	4,39
19	7199,96	7,23	7402,95	8,63
21	7181,03	7,52	7486,71	6,70
23	7210,20	10,61	7142,84	9,95

Fonte: O autor.

Figura 11 – Curvas das médias dos módulos de elasticidade em função das razões L/h , obtidos através do método de vibração transversal.



Fonte: O autor.

A partir da Figura 11 nota-se que as curvas apresentam uma tendência crescente ao longo dos eixos, implicando no aumento da rigidez a um determinado carregamento de acordo com a razão L/h , o que indica a diminuição da influência do cisalhamento.

Nassur (2010) encontrou para o módulo de elasticidade, em madeiras de cedro australiano sem RFV, um valor superior aos encontrados no presente estudo, de 8198 MPa. Amaya (2013), avaliando reforços em emendas dentadas de madeiras de *Lyptus*[®] para uso estrutural, apresentou um módulo de elasticidade médio de 12404 Mpa, obtidos por métodos de ensaios dinâmicos de vibração transversal.

4.4 MOE a partir de ensaios de vibração longitudinal

Os resultados obtidos dos valores médios do MOE para cada razão da relação L/h a partir dos ensaios de vibração longitudinal, estão apresentados na Tabela 5. Na Figura 12 estão demonstrados graficamente os resultados do E_1 em

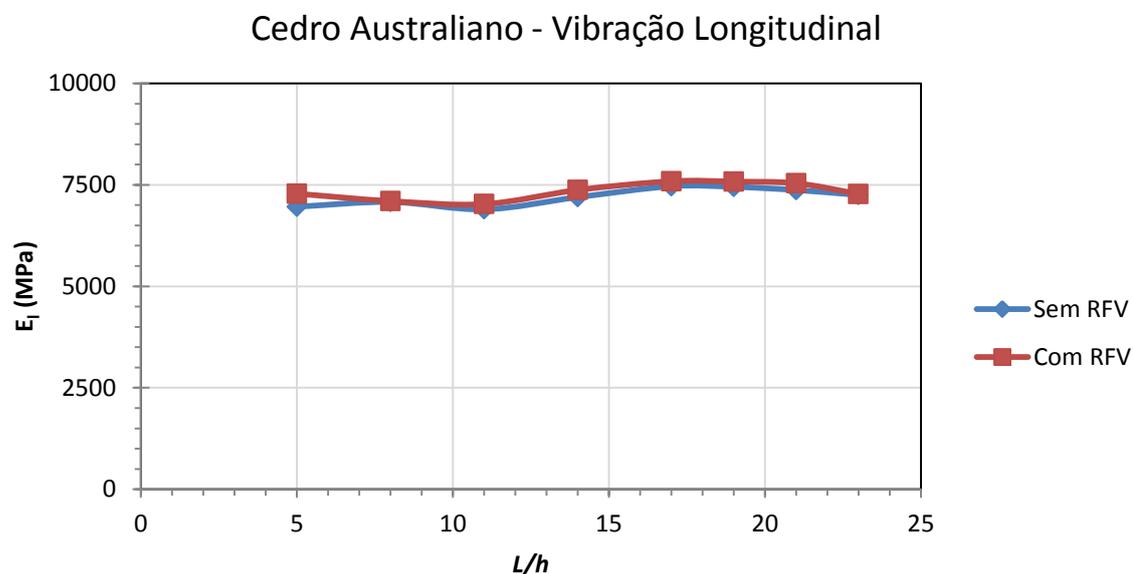
função da razão L/h para cada grupo. No Apêndice B são apresentados os resultados dos dados analisados, para os 96 corpos de prova ensaiados.

Tabela 5 – Médias dos módulos de elasticidade (E_i) e coeficiente de variação (CV) obtido no ensaio de vibração longitudinal, para cada relação de L/h .

Cedro Australiano - Vibração Longitudinal				
L/h	Sem RFV		Com RFV	
	E_i (MPa)	C.V (%)	E_i (MPa)	C.V (%)
5	6961,40	7,46	7281,41	-
8	7076,95	15,70	7099,72	13,535
11	6896,21	10,73	7026,26	10,023
14	7196,14	22,19	7372,71	17,534
17	7465,44	5,37	7588,30	5,7852
19	7450,05	6,51	7579,61	6,2543
21	7371,80	4,18	7538,97	3,889
23	7250,13	11,65	7275,82	11,34

Fonte: O autor.

Figura 12 – Curvas das médias dos módulos de elasticidade em função das razões L/h , obtidos através do método de vibração longitudinal.



Fonte: O autor.

Pela Figura 12 pode-se notar que as curvas com RFV e sem RFV apresentam uma tendência quase constante ao longo dos eixos, implicando em uma menor variação da rigidez sobre os carregamentos de acordo com as razões L/h e mantendo-se mais regular a influência do cisalhamento. Desta forma, os resultados dos módulos de elasticidade apresentados pelo método de vibração longitudinal se mostraram mais eficientes que pelo método de vibração transversal.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados do Ganho Absoluto Médio (GAM) e do Ganho Percentual Absoluto Médio (GPAM) a partir da comparação dos dados experimentais com as equações ajustadas pelos métodos de vibração transversal e de vibração longitudinal.

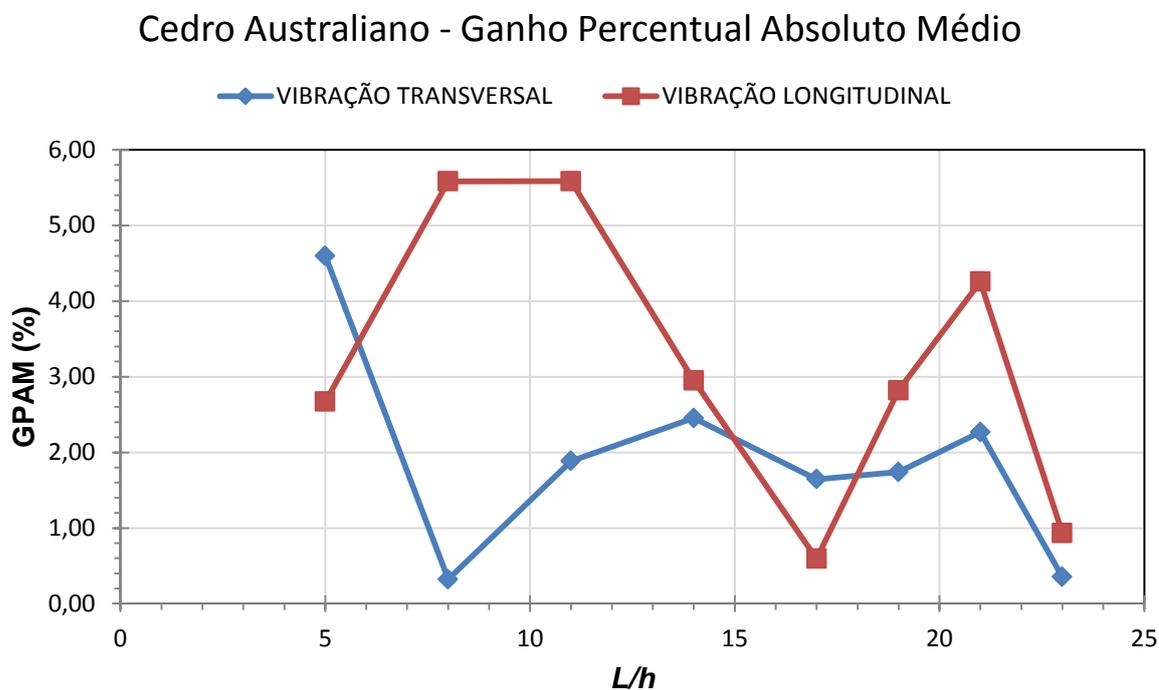
Tabela 6 – Valores de Ganho Absoluto Médio (GAM) e Ganho Percentual Absoluto Médio (GPAM) para as razões L/h , obtidos pelo método de vibração transversal e de vibração longitudinal.

L/h	Vibração Transversal		Vibração Longitudinal	
	GAM (MPa)	GPAM (%)	GAM (MPa)	GPAM (%)
5	320,01	4,60	136,92	2,67
8	22,77	0,32	336,10	5,58
11	130,05	1,89	340,06	5,58
14	176,57	2,45	202,93	2,95
17	122,87	1,65	42,92	0,59
19	129,56	1,74	202,99	2,82
21	167,18	2,27	305,68	4,26
23	25,69	0,35	67,36	0,93
Média	136,84	1,91	204,37	3,17
Desvio Padrão	93,89	1,35	116,75	1,89

Fonte: O autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6, pode-se observar que os valores dos ganhos (GAM e GPAM) obtidos a partir das Equações 4 e 6 ajustadas pelo método de vibração transversal foram maiores para as razões L/h iguais a 5 e 14, e foram menores para as demais razões, comparados àqueles obtidos pelo método de vibração longitudinal. Dessa forma, o módulo de elasticidade obtido pelo método de vibração longitudinal conduz a uma maior exatidão nas estimativas obtidas, pois não apresenta influência do cisalhamento. Os resultados de GPAM também são apresentados graficamente na Figura 13:

Figura 13 – Comparação do Ganho Percentual Absoluto Médio (GPAM) para as razões L/h , obtidos pelo método de vibração transversal e de vibração longitudinal.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

A partir das observações feitas durante a execução dos ensaios, foi possível concluir que a aplicação de reforços de fibra sintética provocou um acréscimo na rigidez das peças de madeira, podendo ser considerada como uma boa alternativa para reforço em peças estruturais de madeira na construção civil.

Na caracterização das propriedades dos reforços de fibras de vidro, foi observada uma diferenciação entre os resultados deste estudo com os de outros autores, sendo que algumas variações durante os processos de confecção dos corpos de prova e de ensaios podem ter influenciado os resultados.

Com relação à determinação dos módulos de elasticidade, as duas técnicas de ensaio dinâmico (não destrutivos) apresentaram desempenho satisfatório. Entre elas, o método de vibração longitudinal mostrou-se mais eficiente, pois os esforços cortantes devido às tensões de cisalhamento mostraram menor influência com a variação da relação L/h . Também foi possível observar que houve um ganho no módulo de elasticidade sobre as peças reforçadas e que esse ganho (GPAM) foi maior no método longitudinal (3,17%) que no método transversal (1,91%).

Estudos mais profundos a respeito da utilização de reforços sintéticos em madeira mostram-se importantes, podendo se buscar o emprego do reforço em áreas de maior solicitação além do seu desempenho associados a outros produtos estruturais de madeira.

6 REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. Exemplo de Aplicação da Ciência dos Materiais aos Materiais de Construção Civil – O Caso dos Materiais Fibrosos. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 1988, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1988. v. 1. p. 34-41.

AMAYA, M. L. C. **Reforço de emendas dentadas com compósitos de fibras em peças de madeira.** 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3039:** Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Philadelphia, PA, 1995.

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.

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

BUI, Q. D.; MILNER, H. R.; WILLIAMS J. M. **Fibre Reinforced Finger Joints.** In: Proceedings of international wood engineering conference, 1996, p. 1427-1432.

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

CALIL 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, Maio/Ago., 2003.

CARREIRA, M. R. **Avaliação da Rigidez à Flexão de Toras de Madeira por meio de Vibração Transversal**. 2012. 385 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 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.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso e reforço de estruturas de madeira**. 133 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 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: 22 jan. 2014.

DAGHER, H. J. et al. Advanced fiber-reinforced polymer-wood composites in transportation applications. **Transportation Research Record**, n.1814, paper n.02-3484, p.237-242, 2002.

DAGHER, H.J. High - Performance Wood Composites for Construction. In: VII EBRAMEM, São Carlos, 2000. **Anais** Cd-room.

ELKINGTON, J.;HAILES, J. **Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção**. 2012. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, 2012.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

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**, v.33, n.4, p.741-750, 2009.

Grupo Investagro. **CEDRO AUSTRALIANO**. 2013. Disponível em: <<http://www.investagro.com.br/cedro-australiano>>. Acesso em: 03 fev. 2014.

HULL, D. **An introduction to composite materials**. Cambridge University, 1995.

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

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: 21 jan. 2014.

Madeira de Eucalipto na construção civil. **REVISTA DA MADEIRA**. Ed. N° 128. Set. 2011. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1551&subject=Pain%E9is&title=Potencial%20do%20cedro%20australiano%20na%20produ%E7%E3o%20de%20pain%E9is>. Acesso em: 21 jan. 2014.

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

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

NASSUR, O. A. C. **Variabilidade das propriedades tecnológicas da madeira de *Toona ciliata* M. Roem. com dezoito anos de idade**. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

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

SEGUNDINHO, P. G. A.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JUNIOR, C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, 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.

APÊNDICES

Apêndice A – Resultados experimentais do ensaio de vibração longitudinal.

Apêndice A.1 – Resultados experimentais do ensaio de vibração longitudinal sem reforço de fibras de vidro.

<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l1</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,l}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
5	7	30,16	30,36	200	0,0733	10244,67	6725,21
5	8	30,19	30,23	200	0,0620	10843,00	6388,65
5	9	30,03	30,18	200	0,0699	10611,33	6944,58
5	10	30,50	30,17	200	0,0570	11527,33	6588,26
5	11	30,03	30,26	200	0,0729	10687,00	7331,24
5	12	29,56	30,28	200	0,0652	11563,00	7790,47
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l1</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,l}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
8	7	30,26	30,24	290	0,1128	7363,00	7752,91
8	8	30,21	30,29	290	0,1034	7147,00	6692,16
8	9	30,33	30,03	290	0,0928	6995,67	5784,78
8	10	30,28	30,42	290	0,1060	8062,33	8681,51
8	11	29,86	30,14	290	0,1005	7623,67	7529,93
8	12	30,31	30,38	290	0,0894	7312,67	6020,43
8	13	30,95	30,88	290	0,1014	8114,00	8102,38
8	14	31,06	30,91	290	0,1031	7756,33	7491,84
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l1</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,l}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
11	7	30,47	30,22	380	0,1184	5590,67	6111,87
11	8	30,34	30,37	380	0,1270	5461,67	6249,92
11	9	30,56	30,35	380	0,1178	5990,00	6926,14
11	10	30,36	30,09	380	0,1445	5328,33	6827,67
11	11	30,46	30,37	380	0,1139	6149,33	7075,05
11	12	30,28	30,42	380	0,1187	6466,00	8186,61
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l1</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,l}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
14	7	30,26	30,37	470	0,1676	4765,33	7787,11
14	8	30,40	30,28	469	0,1586	4699,00	7136,58
14	9	30,33	30,01	469	0,1652	4894,33	8154,29
14	10	30,25	30,18	469	0,1985	3149,00	4045,03
14	11	30,48	30,26	470	0,1656	4963,00	8317,99
14	12	30,20	30,34	470	0,1658	4768,67	7735,83
14	13	30,82	31,06	470	0,1725	4784,33	7752,29
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l1</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,l}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
17	7	30,41	30,31	562	0,2021	3773,67	7020,24
17	8	30,43	30,42	560	0,1965	4017,67	7677,86
17	9	30,35	30,33	561	0,1754	4102,00	7196,34
17	10	30,38	30,33	560	0,1916	3994,67	7432,33
17	11	30,30	30,31	561	0,2140	3947,00	8147,13
17	12	30,30	30,42	561	0,1872	4007,00	7318,72
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l1</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,l}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
19	7	30,26	30,39	620	0,2232	3321,00	6638,12
19	8	30,33	30,36	620	0,2218	3622,33	7839,48
19	9	30,12	30,25	620	0,2178	3623,33	7783,77
19	10	30,31	30,61	620	0,2086	3752,00	7848,75
19	11	30,37	30,46	620	0,2216	3541,33	7450,75
19	12	30,22	30,36	620	0,2276	3406,00	7139,45

Apêndice A.1 – Resultados experimentais do ensaio de vibração longitudinal sem reforço de fibras de vidro – continuação.

<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l₁</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,1}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
21	7	30,48	30,58	680	0,2579	3090,67	7190,80
21	8	30,23	30,41	680	0,2375	3351,00	7892,54
21	9	30,45	30,48	680	0,2307	3208,67	6963,22
21	10	30,21	30,44	680	0,2262	3319,00	7373,31
21	11	30,45	30,26	680	0,2624	3099,33	7441,34
21	12	30,35	30,35	680	0,2474	3175,33	7369,59
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l₁</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,1}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
23	7	30,41	30,24	740	0,2785	3056,33	8377,42
23	8	30,36	30,38	740	0,2154	3007,00	6251,24
23	9	30,30	30,40	740	0,2540	2919,33	6958,57
23	10	30,38	30,43	740	0,2208	3082,00	6716,12
23	11	30,32	30,41	740	0,2771	3033,33	8184,95
23	12	30,38	30,41	740	0,2709	2842,00	7012,48

Apêndice A.2 – Resultados experimentais do ensaio de vibração longitudinal com reforço de fibras de vidro.

<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l₁</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,1}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
5	7	29,81	30,29	200	0,0783	10242,00	7281,41
5	8	29,83	30,53	200	0,0680	-	-
5	9	29,83	29,73	200	0,0734	-	-
5	10	29,82	30,16	200	0,0613	-	-
5	11	29,88	30,40	200	0,0783	-	-
5	12	29,41	30,35	200	0,0697	-	-
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l₁</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,1}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
8	7	29,91	30,58	290	0,1192	7188,00	7811,47
8	8	29,56	30,49	290	0,1073	6971,00	6713,96
8	9	29,65	29,61	290	0,0963	6860,33	5991,91
8	10	30,06	30,06	290	0,1100	7673,33	8317,61
8	11	29,51	30,37	290	0,1076	7408,00	7642,03
8	12	30,06	30,55	290	0,0958	7112,33	6121,35
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l₁</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,1}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
11	7	29,87	30,64	380	0,1264	5449,33	6233,35
11	8	30,00	30,40	380	0,1353	5353,67	6462,27
11	9	29,74	30,30	380	0,1235	5837,00	7098,73
11	10	30,06	30,64	380	0,1543	5224,00	6951,54
11	11	30,28	30,15	380	0,1214	5950,33	7158,89
11	12	29,81	30,55	380	0,1265	6252,00	8252,80
<i>L/h</i>	Peça	<i>b_m</i> (mm)	<i>h_m</i> (mm)	<i>l₁</i> (mm)	massa (kg)	<i>f_{m,1}</i> (Hz)	<i>E_i</i> (MPa)
14	7	30,04	30,41	470	0,1765	4672,00	7927,59
14	8	30,10	30,28	469	0,1679	4580,67	7252,11
14	9	29,92	29,68	469	0,1698	4762,33	8137,28
14	10	29,94	28,90	469	0,1968	3365,67	4834,70
14	11	30,10	29,84	470	0,1707	4812,33	8277,25
14	12	30,03	29,96	470	0,1719	4661,33	7807,32

Apêndice A.2 – Resultados experimentais do ensaio de vibração longitudinal com reforço de fibras de vidro – continuação.

<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_l (MPa)
17	7	30,05	30,32	562	0,2132	3694,00	7180,21
17	8	30,16	30,13	560	0,2060	3947,33	7914,35
17	9	30,24	30,17	561	0,1858	3972,67	7213,88
17	10	30,31	30,62	560	0,2039	3925,67	7586,41
17	11	30,15	30,26	561	0,2251	3869,00	8289,45
17	12	30,11	30,21	561	0,1954	3903,00	7345,50
<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_l (MPa)
19	7	30,06	29,68	620	0,2289	3264,00	6778,92
19	8	30,27	29,91	620	0,2298	3583,67	8083,96
19	9	29,62	29,96	620	0,2240	3559,33	7932,98
19	10	30,31	31,15	620	0,2207	3656,67	7751,28
19	11	29,89	30,54	620	0,2295	3495,67	7619,61
19	12	29,85	30,28	620	0,2374	3350,33	7310,91
<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_l (MPa)
21	7	29,51	30,31	680	0,2630	3052,33	7452,55
21	8	29,62	29,69	680	0,2391	3302,67	8068,15
21	9	29,91	30,29	680	0,2382	3167,00	7174,04
21	10	29,92	30,07	680	0,2351	3252,67	7522,33
21	11	30,16	30,28	680	0,2714	3059,67	7567,42
21	12	29,62	30,20	680	0,2546	3102,00	7449,36
<i>L/h</i>	Peça	b_m (mm)	h_m (mm)	l_1 (mm)	massa (kg)	$f_{m,l}$ (Hz)	E_l (MPa)
23	7	30,03	30,39	740	0,2801	2988,00	8111,59
23	8	29,86	30,57	740	0,2221	2950,33	6270,29
23	9	29,54	29,79	740	0,2525	2908,67	7185,55
23	10	30,10	30,87	740	0,2281	2992,67	6509,66
23	11	30,08	30,35	740	0,2862	2994,33	8323,95
23	12	29,93	29,82	740	0,2752	2819,33	7253,90

Apêndice B – Resultados experimentais do ensaio de vibração transversal.

Apêndice B.1 – Resultados experimentais do ensaio de vibração transversal sem reforço de fibras de vidro.

<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
5	7	30,16	30,36	70297,65	0,07333	200,0	2773,67	5063,51
5	8	30,19	30,23	69501,84	0,06199	200,0	3088,00	5366,38
5	9	30,03	30,18	68791,03	0,06987	200,0	2769,33	4914,86
5	10	30,50	30,17	69786,81	0,05702	200,0	2955,00	4501,64
5	11	30,03	30,26	69327,98	0,07290	200,0	2869,67	5463,66
5	12	29,56	30,28	68344,28	0,06517	200,0	3007,33	5441,40
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
8	7	30,26	30,24	69732,15	0,11281	290,0	1480,33	6819,29
8	8	30,21	30,29	69962,82	0,10335	290,0	1419,00	5721,55
8	9	30,33	30,03	68401,97	0,09278	290,0	1408,67	5177,36
8	10	30,28	30,42	70984,96	0,10602	290,0	1593,33	7293,58
8	11	29,86	30,14	68096,09	0,10050	290,0	1493,00	6328,04
8	12	30,31	30,38	70821,97	0,08937	290,0	1404,33	4787,07
8	13	30,95	30,88	75910,23	0,10138	290,0	1556,33	6222,47
8	14	31,06	30,91	76402,30	0,10305	290,0	1531,67	6086,62

Apêndice B.1 – Resultados experimentais do ensaio de vibração transversal sem reforço de fibras de vidro – continuação.

<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	I_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
11	7	30,47	30,22	70042,08	0,11844	380,0	883,87	5717,10
11	8	30,34	30,37	70810,41	0,12699	380,0	830,00	5346,77
11	9	30,56	30,35	71159,61	0,11777	380,0	933,53	6242,00
11	10	30,36	30,09	68892,28	0,14451	380,0	821,23	6122,42
11	11	30,46	30,37	71067,09	0,11385	380,0	954,13	6311,68
11	12	30,28	30,42	71031,71	0,11866	380,0	969,50	6795,33
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	I_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
14	7	30,26	30,37	70623,67	0,16760	470,0	636,17	7864,50
14	8	30,40	30,28	70333,13	0,15859	469,0	585,23	6283,54
14	9	30,33	30,01	68310,77	0,16516	469,0	637,97	8006,49
14	10	30,25	30,18	69260,56	0,19848	469,0	439,87	4511,32
14	11	30,48	30,26	70332,16	0,16562	470,0	626,57	7570,05
14	12	30,20	30,34	70251,84	0,16577	470,0	603,17	7029,56
14	13	30,82	31,06	76958,35	0,17245	470,0	628,13	7239,63
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	I_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
17	7	30,41	30,31	70565,59	0,20213	562,0	407,93	6673,24
17	8	30,43	30,42	71336,67	0,19650	560,0	438,67	7341,67
17	9	30,35	30,33	70565,87	0,17544	561,0	451,40	7054,36
17	10	30,38	30,33	70623,99	0,19156	560,0	444,20	7412,86
17	11	30,30	30,31	70263,95	0,21396	561,0	423,63	7609,93
17	12	30,30	30,42	71078,62	0,18723	561,0	446,63	7317,10
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	I_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
19	7	30,26	30,39	70774,98	0,22318	620,0	326,93	6335,50
19	8	30,33	30,36	70693,89	0,22180	620,0	367,70	7973,59
19	9	30,12	30,25	69432,43	0,21775	620,0	349,97	7219,98
19	10	30,31	30,61	72442,71	0,20858	620,0	366,40	7265,67
19	11	30,37	30,46	71524,24	0,22161	620,0	350,43	7152,10
19	12	30,22	30,36	70437,50	0,22764	620,0	345,53	7252,90
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	I_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
21	7	30,48	30,58	72623,12	0,25792	680,0	281,20	6964,33
21	8	30,23	30,41	70832,79	0,23751	680,0	315,03	8252,76
21	9	30,45	30,48	71842,20	0,23074	680,0	293,43	6858,05
21	10	30,21	30,44	70960,64	0,22622	680,0	293,27	6799,51
21	11	30,45	30,26	70297,76	0,26238	680,0	276,50	7076,49
21	12	30,35	30,35	70658,97	0,24744	680,0	286,63	7135,01
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	I_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
23	7	30,41	30,24	70031,54	0,27853	740,0	254,73	8248,16
23	8	30,36	30,38	70927,12	0,21539	740,0	252,93	6209,15
23	9	30,30	30,40	70891,82	0,25400	740,0	245,57	6905,31
23	10	30,38	30,43	71324,86	0,22079	740,0	266,07	7003,68
23	11	30,32	30,41	71043,70	0,27705	740,0	253,27	7994,58
23	12	30,38	30,41	71149,21	0,27089	740,0	238,13	6900,34

Apêndice B.2 – Resultados experimentais do ensaio de vibração transversal com reforço de fibras de vidro.

<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
5	7	29,81	30,29	68990,71	0,07832	200,0	2734,33	5355,34
5	8	29,83	30,53	70703,19	0,06797	200,0	3032,67	5578,65
5	9	29,83	29,73	65277,69	0,07342	200,0	2647,00	4972,32
5	10	29,82	30,16	68174,26	0,06134	200,0	2860,67	4645,79
5	11	29,88	30,40	69943,51	0,07828	200,0	2818,33	5609,06
5	12	29,41	30,35	68470,16	0,06967	200,0	2903,33	5411,78
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
8	7	29,91	30,58	71264,79	0,11919	290,0	1489,67	7139,19
8	8	29,56	30,49	69788,17	0,10733	290,0	1396,33	5767,98
8	9	29,65	29,61	64133,57	0,09634	290,0	1407,67	5725,68
8	10	30,06	30,06	68041,62	0,11004	290,0	1526,67	7250,54
8	11	29,51	30,37	68850,61	0,10757	290,0	1480,33	6585,80
8	12	30,06	30,55	71423,54	0,09580	290,0	1483,00	5674,30
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
11	7	29,87	30,64	71566,15	0,12637	380,0	877,87	5889,20
11	8	30,00	30,40	70236,16	0,13528	380,0	842,43	5915,71
11	9	29,74	30,30	68896,88	0,12348	380,0	926,30	6655,23
11	10	30,06	30,64	72009,39	0,15430	380,0	831,80	6416,19
11	11	30,28	30,15	69111,25	0,12140	380,0	929,13	6562,79
11	12	29,81	30,55	70794,76	0,12648	380,0	960,73	7136,56
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
14	7	30,04	30,41	70387,52	0,17645	470,0	615,47	7775,72
14	8	30,10	30,28	69604,56	0,16789	469,0	590,77	6849,35
14	9	29,92	29,68	65144,83	0,16978	469,0	620,57	8166,08
14	10	29,94	28,90	60191,98	0,19682	469,0	424,63	4797,21
14	11	30,10	29,84	66636,10	0,17073	470,0	596,77	7471,62
14	12	30,03	29,96	67252,70	0,17190	470,0	595,53	7423,07
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
17	7	30,05	30,32	69787,65	0,21323	562,0	399,90	6840,59
17	8	30,16	30,13	68700,40	0,20599	560,0	422,67	7419,23
17	9	30,24	30,17	69203,25	0,18584	561,0	430,77	6939,01
17	10	30,31	30,62	72501,77	0,20393	560,0	428,40	7150,02
17	11	30,15	30,26	69570,56	0,22507	561,0	413,23	7692,78
17	12	30,11	30,21	69145,84	0,19543	561,0	425,03	7110,03
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
19	7	30,06	29,68	65482,79	0,22887	620,0	314,80	6510,56
19	8	30,27	29,91	67485,22	0,22976	620,0	362,10	8390,92
19	9	29,62	29,96	66334,35	0,22399	620,0	350,67	7804,88
19	10	30,31	31,15	76332,10	0,22066	620,0	361,80	7112,80
19	11	29,89	30,54	70915,05	0,22948	620,0	346,57	7305,78
19	12	29,85	30,28	69060,66	0,23738	620,0	335,97	7292,77
<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm ⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
21	7	29,51	30,31	68443,28	0,26300	680,0	281,13	7531,62
21	8	29,62	29,69	64589,38	0,23911	680,0	301,07	8321,48
21	9	29,91	30,29	69256,47	0,23820	680,0	288,27	7087,76
21	10	29,92	30,07	67781,01	0,23514	680,0	285,83	7028,83
21	11	30,16	30,28	69766,30	0,27136	680,0	284,07	7783,58
21	12	29,62	30,20	67986,81	0,25460	680,0	277,80	7166,99

Apêndice B.2 – Resultados experimentais do ensaio de vibração transversal com reforço de fibras de vidro – continuação.

<i>L/h</i>	Vigas	b_m (mm)	h_m (mm)	I (mm⁴)	massa (kg)	l_1 (mm)	$f_{m,vt}$ (Hz)	E_{vt} (MPa)
23	7	30,03	30,39	70225,34	0,28007	740,0	243,40	7551,29
23	8	29,86	30,57	71052,89	0,22211	740,0	247,77	6133,09
23	9	29,54	29,79	65078,98	0,25250	740,0	247,40	7589,74
23	10	30,10	30,87	73753,75	0,22813	740,0	256,03	6480,35
23	11	30,08	30,35	70030,27	0,28624	740,0	247,13	7978,37
23	12	29,93	29,82	66137,59	0,27517	740,0	231,47	7124,21