

NÁDIA BARROS GOMES

**Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da
norma ABNT NBR 7190:2013.**

Guaratinguetá - SP
2018

Nádia Barros Gomes

Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013.

Dissertação de mestrado apresentado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Julio Cesar Molina

Guaratinguetá - SP
2018

G633a Gomes, Nádia Barros
Análise de elementos estruturais de MLC na flexão com base na versão de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013 / Nádia Barros Gomes . - Guaratinguetá, 2018.
146 f : il.
Bibliografia: f. 82-84

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Julio César Molina

1. Madeira - Pesquisa. 2. Simulação por computador. 3. Análise de elementos finitos. I. Título.

CDU 624.011.1(043)


Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

NADIA BARROS GOMES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
Orientador / UNESP/ITAPEVA


Prof. Dr. CRISTIANE INÁCIO DE CAMPOS
UNESP/ITAPEVA


Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO
UFSCAR/SÃO CARLOS

DADOS CURRICULARES

NOME COMPLETO DO AUTOR

NASCIMENTO 03.10.1992 – Itaberá / SP

FILIAÇÃO Claudinei Pereira Gomes
Silvia Cristina de Barros

2008/2009 Curso de Nível Médio
Técnico em Edificações - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula
Souza - ETE Dr. Demétrio Azevedo Junior

2011/2015 Curso de Graduação
Engenharia Industrial Madeireira – UNESP/Itapeva.

2016/2017 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

Dedico este trabalho primeiramente à Deus.

Dedico também à minha avó Célia e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à Deus. Aquele que me permitiu chegar até aqui, Aquele que esteve comigo desde o início e em todas as etapas da minha vida. Serei eternamente grata ao Pai.

A toda minha família, que sempre me apoiou durante meus estudos, em especial, à minha avó Célia, aos meus pais e minhas irmãs, que estiveram presentes ativamente e me deram toda a força e alegria necessárias para superar todos os obstáculos.

Ao professor Julio Molina, pela orientação, incentivo e ensinamentos dados no decorrer de toda a pesquisa.

Aos técnicos e funcionários da Unesp de Itapeva e de Guaratinguetá, em especial ao técnico Juliano Brito, por todo auxílio dedicado ao trabalho.

A todos os meus amigos que de alguma forma colaboraram e me incentivaram nesta trajetória acadêmica. Em especial, Thais, Rafael, Victor e Larissa, por toda paciência e dedicação que tiveram a mim no decorrer do trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa consistiu na avaliação do modelo de cálculo proposto pela versão de revisão da Norma Brasileira de Estruturas de Madeira ABNT NBR 7190:2013 para avaliação do comportamento de elementos de MLC na flexão. Foram considerados elementos de MLC com dimensões padronizadas de 5 x 5 x 115 cm para realização dos ensaios experimentais de flexão, tendo-se em vista a da rigidez (EI) para posterior comparação com os resultados numéricos e teóricos. Foram avaliados, também neste caso, os modos de ruptura apresentados nos ensaios experimentais por cada sistema. Na confecção dos elementos de MLC foram utilizadas madeiras de reflorestamento de pinus e eucalipto da região de Itapeva – SP coladas com resina resorcinol formaldeído. Todas as lâminas de madeira passaram por processo de classificação mecânica e visual. As simulações numéricas foram realizadas no *software* ANSYS, que tem como base o método dos elementos finitos e estas serviram para a avaliação das distribuições das tensões nas regiões de interesse dos elementos de MLC. Os ensaios experimentais de flexão e de caracterização dos materiais foram no Laboratório de Propriedades dos Materiais da UNESP/Itapeva a partir da utilização da Máquina Universal de Ensaio EMIC com capacidade de 300 KN. Como resultado, observou-se que o modelo teórico proposto pela ABNT NBR 7190:2013 mostrou, para este trabalho, maior aproximação com os resultados experimentais e numéricos para as madeiras de pinus. Além disso, os modos de ruptura obtidos teoricamente foram verificados para as análises experimental e numérica realizadas.

PALAVRAS CHAVE: Madeira laminada colada. Modelo de cálculo. Análise experimental. Simulação numérica.

ABSTRACT

The aim of this work was to evaluate the calculation model proposed by the revision version of the ABNT NBR 7190: 2013 Wood Structures Brazilian Standard to evaluate the behavior of Glued Laminated Timber in bending. Glulam elements with standard dimensions of 5 x 5 x 115 cm were considered to perform the experimental bending tests considering the stiffness (EI) for later comparison with numerical and theoretical results of EI. The failure modes presented in the experimental tests by each system were also evaluated. In the preparation of the glulam elements, pine and eucalyptus reforestation woods from the Itapeva - SP region were glued with resorcinol formaldehyde resin. All the wood layers were classified by mechanical and visual process. The numerical simulations were performed in the ANSYS software, which is based on the finite element method and these were used to evaluate the stress distributions in the areas of interest of the glulam elements. Experimental bending tests and material characterization tests were performed at the Materials Properties Laboratory of UNESP / Itapeva using the Universal Testing Machine - EMIC with a capacity of 300 KN. As a result, it was observed that the theoretical model proposed by ABNT NBR 7190: 2013 standard showed, for this work, greater approximation with the experimental and numerical results for pine woods. In addition, the failure modes obtained theoretically were verified for the experimental and numerical analyzes performed.

KEYWORDS: Glued laminated timber. Calculation model. Experimental analysis. Numerical simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura em MLC – Shopping Iguatemi Fortaleza.	15
Figura 2 – Posicionamento das lâminas para a produção de MLC.	17
Figura 3 - Pavilhão esportivo da Universidade Tecnológica de Nanyang, localizada em Singapura.	18
Figura 4 - Etapas de produção da MLC.	19
Figura 5 - Emenda <i>Finger Joint</i>	21
Figura 6 - Seção transversal de um elemento de MLC com reforço de fibra de vidro.	24
Figura 7 – Combinação de lâminas e módulos de elasticidade para viga de MLC.	26
Figura 8 - Tensões devido a flexão na madeira	26
Figura 9 – Viga submetida a flexão para uma carga centrada P.	28
Figura 10 - Corpo de prova para obtenção da umidade da madeira.	30
Figura 11 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de compressão paralela as fibras.	31
Figura 12 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração paralela as fibras.	32
Figura 13 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento.	33
Figura 14 - Localização dos nós da madeira	35
Figura 15 – Arqueamento	38
Figura 16 – Maneira de medir uma racha anelar.	38
Figura 17 - Maneira de medir uma fenda que atravessa a espessura da peça.	39
Figura 18 - Linha radial representativa em peças com e sem medula.	40
Figura 19 – Ilustração dos corpos de prova retirados das toras de madeira.	46
Figura 20 - Ensaio para obtenção de E_M das lâminas de pinus e de eucalipto.	47
Figura 21 – Aplicação de adesivo com utilização de pincel.	48
Figura 22 – Aplicação de pressão através de torquímetro e sargentos.	49
Figura 23 – Colagem e prensagem das lâminas.	49
Figura 24 – Ensaio de flexão simples em viga de MLC.	50
Figura 25 – Combinação de lâminas com diferentes módulos de elasticidade na flexão.	51
Figura 26 – Elemento finito solid45.	55
Figura 27 - Modelo constitutivo adotado para a madeira.	56
Figura 28 - Vinculações de apoio em todos graus de liberdade: translações em x,y e z.	59
Figura 29 - Vinculações de apoio em apenas dois graus de liberdade: translações em x e y, sendo o z liberado para se ter uma estrutura isostática.	59
Figura 30 - Aplicação de carga nos 12 nós centrais do elemento.	60
Figura 31 - Modo de falha dos elementos de MLC de pinus após ruptura.	66
Figura 32 - Modo de falha dos elementos de MLC de eucalipto após ruptura.	67
Figura 33 – Curva padrão P x δ - VIGA MLC 1	68
Figura 34 - Perfil P x δ (VIGA MLC 5).	68

Figura 35 - Teste de Tukey para comparação entre as médias de EI_{EXP} , $EI_{teo,1}$, $EI_{teo,2}$ e EI_{NUM}	71
Figura 36 – Teste de Tukey para comparação entre as médias entre EI_{EXP} , $EI_{teo,1}$, $EI_{teo,2}$ e EI_{NUM}	72
Figura 37 – Comparação entre curvas numéricas e experimental para madeira de pinus.	74
Figura 38 – Comparação entre curvas numéricas e experimental para madeira de eucalipto. .	74
Figura 39 – Avaliação das tensões na viga de pinus: (a) Tensões de von Mises em kgf/cm^2 ; (b) Modos de ruptura obtidos no ensaio experimental de flexão para viga 1.	76
Figura 40 - Avaliação das tensões na viga de eucalipto: (a) Tensões de von Mises em kgf/cm^2 ; (b) Modos de ruptura obtidos no ensaio experimental de flexão para viga 1.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores limites de valor de K_A para classificação visual.....	35
Tabela 2 - Determinação de K_A	36
Tabela 3- Arqueamento máximo de acordo com cada classe.....	38
Tabela 4 - Limitações para rachas e fendas.....	39
Tabela 5 - Classificação de acordo com a densidade de anéis de crescimento em coníferas...	40
Tabela 6 - Classificação proposta para coníferas segundo projeto de norma ABNT NBR PN02:126.10-001.....	41
Tabela 7 – Classificação proposta para folhosas segundo projeto de norma ABNT NBR PN02:126.10-001.....	42
Tabela 8 – Valores analíticos de forças mínimas para a ruptura da seção e força máxima aplicada no ensaio de flexão (Pinus).	64
Tabela 9 - Valores analíticos de forças mínimas para a ruptura da seção e força máxima aplicada no ensaio de flexão (Eucalipto).	65
Tabela 10 - Valores de rigidez EI (pinus).....	69
Tabela 11- Valores de rigidez EI (eucalipto).....	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.1.1	Objetivos específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MADEIRA LAMINADA COLADA	17
2.2	PRODUÇÃO DE MLC	19
2.3	ESTUDOS SOBRE MLC	22
2.4	DIMENSIONAMENTO DE MLC	24
2.5	FLEXÃO DA MADEIRA	26
2.5.1	Solicitações normais na flexão simples reta	27
2.5.2	Solicitação tangencial de cisalhamento longitudinal.	29
2.5.3	Determinação das propriedades de interesse para este trabalho segundo a norma ABNT NBR 7190:1997	30
2.5.3.1	Determinação da umidade	30
2.5.3.2	Determinação da resistência a compressão paralela às fibras.	31
2.5.3.3	Determinação da resistência à tração paralela às fibras	31
2.5.3.4	Determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.....	32
2.5.4	Rigidez experimental (EI) do elemento fletido.	33
2.6	CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DA MADEIRA	34
2.6.1	Classificação mecânica	34
2.6.2	Classificação visual	34
2.6.2.1	Classificação visual de coníferas.....	34
2.6.2.2	Nós.....	35
2.6.2.3	Empenamento	37
2.6.2.4	Rachas e fendas	38
2.6.2.5	Densidade dos anéis de crescimento	39
2.6.3	Classificação visual simplificada para a madeira	40
2.6.4	Determinação da classe de resistência da madeira	43
2.6.5	Simulação numérica	43
2.7	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	MATERIAIS	45

3.2	PRODUÇÃO DOS ELEMENTOS DE MLC.....	45
3.2.1	Umidade	46
3.2.2	Classificação mecânica.....	46
3.2.3	Classificação visual.....	47
3.2.4	Caracterização das lâminas.....	47
3.2.5	Prensagem e colagem das vigas.....	48
3.3	ENSAIO DE FLEXÃO	50
3.4	ANÁLISE TEORICA.....	51
3.5	ANÁLISE EXPERIMENTAL	53
3.5.1	Tensões normais (σ)	54
3.5.2	Tensões de cisalhamento (τ)	54
3.6	ANÁLISE NUMÉRICA	54
3.6.1	Elemento Finito Utilizado	55
3.6.2	Malha de elementos finitos.....	55
3.6.3	Relação constitutiva para as madeiras.....	56
3.6.4	Condições de contorno e vinculações	58
3.6.5	Considerações sobre a aplicação dos carregamentos	59
3.6.6	Validação dos modelos numéricos.....	60
3.6.7	Análise linear.....	60
3.6.8	Análise não linear.....	61
3.6.8.1	Aspectos da análise não linear	61
3.7	COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES ANALÍTICOS, EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE (EI).....	62
3.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA	62
4	RESULTADOS	63
4.1	Caracterização das lâminas	63
4.2	Valores de carga necessários para a ruptura das vigas	63
4.3	Rigidez EI	69
4.3.1	Análise estatística da rigidez EI.....	71
4.3.1.1	Vigas com madeiras de pinus.....	71
4.3.1.2	Vigas com madeiras de eucalipto	72
4.4	Comparação entre os resultados numéricos e experimentais.....	73
4.5	Modos de ruptura	75
5	CONCLUSÕES	79
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
	APÊNDICE A – Propriedades elásticas e plásticas usadas na calibração dos modelos numéricos não lineares e lineares.	85
	APÊNDICE B – Resultados experimentais de caracterização das lâminas de madeira.....	103

APÊNDICE C– Curvas obtidas nos ensaios experimentais dos elementos de MLC de pinus e eucalipto.	113
APÊNDICE D – Scripts utilizados para calibração dos modelos não lineares de pinus e eucalipto.	125

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor que apresenta uma importante participação na economia brasileira. De acordo com ABRAMAT (2016), o atual perfil da indústria da construção civil nacional inclui, principalmente, os seguintes segmentos: produtos cerâmicos, concreto, cimento, fibrocimento, gesso, estruturas metálicas e siderurgia. As estruturas em madeira e construções pré-fabricadas em madeiras apresentam menor participação no PIB brasileiro que os demais segmentos citados.

Em países desenvolvidos da Europa e América do Norte, a caracterização e fomento do uso da madeira nas mais diversas aplicações, têm sido realizados em grande intensidade nas últimas décadas, de maneira a beneficiar-se das vantagens que o material proporciona. Porém, no Brasil, a utilização da madeira desde a década de 70 ocorreu sem acompanhamento técnico ordenado, considerando-se que a proposição da norma brasileira de madeira ABNT NBR 7190, ocorreu efetivamente em 1997 e a revisão do seu texto mais recentemente em 2013. Além disso, os grandes investimentos em pesquisa nas indústrias de aço e concreto fizeram com que a disseminação destes materiais na construção civil brasileira ocorresse de forma superior à indústria madeireira (MOLINA, 2017).

Além disso, a necessidade de construções sustentáveis, impulsionam a utilização de materiais renováveis e, portanto, induzem à um excelente potencial de crescimento do setor madeireiro na construção civil. O Brasil conta com grande disponibilidade de madeiras de reflorestamento, fator que possibilita a ampliação da indústria de sistemas construtivos em madeira no país. De acordo com Molina (2017), quando utilizada de maneira correta, a madeira pode concorrer com materiais como concreto e aço de maneira equivalente, ou até mesmo superior a estes referidos materiais. Para isto, deve ocorrer a escolha do sistema estrutural adequado e utilização da espécie de madeira apropriada para tal uso.

Dentro deste contexto, o sistema construtivo em madeira laminada colada (MLC), apresenta-se como uma alternativa sustentável para a construção civil, pois permite a utilização de madeiras de reflorestamento para a construção de grandes estruturas. Este sistema construtivo ainda não é amplamente utilizado no mercado brasileiro, pois existem poucas indústrias produtoras de MLC no país. Por outro lado, os estudos sobre o tema estão sendo realizados de maneira crescente, de forma a possibilitar a disseminação de informações e a divulgação do produto no mercado brasileiro (TELES, 2009).

De uma maneira geral, a MLC, consiste num sistema industrializado, onde lâminas de madeira são unidas através de adesivo e permitem a obtenção de grandes elementos estruturais.

Este sistema construtivo possibilita a realização de projetos diferenciados, pois os elementos de MLC podem ser produzidos de forma a apresentar formatos curvos, grandes dimensões e suportar grandes vãos livres. A Figura 1 apresenta uma estrutura em MLC, construída na cidade de Fortaleza – CE pela empresa Carpinteria.

Figura 1 – Estrutura em MLC – Shopping Iguatemi Fortaleza.



Fonte: Dias e Bastos (2016).

A norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190 de 1997 propõe um modelo de cálculo bastante simplificado para a avaliação de elementos estruturais de MLC, enquanto que a versão de revisão desta mesma norma, realizada em 2013, que está atualmente em consulta nacional, propõe um modelo de cálculo baseado na rigidez EI do elemento fletido de MLC. Dentro deste contexto, não existem resultados teóricos e experimentais que validem o referido modelo de cálculo proposto.

Portanto, esta pesquisa tem por finalidade realizar uma análise do modelo teórico de cálculo proposto pelo projeto de revisão da norma brasileira de madeiras com posterior comparação com resultados experimentais e numéricos, visando contribuir com o processo de revisão da referida norma.

1.1 OBJETIVO GERAL

Análise do comportamento de elementos de MLC com base no projeto de revisão da norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190:2013, considerando madeiras de pinus e eucalipto e resina resorcinol formaldeído.

1.1.1 Objetivos específicos

- Avaliação geral do modelo de cálculo proposto pela ABNT NBR 7190:2013;
- Avaliação experimental da rigidez EI de elementos de MLC com base em ensaios de flexão;
- Avaliação teórica da rigidez EI com base na proposta no projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013;
- Avaliação numérica da rigidez EI e da distribuição das tensões nos elementos ensaiados experimentalmente para identificação dos modos de ruptura obtidos nos testes experimentais;

1.2 JUSTIFICATIVA

A indisponibilidade de informações normativas brasileiras mais abrangentes sobre a utilização da MLC nas construções civis dificulta a inserção deste produto no mercado. A atual ausência de normas específicas impossibilita que os profissionais da área realizem projetos de maneira padronizada e segura. Desta maneira, é de grande importância que se estabeleçam além de critérios de produção seguros, onde haja a possibilidade de construção em MLC que apresentem qualidade e confiabilidade, também um modelo de cálculo consistente. Etapas da produção, como a classificação das lâminas, aplicação de adesivo, pressão aplicada na prensagem e cálculos para dimensionamento dos elementos construtivos, precisam ser estabelecidas de maneira confiável, para possibilitar maior ênfase na inserção do produto no mercado brasileiro.

Por ser uma metodologia recente de avaliação da rigidez (EI) este trabalho se torna interessante no sentido de observar quais tipos de madeira se adequam melhor ao modelo de cálculo proposto.

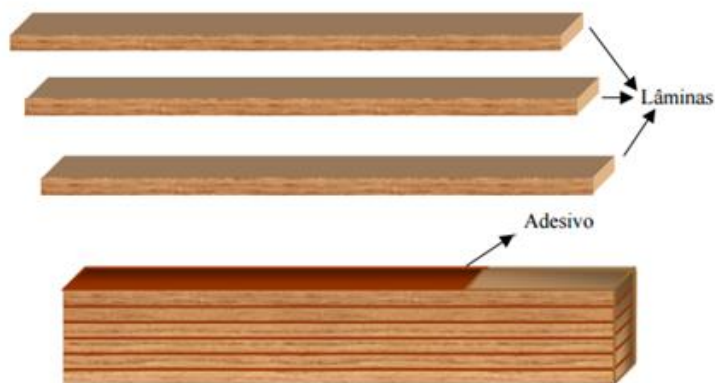
Diante a este fato, este trabalho visa contribuir para a normatização da construção em elementos de MLC no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MADEIRA LAMINADA COLADA

De acordo com Segundinho et al. (2015), o termo Madeira Laminada Colada (MLC) refere-se à uma estrutura de madeira utilizada na construção civil, onde elementos estruturais são produzidos a partir da colagem de pequenas peças de madeira. A produção de MLC é realizada a partir do posicionamento das lâminas de madeira de forma paralela ao eixo da peça, ou seja, paralela ao comprimento do elemento estrutural e a colagem é realizada nas faces e nos topos das lâminas de madeira, de forma a atingir altura e largura necessárias para o projeto construtivo desejado. A Figura 2, ilustra o posicionamento de lâminas sem emendas de topo e a aplicação de adesivo para a colagem das faces da madeira.

Figura 2 – Posicionamento das lâminas para a produção de MLC.



Fonte: Zangiácomo, 2003.

A MLC é produzida através de uma distribuição seletiva de lâminas, onde as mesmas são dispostas adequadamente, de maneira que as peças de maior qualidade fiquem dispostas nas regiões de maior solicitação mecânica (MIOTTO, 2009).

Uma das principais vantagens apresentadas pela MLC é a possibilidade de remover os defeitos provenientes da madeira natural, ou seja, os defeitos como nós e rachaduras podem ser removidos das peças para que o restante da mesma seja aproveitado através de emenda longitudinal. Além disso, a partir da união de pequenas peças de madeira, é possível obter peças de grandes dimensões, apresentando grande variedade de comprimento e largura e permitindo a construção de grandes estruturas (FIORELLI, 2005).

Miotto (2009) cita como vantagem a distribuição seletiva e conseqüentemente a dispersão de defeitos. A maneira pela qual a MLC é produzida gera redução e dispersão de defeitos da madeira fazendo com que a peça apresente maior resistência mecânica e auxilie na racionalização da madeira e conservação de florestas naturais.

Por outro lado, o processo de produção utilizado para a fabricação de MLC resulta em um custo final elevado em comparação com a madeira maciça. Os custos do processo produtivo incluem mão de obra, equipamentos, custo do adesivo e também perda de madeira e adesivo devido às emendas e os acabamentos (FIORELLI, 2005).

De acordo com Nogueira (2017), a MLC pode ser empregada em diversos usos dentro da construção civil, pois apresenta elevada resistência mecânica e possibilidade de vencer grandes vãos. Além disso, a plasticidade do material permite que as construções apresentem curvaturas e torções.

A Figura 3 mostra os detalhes de uma estrutura de MLC do pavilhão esportivo da Universidade Tecnológica de Nanyang.

Figura 3 - Pavilhão esportivo da Universidade Tecnológica de Nanyang, localizada em Singapura.



a) Viga com suporte em três pontos.



b) União das vigas com conexão em aço.



c) Viga de MLC com usinagem em CNC.



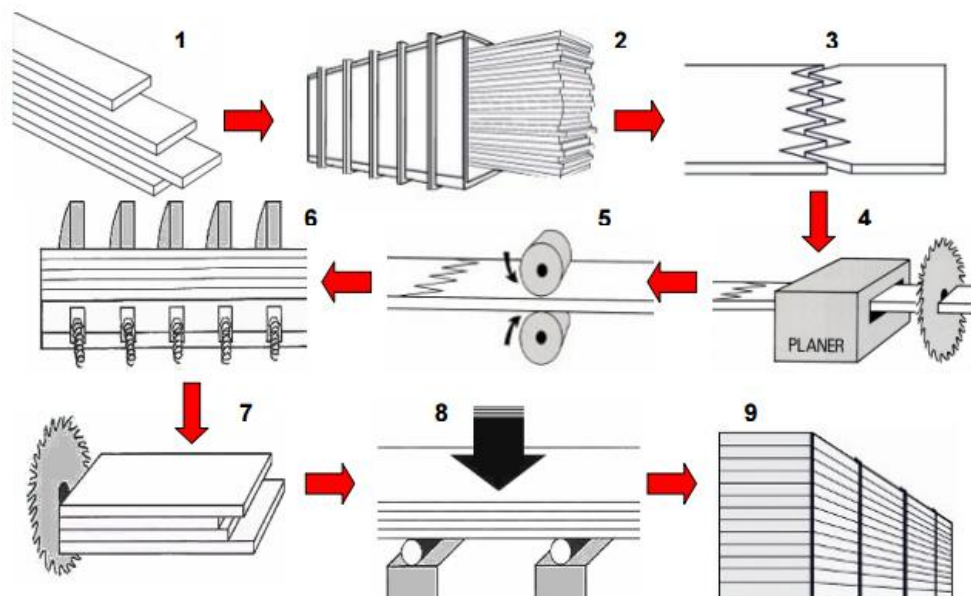
d) Visão geral do pavilhão esportivo.

2.2 PRODUÇÃO DE MLC

A produção da MLC ocorre dentro da indústria, onde a tora inicial passa por diversos processos até a obtenção do produto final. A Figura 4 ilustra as etapas utilizadas para a produção de uma viga de MLC. As etapas ilustradas na figura são:

- 1 – Classificação visual e mecânica das lâminas e separação das mesmas em lotes;
- 2 – Secagem em estufa;
- 3 – Execução de emendas dentadas através de fresamento e colagem;
- 4 - Corte das lâminas na dimensão do projeto;
- 5 – Aplicação do adesivo nas faces das lâminas;
- 6 – Colagem e prensagem das lâminas;
- 7 – Corte das vigas de acordo com a dimensão do projeto;
- 8 – Teste de resistência e linha de cola;
- 9 – Acabamento.

Figura 4 - Etapas de produção da MLC.



Fonte: Teles (2009).

A primeira etapa, que é a etapa de classificação visual das lâminas, é realizada com o objetivo de avaliar os defeitos presentes na madeira, de forma a descartar a peça ou a seção

onde o defeito está presente, para que não haja redução da qualidade na viga final. Esta classificação ocorre de forma a selecionar e posicionar de maneira estratégica, as lâminas que apresentam melhor qualidade.

As lâminas de madeira que irão compor o elemento de MLC devem ser classificadas de maneira visual e mecânica. Após a classificação, as lâminas que apresentam as melhores características devem ser posicionadas nas regiões que exigem maior resistência mecânica, ou seja, nas regiões solicitadas por esforços de compressão, na parte superior do elemento, e tração, na parte inferior do elemento (FIORELLI, 2005).

Conforme o projeto de revisão ABNT NBR 7190:2013, a classificação visual é realizada através da observação das características da lâmina, seja utilizando equipamentos apropriados, seja através da observação à olho nu. A classificação mecânica ocorre pelo módulo de elasticidade e é realizada a partir de ensaio mecânico não destrutivo da lâmina de madeira, de modo a obter o módulo de elasticidade na flexão (E_M). Estas classificações permitem o agrupamento de lotes de lâminas de acordo com os valores E_M obtidos.

Segundo Teles (2009), a etapa de classificação das lâminas utilizada no processo de produção de MLC é de essencial importância pois atribui à viga maior resistência mecânica, de maneira a atender as exigências estruturais necessárias para aplicação do produto na construção civil. Além disso, a classificação mecânica não-destrutiva é um meio utilizado para possibilitar a utilização dos modelos teóricos de rigidez e resistência da MLC.

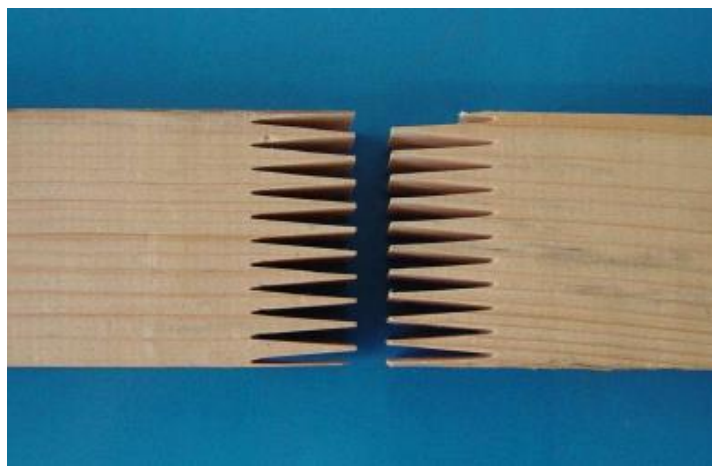
De acordo com Fiorelli (2005), a classificação mecânica tem por objetivo determinar o módulo de elasticidade (E) das lâminas de madeira através de ensaios não destrutivos. A partir da determinação do módulo de elasticidade (E), é possível classificar as lâminas, dividindo-as em sub-lotes e agrupando os valores elevados em um mesmo sub-lote e valores inferiores em outro sub-lote.

A etapa de secagem é, na maioria das vezes, realizada nas lâminas de maneira artificial, utilizando estufas de secagem. A remoção da umidade da madeira ocorre até a obtenção da umidade final desejada para a lâmina. No caso de lâminas para produção de MLC essa umidade não deve ser superior a 15% (CERCHIARI, 2013).

Segundo Teles (2009), deve haver homogeneidade entre a umidade das lâminas, para que não haja redução da qualidade do produto final. Durante a prensagem, o teor de umidade médio é distribuído, ocasionando tensões internas que podem gerar contração e inchamento das lâminas e, conseqüentemente, delaminação do produto final.

A etapa de execução das emendas nas peças de MLC permite a obtenção de elevado comprimento dos elementos estruturais, além de possibilitar a remoção de defeitos em pequenas seções das peças e utilização da mesma na estrutura. A emenda dentada (*finger joint*) é a mais utilizada no processo de fabricação de MLC (Figura 5). São utilizadas também, mas com menor frequência, as emendas de topo e biselada (APRILANTI, 2010).

Figura 5 - Emenda *Finger Joint*.



Fonte: Miotto (2009).

A qualidade da emenda dentada é de suma importância para o desempenho final da resistência da peça de MLC. O controle adequado das emendas longitudinais e o conhecimento de suas propriedades de resistência e rigidez influenciam diretamente na resistência do elemento como um todo (MACÊDO E CALIL JUNIOR, 2007). O projeto de revisão da norma ABNT NBR 7190 prevê que a união por emendas dentadas deve ser submetida a testes mecânicos para verificação de eficiência.

As lâminas devem passar pelo processo de aplainamento para obtenção de superfície adequada para a aplicação do adesivo e posterior posicionamento das mesmas de acordo com a classificação anteriormente realizada, onde as lâminas com menor índice de defeitos são dispostas nas regiões de maior solicitação (MIOTTO, 2009).

Portanto, após o processo de emenda, corte no comprimento previsto em projeto e aplainamento, as lâminas estão aptas para a aplicação do adesivo em suas superfícies. Para este processo, podem ser utilizados diversos adesivos estruturais, sendo os adesivos fenol-formaldeído e resorcinol-formaldeído, os adesivos mais utilizados para a produção de MLC (CERCHIARI, 2013). O adesivo utilizado deve apresentar elevada resistência à umidade, em especial em casos em que a estrutura de MLC esteja exposta ao ambiente (FIORELLI, 2005).

Segundo a versão de revisão da norma de madeiras ABNT NBR 7190:2013, a pressão mínima recomendada para madeiras com densidade $\leq 0,5 \text{ g/cm}^3$ é de 0,7 MPa, enquanto que para madeiras com densidade superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$ a pressão mínima de colagem recomendada é de 1,2 MPa.

Após a aplicação do adesivo, a viga deve ser submetida a prensagem para fixação e cura completa do adesivo. A pressão e o tempo de prensagem variam de acordo com o adesivo utilizado e, portanto, este processo deve ocorrer de acordo com o especificado pelo fabricante do adesivo (FIORELLI, 2005; CERCHIARI, 2013).

Após a prensagem, as peças passam pelo processo de acabamento e obtenção das dimensões finais. O aplainamento após prensagem, permite a remoção do excesso de adesivo nas laterais das lâminas. Após o aplainamento são realizados os cortes finais e acabamentos necessários (MIOTTO, 2009).

2.3 ESTUDOS SOBRE MLC

Os estudos sobre o produto MLC estão sendo constantemente aprimorados no Brasil, de forma a encontrar diferentes soluções de produção e avaliação da qualidade e resistência dos elementos. Não existem muitos estudos no Brasil envolvendo análise numérica de elementos de madeira, sendo que, a maioria dos estudos são baseados em análises experimentais.

Fiorelli et.al.(2015), fizeram a análise numérica de elementos de MLC usando fibras naturais reforçadas com polímeros e observou um aumento de resistência do elemento reforçado com relação ao elemento sem a utilização do reforço.

Negreli e Molina (2015), avaliaram experimental e numericamente elementos de MLC para a avaliação da distribuição de tensões nas regiões de maior interesse do materail. A avaliação foi realizada a partir da utilização do software ANSYS, utilizando o Método dos Elementos Finitos. A modelagem numérica proposta foi satisfatória e possibilitou a identificação das regiões mais solitadas do material em função dos carregamentos aplicados.

Santos (2014), realizou um estudo objetivando expandir o conhecimento sobre a MLC através da avaliação do mesmo. O autor realizou ensaios em vigas de *pinus elliottii* e *Lyptus*, utilizando adesivo à base de Emulsão de Polímero Isocianato (EPI). As vigas foram classificadas visualmente e mecanicamente, através de ensaios de compressão, tração e cisalhamento da madeira e da linha de cola. Foram obtidas as características elásticas e de resistência das vigas através de ensaios dinâmicos e ensaios tradicionais de flexão estática. O

autor constatou que a resistência mecânica e o módulo de elasticidade do eucalipto foram numericamente superiores à do *pinus*. Por outro lado, a qualidade de colagem obtida pelas vigas de pinus foi superior à do eucalipto. De modo geral, as vigas de MLC apresentaram desconformidades no processo produtivo. Contudo apresentaram resultados satisfatórios, constatando-se que o produto é um potencial substituto da madeira maciça.

Teles (2009), estudou a utilização da madeira da espécie *Sextonia rubra* (Louro-vermelho) na produção de MLC, de forma a analisar o comportamento de colagem do adesivo utilizado, o resorcinol formaldeído, para a referida espécie. Além disso, foi realizada a avaliação teórica e experimental do módulo de elasticidade (E_M), momento fletor (M), módulo de ruptura (F_M) e flecha (δ) dos corpos de prova MLC. O autor concluiu que os resultados teóricos foram semelhantes aos resultados experimentais para as propriedades mecânicas e que a espécie estudada apresenta bons resultados para a produção de MLC. O adesivo utilizado foi eficaz e recomendou-se a utilização da gramatura de 300g/m².

Icimoto (2013), analisou de forma experimental a viabilidade técnica em se produzir dormentes ferroviários utilizando a madeira laminada colada de forma a substituir as madeiras nobres que são utilizadas para este fim. Foram produzidas diversas configurações diferentes de MLC e os resultados mostraram que os dormentes produzidos em MLC com a espécie *pinus oocarpa* e *Eucaliptus paniculata* atingiram as condições necessárias estabelecidas na norma ABNT NBR: 7511:2013 (Dormentes de madeira – Requisitos e métodos de ensaio). A espécie *Eucaliptus rostrata* apresentou problemas de secagem e os valores de resistência não atingiram as exigências mínimas impostas pela mesma norma.

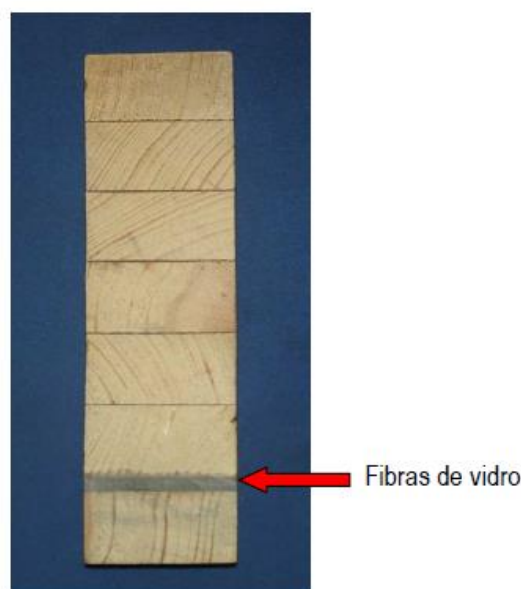
Miotto (2009) realizou um estudo avaliando de forma experimental e numérica o comportamento de estruturas mistas de MLC e concreto com reforço de fibras de vidro. Segundo o autor, a união entre o concreto e as vigas de MLC trouxe maior durabilidade ao material e melhores valores de rigidez. A aplicação de reforços com fibras sintéticas, por sua vez, aumentou ainda mais a resistência do material e gera o aumento da confiabilidade estrutural do mesmo.

Fiorelli (2005), realizou um estudo buscando determinar métodos para fabricação de elementos retos de MLC, com e sem reforço de fibras de vidro (RFV). O autor utilizou informações da literatura, de forma a abordar questões relativas à resistência da madeira, defeitos naturais, dimensões das lâminas, posicionamento e espaçamento das emendas, colagem e prensagem das vigas. Deste modo, foram realizados ensaios experimentais em protótipos de vigas de MLC produzidos com a espécie *Pinus Caríbea Var. Hondurensis*, sem e com reforço de fibra de vidro. Através da experimentação foi realizada a verificação do aumento da rigidez

e resistência das vigas reforçadas. Foi proposto também um modelo numérico para o cálculo do momento fletor e da rigidez à flexão (EI) para as vigas com e sem reforço. Os resultados experimentais validaram o modelo proposto. Além disso, a qualidade da colagem realizadas com adesivos Phenol-resorcinol e Epóxi AR-300 foi avaliada através de ensaios de delaminação realizado através da variação de pressão, umidade e temperatura. Ambos os adesivos se mostraram eficientes para a produção de MLC.

A Figura 6 ilustra um elemento de MLC com reforço de fibra de vidro na linha de cola presente na região mais tracionada na viga.

Figura 6 - Seção transversal de um elemento de MLC com reforço de fibra de vidro.



Fonte: Miotto, 2009.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE MLC

A norma ABNT NBR 7190:1997 apresenta, de maneira sucinta, algumas recomendações sobre a produção de MLC, especificando que o elemento de MLC deve ser composto por madeira de primeira categoria, com lâminas de espessura de até 30 mm, utilizando-se adesivo à base de fenol-formaldeído e resistente à água. A norma recomenda também que haja uma distância considerável entre as emendas de lâminas adjacentes, sendo essa distância igual a 25 vezes a espessura da lâmina. Considera-se todas as emendas presentes em um comprimento equivalente à espessura da viga como localizadas na mesma seção resistente.

A norma ABNT NBR 7190:1997, apresenta ainda, um breve tópico abordando a caracterização da madeira laminada colada. Admite-se, neste caso, que o elemento de madeira laminada colada possui as mesmas propriedades da madeira das lâminas e que devem ser efetuados ensaios específicos como cisalhamento na linha de cola, tração à lâmina de cola e resistência das emendas dentadas e biseladas. O cálculo do elemento de MLC, neste caso, é baseado na redução da área resistente da seção transversal do elemento por um coeficiente α que é dado em função do tipo de emenda utilizada.

A proposta de revisão elaborada em 2013 para a norma de madeiras prevê novos métodos de ensaios mecânicos para estruturas em madeira considerando inclusive peças de dimensões estruturais.

Segundo a proposta de revisão de norma ABNT NBR 7190:2013, o cálculo de rigidez à flexão para as peças de MLC é realizado de acordo com a Equação (1):

$$EI = [2 \cdot E_{M,S} \cdot I_{(1/4)} + E_{M,I} \cdot I_{(1/2)}] \quad (1)$$

onde:

EI = rigidez à flexão do elemento estrutural;

$E_{M,S}$ = valor médio dos módulos de elasticidade do lote de valores superior;

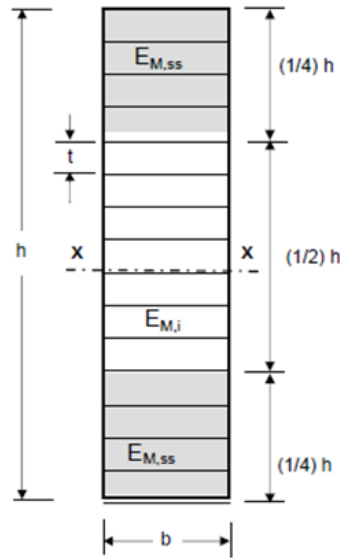
$E_{M,I}$ = valor médio dos módulos de elasticidade do lote de valores inferior;

$I_{(1/4)}$ = momento de inércia da quarta parte mais afastada, em relação ao eixo baricêntrico (x);

$I_{(1/2)}$ = momento de inércia da metade central da seção transversal, em relação ao eixo baricêntrico (x).

Neste caso, as lâminas deverão ser separadas previamente, através da classificação mecânica, de forma a agrupar um sub-lote superior com lâminas de E_M acima da média representativa das lâminas da espécie utilizada e um sub-lote inferior com tábuas de E_M abaixo dessa média. Desta forma, as lâminas pertencentes ao sub-lote de E_M superior, deverão compor as quartas partes mais afastadas da linha neutra do elemento de MLC e as de E_M inferior deverão compor a metade central da seção transversal do elemento. A Figura 7 demonstra a combinação de lâminas e seus respectivos módulos de elasticidade à flexão.

Figura 7 – Combinação de lâminas e módulos de elasticidade para viga de MLC.

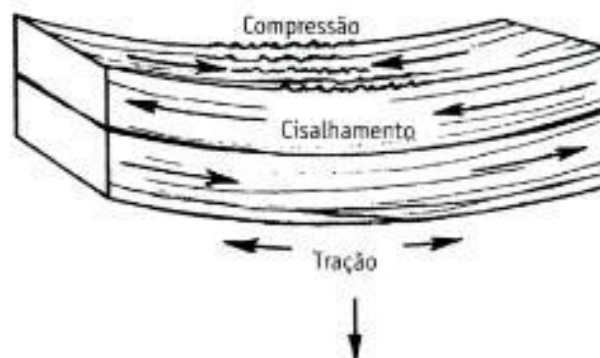


Fonte: ABNT NBR 7190:2013 (Versão de revisão).

2.5 FLEXÃO DA MADEIRA

Quando a madeira é submetida à flexão ocorrem diferentes tipos de esforços na peça. De acordo com Calil Junior, Lahr e Dias (2003), uma peça de madeira com apoios nas extremidades e uma carga central está sujeita a diferentes tensões, como: compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e cisalhamento horizontal. A Figura 8 ilustra as tensões que ocorrem na madeira flexionada.

Figura 8 - Tensões devido a flexão na madeira



Fonte: Ritter (1990).

A ruptura de peças de madeira flexionadas ocorre devido a formação de pequenas falhas de compressão e, logo em seguida, pelo avanço de enrugamentos de compressão visíveis. A

partir deste evento, ocorre a expansão da área comprimida na seção e diminuição da área tracionada, havendo a possibilidade de, ocasionalmente, romper devido a tração (CALIL JUNIOR; LAHR; DIAS, 2003).

De acordo com Almeida et. al. (2013), a madeira utilizada estruturalmente deve ser cuidadosamente classificada e caracterizada de acordo com suas propriedades físicas e mecânicas. Estas precauções devem ocorrer de forma a garantir que a madeira resista às solicitações mecânicas impostas que ocorrem na madeira quando aplicada na construção.

As diferentes propriedades da madeira são dependentes da estrutura anatômica da mesma, o que gera diferentes valores de resistência. Devido à estas variações na estrutura da madeira, os valores de tração, cisalhamento e compressão são diferentes entre si. Os valores que correspondem aos esforços paralelos às fibras e normais as fibras também apresentam divergências entre si (ABNT NBR 7190:1997).

2.5.1 Solicitações normais na flexão simples reta

De acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997 a verificação de segurança de uma peça fletida (submetida a um momento fletor) deve ocorrer conforme a Equação (2) e Equação (3).

$$\sigma_{c0d} = \frac{M_d}{W_c} \leq f_{c0,d} \quad (2)$$

$$\sigma_{t0d} = \frac{M_d}{W_c} \leq f_{t0,d} \quad (3)$$

onde

σ_{c0d} = tensão de cálculo atuante na extremidade mais comprimida da seção transversal em questão;

σ_{t0d} = tensão de cálculo atuante na extremidade mais tracionada da seção transversal em questão;

M_d = Momento fletor atuante de cálculo;

W_c = Módulo de resistência da seção transversal;

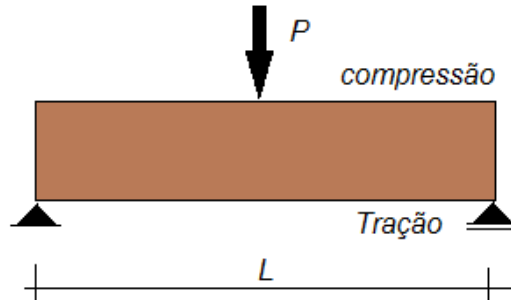
$f_{c0,d}$ = valor de cálculo da resistência à compressão paralela às fibras;

$f_{t0,d}$ = valor de cálculo da resistência à tração paralela às fibras.

De acordo com o projeto de revisão de norma ABNT NBR 7190:2013, o cálculo em peças de MLC deve ocorrer de forma a obter o valor de f_{c0d} e f_{t0d} , correspondentes às seções

comprimidas e tracionadas da viga, respectivamente. A seção referente à compressão da viga corresponde à parte superior e a seção referente à tração, corresponde à parte inferior (Figura 9).

Figura 9 – Viga submetida a flexão para uma carga centrada P



Fonte: Autor.

Para o desenvolvimento de cálculo a seguir, toma-se a Equação (2) como partida para a obtenção de P_{c0} , de forma a estabelecer a Equação (6), correspondente ao valor da força P necessária para provocar a ruptura da fibra superior da viga de MLC por compressão. Para este cálculo do valor da carga de compressão, como também nos casos de tração (equação 7) e cisalhamento (equação 8), considera-se uma viga de MLC biapoiada nas extremidades e com uma carga P aplicada no centro do vão.

$$\sigma_{c0d} = \frac{\frac{P \cdot L}{4}}{\frac{b \cdot (h)^2}{6}} \leq f_{c0,d} \quad (4)$$

$$P_{c0} \leq \frac{4bh^2 f_{c0,d}}{6L} \quad (5)$$

$$P_{c0} \leq \frac{2bh^2 f_{c0,d}}{3L} \quad (6)$$

onde:

b = largura do elemento de MLC (cm);

h = altura do elemento de MLC (cm);

L = distância entre apoios (cm);

$f_{c0,d}$ = resistência de cálculo de compressão das lâminas presentes na quarta parte superior de um elemento de MLC (kN/cm²).

Para a obtenção dos valores de P_{t0} são utilizados os resultados experimentais de resistência à tração das lâminas localizadas na parte inferior da viga. O desenvolvimento de cálculo para a obtenção de P_{t0} segue um roteiro idem ao anterior, porém, alterando-se os valores de compressão pelos valores de tração. A Equação (7), refere-se ao valor de força máxima de tração.

$$P_{t0} \leq \frac{2bh^2 f_{t0,d}}{3L} \quad (7)$$

onde:

$f_{t0,d}$ = média das resistências à tração das lâminas do lote inferior do elemento de MLC.

2.5.2 Solicitação tangencial de cisalhamento longitudinal.

As vigas submetidas à flexão apresentam força cortante, de forma a ocorrer cisalhamento longitudinal na viga. De acordo com a norma ABNT NBR 7190:1997, a condição de segurança em relação a solicitação tangencial é dada através da Equação (8):

$$\tau_d = \frac{3V_d}{2bh} \leq f_{v0,d} \quad (8)$$

onde:

τ_d = tensão máxima de cisalhamento de cálculo;

V_d = esforço cortante;

$f_{v0,d}$ = valor de cálculo da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

O desenvolvimento de cálculo a seguir apresenta a obtenção da Equação (10), a partir de substituições da Equação (8). A partir da Equação (10) é possível encontrar P_{v0} de uma peça de MLC utilizando-se as dimensões da peça de MLC e o valor experimental de resistência ao cisalhamento das lâminas centrais (linha neutra) da mesma.

$$\frac{3}{2bh} \cdot \frac{P_{v0}}{2} \leq f_{v0,m} \quad (9)$$

$$P_{v0} \leq \frac{4bh f_{v0,m}}{3} \quad (10)$$

2.5.3 Determinação das propriedades de interesse para este trabalho segundo a norma ABNT NBR 7190:1997

A caracterização mecânica da madeira deve ocorrer de forma a determinar os valores das propriedades físico-mecânica da mesma. A norma ABNT NBR 7190:1997, apresenta em seu anexo B os métodos de ensaios que devem ser realizados para a devida caracterização da madeira, de maneira a obter diferentes propriedades da madeira, como: umidade, densidade, estabilidade dimensional, compressão, tração, cisalhamento, fendilhamento, flexão e dureza.

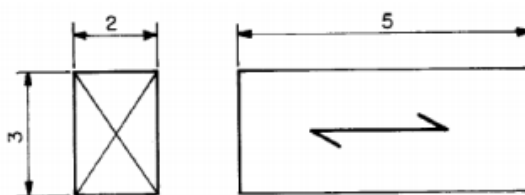
As propriedades apresentadas nos itens seguintes são aquelas que efetivamente foram utilizadas nos cálculos experimentais e analíticos desta pesquisa.

Para a determinação das propriedades anteriormente citadas, deve-se extrair uma amostra aleatória de corpos de prova, a partir de um lote de madeira considerado homogêneo com dimensão inferior a 12 m³.

2.5.3.1 Determinação da umidade

Para a determinação da umidade da madeira devem ser obtidos os valores de massa inicial e massa seca de corpos de prova com seções de 2 cm x 3 cm e comprimento de 5 cm, de acordo com a Figura 10.

Figura 10 - Corpo de prova para obtenção da umidade da madeira.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

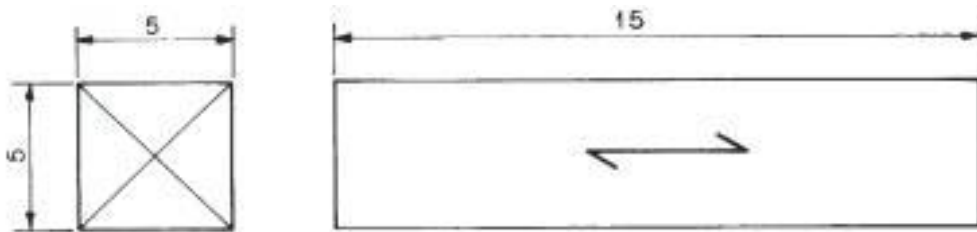
Deve-se obter a massa inicial do corpo de prova (m_i) e, posteriormente, submetê-lo a secagem em estufa, com temperatura inferior a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para a obtenção da massa seca (m_s), deve-se verificar a massa do corpo de prova em intervalos de 6 horas, até que a variação entre duas medidas consecutivas seja inferior ou igual a 0,5%, o que significa que o corpo de prova atingiu o valor correspondente a m_s . A determinação do teor de umidade ocorre a partir da Equação (11), utilizando as massas obtidas nas pesagens.

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (11)$$

2.5.3.2 Determinação da resistência a compressão paralela às fibras.

O ensaio de compressão é realizado a partir de corpos de prova de formato prismático com 15 cm de comprimento e área transversal quadrada de 5 cm x 5 cm (Figura 11). Neste ensaio, determina-se o valor de máxima tensão de compressão que o corpo de prova em questão suporta, até que haja ruptura do mesmo.

Figura 11 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de compressão paralela as fibras.



Fonte: NBR ABNT 7190:1997.

A partir do ensaio de compressão, é possível obter o valor de máxima força de compressão aplicada ($F_{c0,máx}$). A Equação (12) determina o valor da resistência à compressão paralela as fibras.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad (12)$$

onde:

$F_{c0,máx}$ corresponde ao valor máximo de força aplicado durante o ensaio (N);

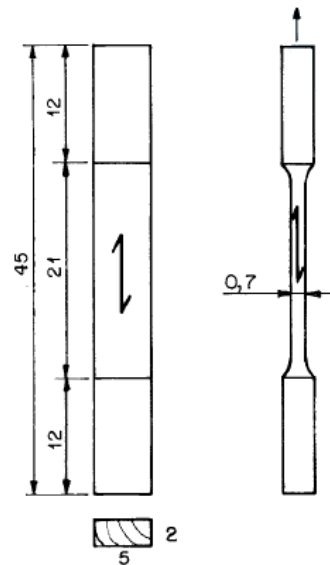
A corresponde a área inicial da seção (m²);

f_{c0} corresponde à resistência à compressão paralela às fibras (MPa).

2.5.3.3 Determinação da resistência à tração paralela às fibras

O ensaio para a determinação da resistência à tração é realizado a partir de corpos de prova de acordo com as dimensões dadas na Figura 12.

Figura 12 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração paralela as fibras.



Fonte: NBR ABNT 7190:1997.

A Equação (13) é utilizada para a obtenção do valor de f_{t0} , que é a maior tensão de tração capaz de atuar no corpo de prova ilustrado na Figura 13, onde o trecho central corresponde a área A e as extremidades apresentam maiores dimensões, de forma a apresentar maior resistência, garantindo a ruptura no trecho central.

$$f_{t0} = \frac{F_{t0,m\acute{a}x}}{A} \quad (13)$$

onde:

$F_{t0,m\acute{a}x}$ = máxima força de tração aplicada (N);

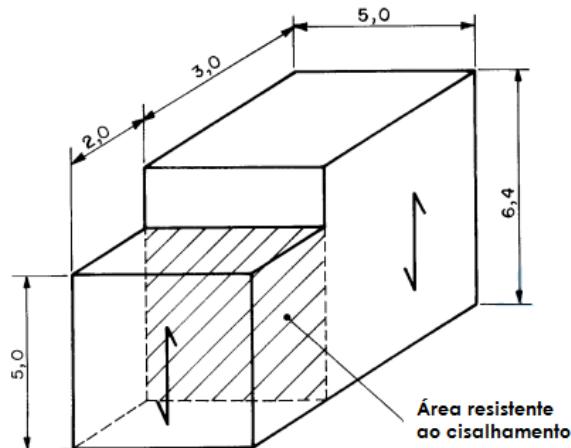
A = área inicial da seção transversal tracionada do trecho central do corpo de prova (m²);

f_{t0} = resistência à tração paralela às fibras (MPa).

2.5.3.4 Determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) deve ser obtida a partir do ensaio mecânico de corpos de prova com as dimensões e área cisalhante especificadas na Figura 13.

Figura 13 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento.



Fonte: ABNT NBR 7190:1997.

A obtenção do valor de f_{v0} deve ocorrer a partir da utilização da Equação (14):

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,m\acute{a}x}}{A_{v0}} \quad (14)$$

onde:

F_{v0} = máxima força de cisalhamento aplicada (N);

A_{v0} = área inicial da seção crítica do corpo de prova (área resistente ao cisalhamento), em um plano paralelo as fibras (m^2);

f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa).

2.5.4 Rigidez experimental (EI) do elemento fletido.

O valor de $(E_M I)_{exp}$ representa a rigidez experimental da viga de MLC e é obtido a partir da Equação (15). Os valores de força (P) e de flecha (δ) utilizados na Equação de EI são obtidos pelo ensaio de flexão simples através da identificação dos valores correspondentes no trecho linear da curva P x δ (força P x flecha).

A Equação (15) refere-se ao valor de (EI) obtido através do valor da flecha obtida para um elemento fletido com carga centrada no meio do vão.

$$(E_M I)_{exp} = \frac{P L^3}{48 \delta} \quad (15)$$

sendo:

P = Força P presente no trecho linear da curva $P \times \delta$;

δ = Flecha correspondente à força P, centrada no meio do vão;

L = distância entre apoios.

2.6 CLASSIFICAÇÃO ESTRUTURAL DA MADEIRA

A versão da norma ABNT NBR 7190:1997, não apresenta recomendações específicas para a classificação visual da madeira, indicando somente o coeficiente k_{mod3} igual a 1 para madeira classificada (mecânica e visualmente) e o valor de 0,8 para madeira de segunda categoria, se somente uma das classificações anteriores for realizada.

2.6.1 Classificação mecânica

O projeto de norma ABNT NBR PN02:126.10-001 especifica vários métodos de classificação mecânica não destrutiva da madeira, e dentre eles podem ser citados: *stress wave*, ultrassom, vibração transversal, flexão estática e classificação mecânica por tensões. A partir desses métodos, obtém-se basicamente o módulo de elasticidade da madeira.

2.6.2 Classificação visual

2.6.2.1 Classificação visual de coníferas

O projeto de norma ABNT NBR PN02:126.10-001 determina os critérios para a classificação visual da madeira. Esta classificação se baseia na observação das faces, bordas laterais e extremidades das peças de madeira, procurando identificar o tipo e o local dos defeitos presentes nas mesmas. São avaliados os defeitos próprios da madeira, tais como: número de nós em uma determinada face, inclinação das fibras da madeira, densidade dos anéis de crescimento, além de defeitos de secagem, como: empenamentos, rachas e fendas.

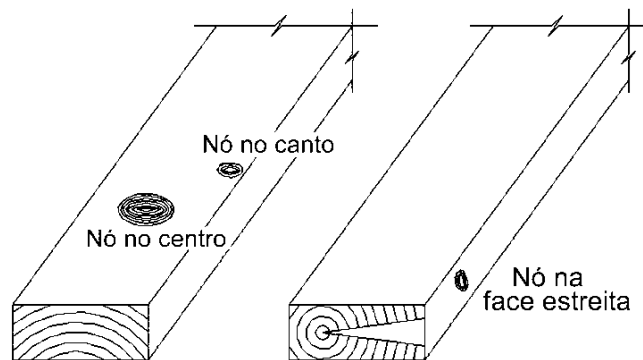
Nos itens seguintes estão apresentadas somente algumas das recomendações de classificação visual, ou seja, presença de nós, empenamentos, rachas, fendas e densidade dos anéis. A apresentação destes itens procurou ilustrar o que a norma preconiza sem se preocupar em esgotar o assunto. Maiores informações podem ser encontradas na referida norma.

As classificações possíveis de acordo com a presença de defeitos são: Classe Estrutural Especial (SE), Classe Estrutural N°1 (S1), Classe Estrutural N°2 (S2) e Classe Estrutural N°3 (S3). A classificação em relação à densidade é: Madeira Densa (D) e Madeira Não-Densa (ND).

2.6.2.2 Nós

Os nós da madeira devem ser discernidos conforme a posição em que se localizam na peça de madeira. A Figura 14 permite a visualização das diferentes posições dos nós, sendo: Nó no centro e no canto da face e nó na face estreita. Esta avaliação ocorre de forma a analisar a proporção de área que os nós ocupam na seção transversal da peça (K_A da Tabela 2), conforme Tabela 1.

Figura 14 - Localização dos nós da madeira



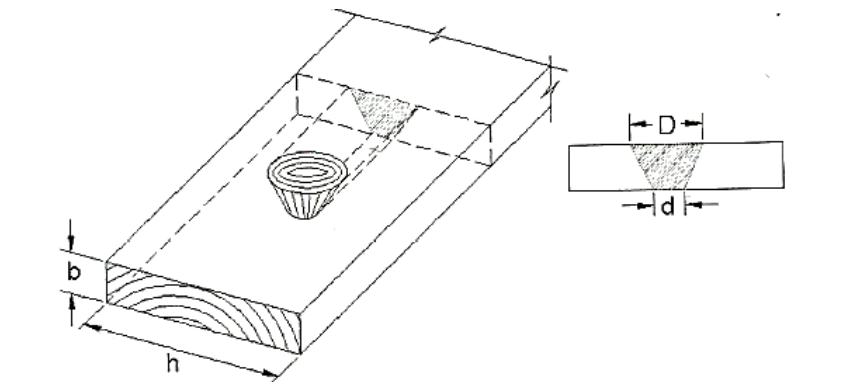
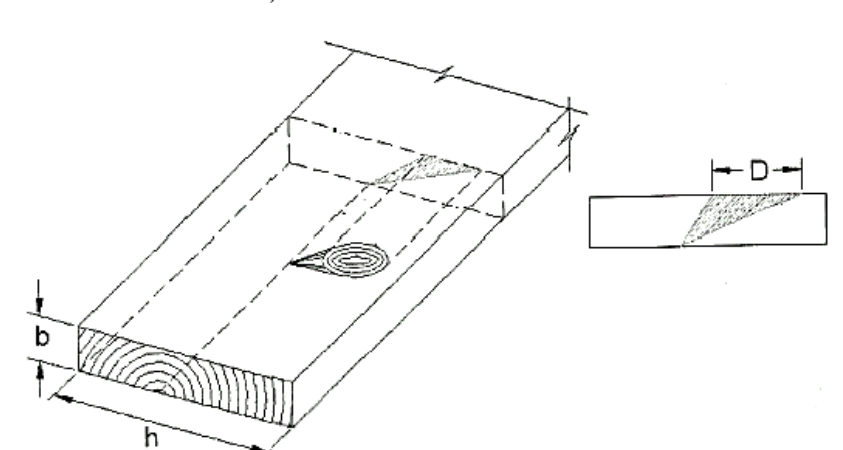
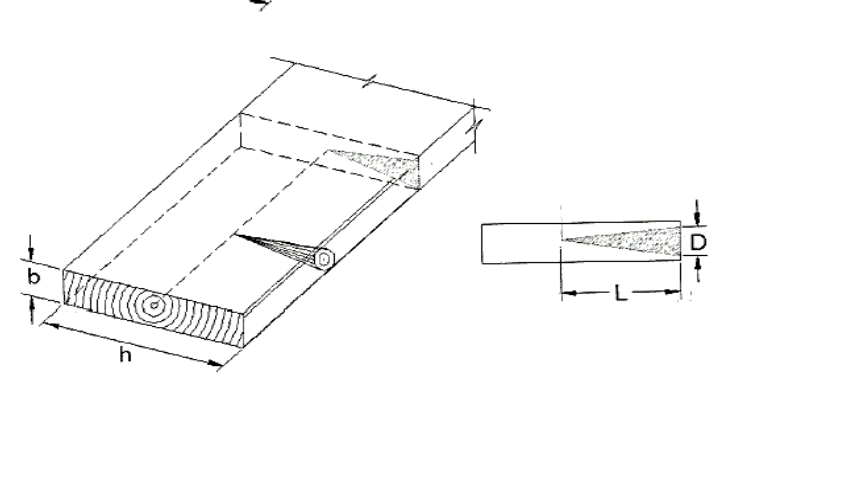
Fonte: Projeto de norma: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1.

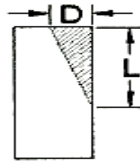
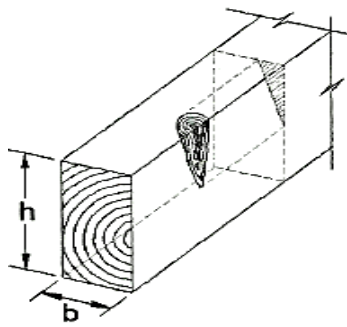
Tabela 1 – Valores limites de valor de K_A para classificação visual.

Posição dos nós	SE	S1	S2	S3
Face e canto do lado	20%	25%	33%	50%
Centro da face	35%	45%	50%	75%

Fonte: Projeto de norma: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1.

Tabela 2 - Determinação de K_A

	$K_A = \frac{(D+d)}{(2 \cdot h)} \text{ ou}$ $K_A = \frac{d_{\text{médio}}}{h}$
	$K_A = \frac{d_{\text{médio}}}{h}$
	$K_A = \frac{(D \cdot L)}{2(b \cdot h)}$ <p>Quando:</p> <p>a) $L = h \rightarrow K_A = \frac{D}{(2 \cdot b)}$</p> <p>b) $L = \frac{h}{2} \rightarrow K_A = \frac{D}{(4 \cdot b)}$</p> <p>c) $D = b \rightarrow K_A = \frac{a}{(2 \cdot h)}$</p> <p>a = medida da projeção do nó na face.</p>



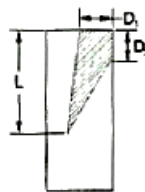
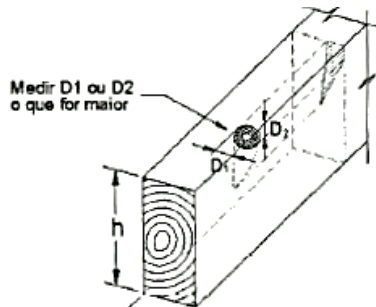
$$K_A = \frac{(D \cdot L)}{2(b \cdot h)}$$

Quando:

a) $L = h \rightarrow K_A = \frac{D}{(2 \cdot b)}$

b) $L = \frac{h}{2} \rightarrow K_A = \frac{D}{(4 \cdot b)}$

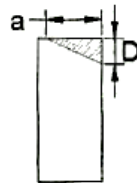
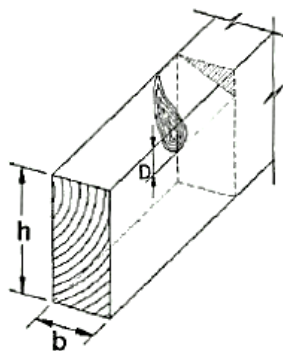
c) $D = b \rightarrow K_A = \frac{L}{(2 \cdot h)}$



$$K_A \approx \frac{D_1 \cdot L}{2 \cdot (b \cdot h)}$$

ou

$$K_A \approx \frac{D_2 \cdot L}{2 \cdot (b \cdot h)}$$



$$K_A = \frac{(D \cdot a)}{2(b \cdot h)}$$

Quando:

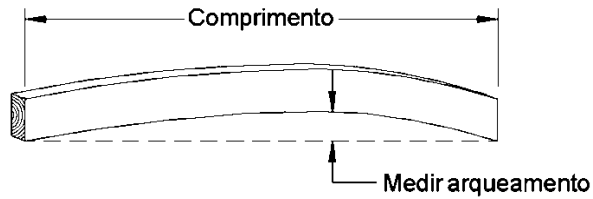
a) $a = b \rightarrow K_A = \frac{D}{(2 \cdot h)}$

Fonte: Projeto de norma: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1.

2.6.2.3 Empenamento

O empenamento da madeira diz respeito às deformações das peças, de forma a ocorrer alterações no formato geométrico inicial da peça. O arqueamento é um tipo comum de empenamento (Figura 15). A Tabela 3 apresenta as limitações impostas para as dimensões possíveis.

Figura 15 – Arqueamento



Fonte: Projeto de norma: ABNT/NBR PN 02:126.10-0001-1.

Tabela 3- Arqueamento máximo de acordo com cada classe.

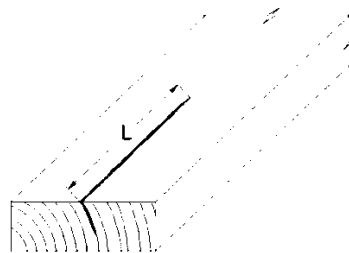
Comprimento (m)	Classe	Arqueamento máx. permitido
		Dimensão da face (mm)
		50
2	S1	5
	S2	7
	S3	11

Fonte: Adaptado de Projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1.

2.6.2.4 Rachas e fendas

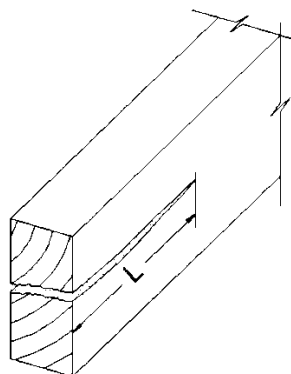
A medição de rachas e fendas é realizada através da verificação do comprimento do defeito como ilustra a Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 – Maneira de medir uma racha anelar.



Fonte: Projeto de norma: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1.

Figura 17 - Maneira de medir uma fenda que atravessa a espessura da peça.



Fonte: Projeto de norma: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1.

As limitações impostas pelos defeitos de rachas e fendas de acordo com cada classe estão especificadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Limitações para rachas e fendas.

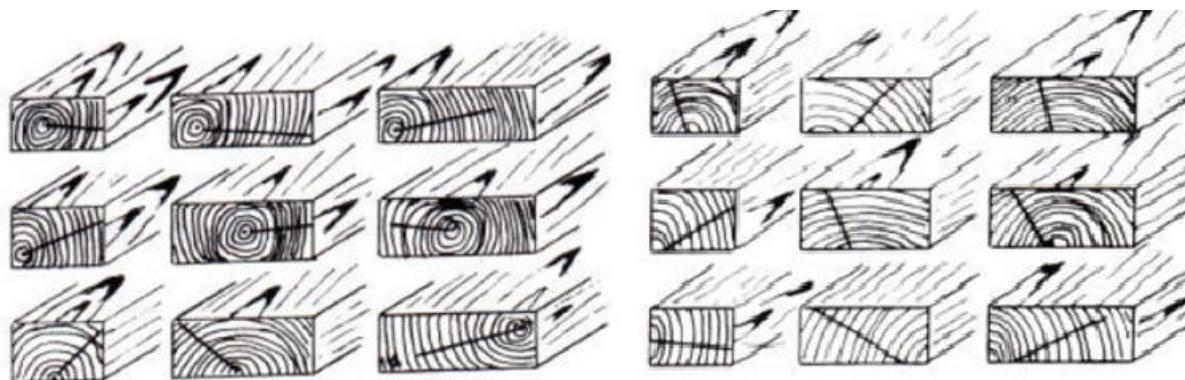
Defeitos	Tipo	SE	S1	S2	S3
Racha	Atravessa a peça em espessura	igual à fenda	igual à fenda	igual à fenda	igual à fenda
	Superficial	2 vezes a largura	2 vezes a largura	3 vezes a largura	sem limitações
Fenda		1 vez a largura	1 vez a largura	1,5 vez a largura	1/6 do comprimento

Fonte: Projeto de norma: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1.

2.6.2.5 Densidade dos anéis de crescimento

A determinação da densidade dos anéis de crescimento da madeira ocorre através da contagem dos anéis de crescimento que estão presentes em 2,5 cm em uma linha radial representativa. A Figura 18 especifica qual é a linha radial representativa para cada caso de corte de peça, ou seja, quais anéis devem ser considerados na contagem.

Figura 18 - Linha radial representativa em peças com e sem medula.



Fonte: Projeto de norma: ABNT PN 02:126.10-0001-1.

A Tabela 5 apresenta as classes de densidade, definidas de acordo com a quantidade de anéis de crescimento presentes na linha radial representativa.

Tabela 5 - Classificação de acordo com a densidade de anéis de crescimento em coníferas.

Classe	Densidade dos anéis (número de anéis/polegada)	Proporção de madeira de inverno e anel de crescimento
Densa (D)	≥ 6	$> 1/3$
	≥ 4	$> 1/2$
Não-Densa (ND)	≥ 4	$> 1/7$

Fonte: ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1.

2.6.3 Classificação visual simplificada para a madeira

Além das recomendações de classificação visual apresentadas anteriormente para coníferas, existe também no projeto de norma ABNT NBR PN 02:126.10-0001-1, uma simplificação do procedimento de classificação da madeira para coníferas e folhosas. Esta classificação se baseia em defeitos próprios e também de secagem da madeira conforme especificado nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Classificação proposta para coníferas segundo projeto de norma ABNT NBR PN02:126.10-001.

Defeito	Unidade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	-	Não se admite		
Densidade	Kg/m ³	600	500	400
MOE	MPa	>14000	>10000	>6000
Nós	mm/mm	1/4	1/2	2/3
Inclinação das fibras	1:12	1:9	1:6	1:3
Fissuras não passantes	m	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0 m e nem $\frac{1}{4}$ da comprimento da peça		
Fissuras passantes	m	Somente se permitem as fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior do que a largura da peça		
Encurvamento e arqueamento	mm	Menor que 8 mm para cada 1 m de comprimento		
Torcimento	mm/m	Menor que 1 mm para cada 25 mm de comprimento		
Encanoamento	mm	Sem restrições		
Esmoado	mm/mm	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça Sem restrições para o comprimento		
Ataques biológicos	-	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão Se admitem zonas atacadas por fungos cromógenos Se admitem orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm.		
Madeiras de reação	mm/mm	Menor ou igual a 1/5		
Outros	-	Danos mecânicos, presença de kino e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar		

Fonte: ABNT PN 02:126.10-0001-1.

Tabela 7 – Classificação proposta para folhosas segundo projeto de norma ABNT NBR PN02:126.10-001.

Defeito	Unidade	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Medula	-	Não se admite		
Densidade	Kg/m ³	700	600	500
MOE	MPa	>20000	>15000	>10000
Nós	mm/mm	1/5	1/3	1/2
Inclinação das fibras	1:12	1:12	1:9	1:6
Fissuras não passantes	m	O comprimento das fissuras não deve ser maior que 1,0 m e nem $\frac{1}{4}$ da largura da peça		
Fissuras passantes	m	Somente se permitem as fissuras passantes nos extremos e o comprimento não deve ser maior do que a largura da peça		
Encurvamento e arqueamento	mm	Menor que 8		
Torcimento	mm	Menor que 1 mm para cada 25 mm de comprimento		
Encanoamento	mm	Sem restrições		
Esmoado	mm/mm	Transversalmente menor que $\frac{1}{4}$ da espessura ou largura da peça Sem restrições para o comprimento		
Ataques biológicos	-	Não se admitem zonas atacadas por fungos causadores de podridão Se admitem zonas atacadas por fungos cromógenos Se admitem orifícios causados por insetos com diâmetro inferior a 2 mm.		
Madeiras de reação	mm/mm	Menor ou igual a 1/5		
Outros	-	Danos mecânicos, presença de kino e outros defeitos se limitam por analogia com alguma característica similar		

Fonte: ABNT PN 02:126.10-0001-1.

2.6.4 Determinação da classe de resistência da madeira

Segundo a versão atual da norma de madeira ABNT NBR 7190:1997, ANEXO B, o valor característico e conseqüente determinação da classe de resistência da madeira para um conjunto de corpo de provas analisado mecanicamente a partir de ensaios experimentais pode ser feito através do estimador centrado apresentado de acordo com a Equação (16).

$$f_k = \left(2 \cdot \frac{f_1 + f_2 + \dots + f_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2}-1} - \frac{f_n}{2} \right) \cdot 1,1 \quad (16)$$

Os resultados devem ser organizados em ordem crescente, desprezando-se o maior valor caso o número de corpos de prova seja ímpar. Não se deve tomar para f_k valor menor que f_1 ou a 0,7 do valor médio.

Na determinação da classe de resistência da madeira, utiliza-se o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras.

2.6.5 Simulação numérica

Segundo Molina (2008), atualmente, estudos de caráter numérico têm ocorrido com maior frequência. Dentre as ferramentas existentes para análise numérica destacam-se softwares específicos como o SAP2000, ANSYS, ABAQUS, ADYNA entre outros. Esses *softwares* são tem como base o Método dos Elementos Finitos. Em particular, esses softwares possibilitam reproduzir numericamente o comportamento dos elementos estruturais e até mesmo das estruturas evitando-se custos inerentes à realização de ensaios experimentais. A simulação numérica permite a análise detalhada dos aspectos de interesse como, por exemplo, a concentração de tensões nas regiões próximas nas regiões mais solicitadas do elemento analisado, o que não é possível de se observar claramente nos ensaios experimentais. A maioria das simulações numéricas observadas na literatura envolvendo as estruturas de madeira são efetuadas a partir da consideração de uma análise linear elástica. Neste caso, os resultados são validos na medida em que as deformações plásticas dos materiais são pequenas.

2.7 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da análise da revisão bibliográfica aqui apresentada, observou-se a proposição na versão de revisão da ABNT NBR 7190, de métodos de avaliação mecânica e visual da madeira, os quais não existem na versão atual da ABNT NBR 7190:1997. A norma internacional ASTM D245 propõe somente critérios de classificação visual para madeiras de conífera. O método proposto no projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-1, recomendado pela ABNT NBR 7190:2013, propõe critérios para a avaliação visual para madeiras de coníferas como também de folhosas.

O projeto de norma ABNT PN 02:126.10-0001-1 recomenda ainda ensaios mecânicos para a classificação não-destrutiva da madeira, os quais não são recomendados na versão atual da ABNT NBR 7190:1997.

A versão atual da norma de madeiras ABNT NBR 7190:1997 não apresenta recomendações para a análise da rigidez EI de elementos de madeira laminada colada. A versão de revisão desta norma (2013) propõe a utilização de uma equação analítica, que tem como base a classificação prévia das lâminas de madeira para determinação do módulo de elasticidade em faixas específicas da seção transversal, ou seja, na quarta parte mais externa e na metade central do elemento analisado.

Observou-se, ainda a necessidade de desenvolvimento de estudos numéricos para avaliação do comportamento de elementos de MLC, tendo em vista os poucos trabalhos encontrados na literatura. Além disso, esses poucos trabalhos encontrados têm como base uma análise linear para a avaliação dos elementos.

Existe a necessidade de avaliação (teórica, numérica e experimental) do comportamento de elementos de MLC com base na versão de revisão da ABNT NBR 7190, considerando-se cargas de serviço e cargas últimas, para a avaliação da resposta do modelo proposto na norma.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os materiais e a metodologia referentes aos ensaios experimentais de elementos de MLC sujeitos à flexão e os métodos utilizados para a análise teórica dos resultados. As dimensões dos corpos de prova utilizadas nessa pesquisa foram definidas em função da disponibilidade de equipamentos e espaço físico para ensaios disponíveis no Laboratório de Propriedades dos Materiais da Unesp de Itapeva. No entanto, as dimensões dos corpos de prova neste caso não inviabilizam a análise dos elementos. Vale mencionar também que a atual versão de revisão da norma brasileira de madeiras ABNT NBR 7190:2013, está definindo projeto de norma CEE-126 PN 02:126.10-0001-5: Madeira laminada colada estrutural: métodos de ensaio, a ser futuramente incorporada às recomendações da referida norma brasileira.

3.1 MATERIAIS

Foram utilizadas duas espécies de madeira de reflorestamento, sendo: pinus C30 e eucalipto C40. As classes de resistência foram determinadas segundo as recomendações da norma ABNT NBR 7190:1997. Para a colagem das lâminas de madeira foi utilizado o adesivo resorcinol formol (Cascophen RS-216M).

Para a condução dos ensaios foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC com capacidade para 300 kN.

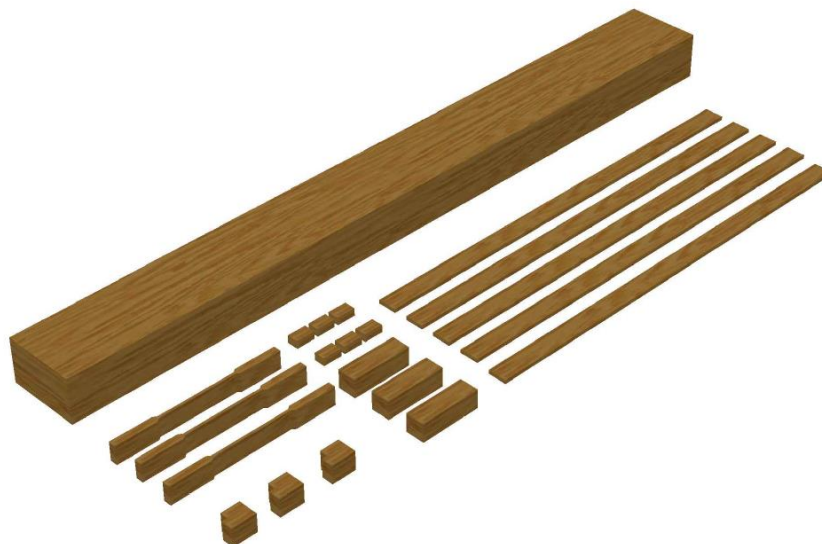
3.2 PRODUÇÃO DOS ELEMENTOS DE MLC

Foram usinadas sete toras de pinus e oito toras de eucalipto de maneira a obter lâminas com dimensões de 50mm de largura, 15mm de espessura e 1500mm de comprimento.

A Figura 19 contém uma representação ilustrativa dos corpos de prova retirados das toras de madeira utilizadas para este estudo. Para cada tora, foram retirados corpos de prova para caracterização da madeira, sendo: 6 corpos de prova para determinação do teor de umidade, 3 corpos de prova para realização dos ensaios de compressão, 3 corpos de prova para realização dos ensaios de tração e 3 corpos de prova para realização dos ensaios de compressão cisalhamento. Foi retirado também o maior número possível de lâminas de madeira para

produção dos elementos de MLC. Os valores obtidos através dos ensaios de caracterização foram atribuídos às lâminas provenientes da mesma tora de madeira.

Figura 19 – Ilustração dos corpos de prova retirados das toras de madeira.



Fonte: Autor.

3.2.1 Umidade

Os corpos de prova e lâminas passaram pelo processo de secagem de modo a obter umidade de $12\% \pm 1$.

A umidade das lâminas foi calculada a partir do corpo de prova de umidade de acordo com o anexo B da ABNT NBR 7190:1997. Foi obtida a massa úmida e a massa seca (0%) do corpo de prova e a partir da massa foi calculado o teor de umidade a partir da equação (11), citada anteriormente:

3.2.2 Classificação mecânica

Para obtenção do módulo de elasticidade das lâminas, as mesmas foram ensaiadas na máquina universal de ensaios EMIC (Figura 20). Nos ensaios de flexão foi estabelecida a carga fixa de serviço igual a 600 kN (dentro do trecho linear da curva tensão x deformação) e as lâminas foram ensaiadas de maneira não destrutiva por ensaio mecânico de flexão estática para a obtenção do valor da flecha no meio do vão. O valor do módulo de elasticidade neste caso foi obtido a partir do rearranjo da Equação (15), resultando na Equação (17).

$$(E_M) = \frac{P L^3}{48 \delta I} \quad (17)$$

sendo:

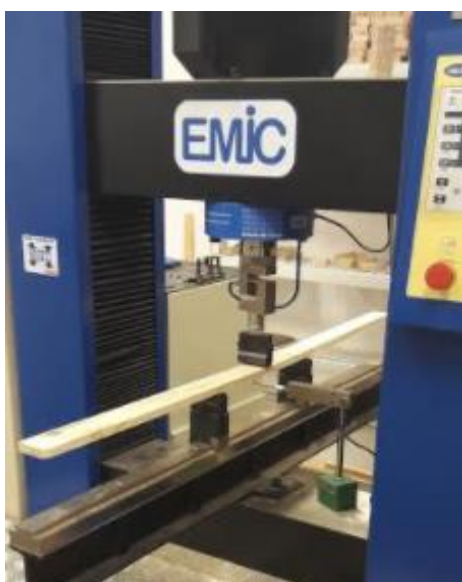
P = Força P presente no trecho linear da curva $P \times \delta$;

δ = Flecha correspondente à força P;

L = distância entre apoios

I = Momento de inércia.

Figura 20 - Ensaio para obtenção de E_M das lâminas de pinus e de eucalipto.



a) Pinus



b) Eucalipto

Fonte: Autor.

3.2.3 Classificação visual

As lâminas foram classificadas visualmente de acordo com o projeto de norma ABNT NBR PN02:126.10-001 avaliando-se presença nós, densidade dos anéis, empenamento, rachas e fendas.

3.2.4 Caracterização das lâminas

Para a caracterização das lâminas de madeira dos elementos fletidos foram realizados os ensaios em corpos de prova retirados do mesmo lote de madeira que deu origem as lâminas. Foram realizados, neste caso, corpos de prova para os ensaios de compressão paralela às fibras,

tração paralela às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, além da determinação do teor de umidade e densidade da madeira.

3.2.5 Prensagem e colagem das vigas

Foi utilizado o adesivo Cascophen RS-216M com catalisador em pó. De acordo com Cunha (2007), o cascophen RD—216M é um adesivo à base de resorcinol formol, em solução álcool e água.

Para colagem das lâminas foi utilizada uma proporção de 10:2 de adesivo/catalisador. A colagem foi feita com linha dupla de adesivo, ou seja, houve aplicação em ambas as superfícies da lâmina sendo cada uma das vigas composta por 5 lâminas. Como a superfície apresentou área de $0,0575\text{m}^2$, para a gramatura de 200g/m^2 , foram utilizados $11,5\text{g}$ de adesivo para cada linha de cola e $2,3\text{g}$ de catalisador. A Figura 21 ilustra a aplicação de adesivo com pincel, para a produção dos corpos de prova.

Figura 21 – Aplicação de adesivo com utilização de pincel.



a) Pinus



b) Eucalipto

Fonte: Autor.

A prensagem da viga foi realizada através de torquímetro e sargentos (Figura 22). Para atingir a pressão de 1 MPa , foi utilizado o torque de 6 N.m , para madeiras de conífera. Para madeiras de folhosa, foi utilizado o torque de 8 N.m de forma a atingir a pressão de $1,2\text{ MPa}$. Foram utilizados 8 sargentos por viga. A pressão de colagem utilizada, neste caso, não provocou o esmagamento da madeira por compressão normal às fibras. O valor mínimo recomendado

pela versão de revisão da norma de madeira ABNT NBR 7190:2013, para madeiras com densidade menor ou igual a $0,5 \text{ g/cm}^3$ é de 0,7 MPa e 1,2 MPa para madeiras de densidade superior a $0,5 \text{ g/cm}^3$.

Figura 22 – Aplicação de pressão através de torquímetro e sargentos.



Fonte: Autor.

Para a cura completa do adesivo, o processo de prensagem durou 72 horas para cada viga. A Figura 23 ilustra a prensagem das vigas.

Figura 23 – Colagem e prensagem das lâminas.



a) Pinus



b) Eucalipto

Fonte: Autor

3.3 ENSAIO DE FLEXÃO

Os elementos de MLC foram confeccionados mantendo a relação $L/h > 20$ visando eliminar o efeito do cisalhamento na flecha no meio do vão. As dimensões do elemento foram também definidas em função das dimensões da máquina de ensaios. Para tanto, as dimensões dos elementos de MLC utilizados, neste caso, foram 5 cm x 5 cm x 115cm e a distância entre apoios foi de 105 cm. Posteriormente, foi realizado o ensaio de flexão das elementos (vigas) de MLC, seguindo recomendação da norma ABNT NBR 7190:1997. O carregamento consistiu em uma carga concentrada no meio do vão, com dois ciclos de carga e descarga.

Para os ensaios com os elementos de pinus, foi utilizado um transdutor de deslocamento para registro registros de deslocamento (flecha) de cada ponto do diagrama de carregamento. O transdutor foi retirado ao atingir 70% da carga estimada. Essa estratégia de retirada do transdutor com 70% da carga foi utilizada para não danificar o equipamento.

Para os ensaios com os elementos de eucalipto, não foi utilizado o transdutor de deslocamento, pois foi considerado apenas o deslocamento registrado pela própria EMIC.

Os detalhes do ensaio de flexão dos elementos de MLC na EMIC estão apresentados na Figura 24.

Figura 24 – Ensaio de flexão simples em viga de MLC.



a) Pinus



b) Eucalipto

Fonte: Autor.

3.4 ANÁLISE TEORICA

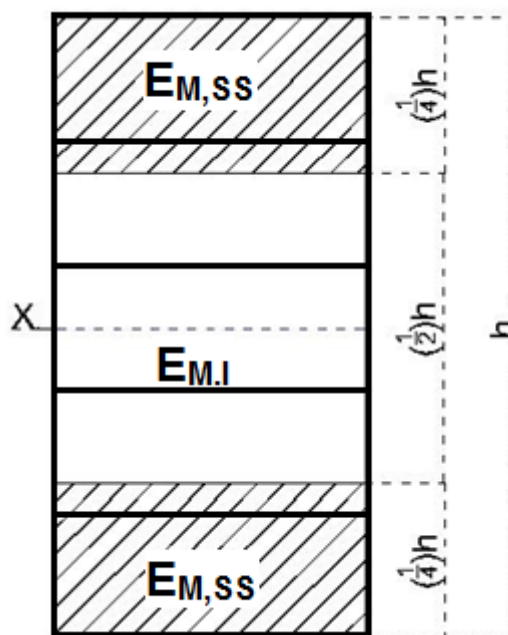
A proposta de norma ABNT NBR 7190 de 2013 propõe o cálculo de rigidez à flexão a partir da Equação (1), já apresentada anteriormente, de forma a divergir o lote de lâminas das quartas partes mais afastadas da linha neutra ($E_{M,ss}$) e o lote de lâminas da metade central da seção ($E_{M,i}$).

$$(EI)_{\text{teórico}} = [2 \cdot E_{m,s} \cdot I_{(1/4)} + E_{m,i} \cdot I_{(1/2)}] \quad (1)$$

A obtenção dos valores dos módulos de elasticidade $E_{M,ss}$ e $E_{M,i}$ foram obtidos a partir dos ensaios de flexão estática para classificação não-destrutiva das lâminas. Para a obtenção de $E_{M,ss}$ foram utilizados os valores de E_M das lâminas de 1 e 5 de cada elemento, ou seja, as lâminas pertencentes aos lotes superior e inferior da viga. O valor de $E_{M,i}$ foi obtido através da média entre os valores de E_M das lâminas 2,3 e 4, ou seja, pertencentes a metade central da seção transversal.

A Figura 25 ilustra a combinação das lâminas para diferentes módulos de elasticidade na flexão e indica quais são os lotes de madeira admitidos a partir da combinação dos valores das propriedades das lâminas na Equação (1).

Figura 25 – Combinação de lâminas com diferentes módulos de elasticidade na flexão.



Fonte: Modificado da ABNT NBR 7190:2013 (Versão de revisão).

Para a obtenção do valor do momento de inércia da quarta parte mais afastada em relação a linha neutra (x), foi utilizado o desenvolvimento de cálculo a seguir, resultando na Equação (18).

$$I_{(1/4)} = \frac{b \left(\frac{1}{4} h \right)^3}{12} + \left[\frac{h/2}{2} + \frac{h/4}{2} \right]^2 \times \left[b \cdot \frac{h}{4} \right]$$

$$I_{(1/4)} = \frac{b}{12} \left(\frac{h^3}{64} \right) + \left[\frac{h}{2} \cdot \frac{1}{2} + \frac{h}{4} \cdot \frac{1}{2} \right]^2 \times \left[b \cdot \frac{h}{4} \right]$$

$$I_{(1/4)} = \frac{b h^3}{768} + \left[\frac{h}{4} + \frac{h}{8} \right]^2 \times \left[b \cdot \frac{h}{4} \right]$$

$$I_{(1/4)} = \frac{b h^3}{768} + \left[\frac{144 h^2}{32} \right]^2 \times \left[b \cdot \frac{h}{4} \right]$$

$$I_{(1/4)} = \frac{b h^3}{768} + \left[\frac{12h}{32} \right]^2 \times \left[b \cdot \frac{h}{4} \right]$$

$$I_{(1/4)} = \frac{b h^3}{768} + \left[\frac{144 h^2}{1024} \right] \times \left[b \cdot \frac{h}{4} \right]$$

$$I_{(1/4)} = \frac{b h^3}{768} + \frac{36bh^3}{1024}$$

$$I_{(1/4)} = \frac{1024(b h)^3 + 768 (36bh^3)}{768 \times 1024}$$

$$I_{(1/4)} = \frac{1024 bh^3 + 27648 bh^3}{786432}$$

$$I_{(1/4)} = \frac{28672}{786432} \times bh^3$$

$$I_{(1/4)} = 3,646 \cdot 10^{-2} bh^3 \quad (18)$$

O valor correspondente ao momento de inércia da metade central da seção em relação à linha neutra foi obtido através do desenvolvimento de cálculo a seguir, resultando na Equação (19).

$$I_{(1/2)} = \frac{b(1/2 h)^3}{12}$$

$$I_{(1/2)} = \frac{b}{12} \cdot \frac{h^3}{8}$$

$$I_{(1/2)} = \frac{bh^3}{96} \quad (19)$$

Os valores de b e h de cada elemento de MLC ensaiado foram substituídos nas Equações (18) e (19), para a obtenção de $(EI)_{\text{teórico}}$ a partir da Equação (1).

3.5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

A análise experimental dos elementos de MLC foi feita a partir da análise da rigidez $(EI)_{\text{exp}}$ e, posterior avaliação dos modos de ruptura, obtidos após os ensaios de flexão. Os modos de ruptura dos elementos de MLC (por esmagamento na compressão da fibra superior, tração na fibra inferior ou por cisalhamento na linha neutra) foram verificados com base nas recomendações para peças maciças de madeira, submetidas à flexão retas, de acordo com a ABNT NBR 7190:1997. Foram verificadas, neste caso, as tensões normais (σ), de compressão (σ_{c0}) e tração (σ_{t0}) como também às tensões tangenciais (τ_{v0}) de acordo com os itens seguintes 3.5.1 e 3.5.2. Neste caso, foi definido o valor da força P , que provocou a ruptura no elemento de MLC para determinada solicitação (compressão, tração ou cisalhamento na linha neutra). Assim, para a verificação da resistência à compressão, tração e cisalhamento, foram obtidos os respectivos valores de força P_{c0} , P_{t0} e P_{v0} para cada um dos elementos de MLC.

Para a determinação da rigidez $(EI)_{\text{experimental}}$, foram determinados experimentalmente a partir dos ensaios de flexão dos elementos de MLC, os valores de força (P), que provocaram as flechas (δ) iguais a $L/100$, $L/200$ e $L/300$, garantindo, assim, a análise do elemento de MLC dentro do trecho linear da curva força (P) x flecha (δ).

Os dados de força (P), correspondentes a flecha $L/100$, $L/200$ e $L/300$ foram aplicados na Equação (15), citada anteriormente e, posteriormente, foi calculada a média entre os 3 valores de $(EI)_{\text{exp,m}}$ para cada uma dessas flechas, de modo a tornar o valor obtido mais representativo. Para os corpos de prova que não foi possível obter os valores de $L/100$, $L/200$ ou $L/300$ admitiu-se outros valores pertencentes ao trecho linear. Foi admitido o valor de 105 cm para a distância entre apoios.

3.5.1 Tensões normais (σ)

Para a obtenção dos valores de P_{c0} , foram utilizados os valores dimensionais da peça e o resultado experimental de resistência à compressão da lâmina localizada no lote superior da viga. O valor de P_{c0} foi obtido a partir da Equação (6).

Para a obtenção dos valores de P_{t0} foram utilizados os valores dimensionais da peça de MLC e o resultado experimental de resistência à tração da lâmina localizada na quarta parte inferior da viga. O valor de P_{t0} foi obtido através da Equação (7).

3.5.2 Tensões de cisalhamento (τ)

A obtenção de P_{v0} foi dada a partir do cálculo através da Equação (8), utilizando-se as dimensões da peça de MLC e o valor experimental de resistência ao cisalhamento das lâminas centrais da mesma.

3.6 ANÁLISE NUMÉRICA

Neste item são propostos dois modelos numéricos, tridimensionais, que utilizam o software ANSYS, versão Student que tem como base o Método dos Elementos Finitos (MEF), para simulação do comportamento dos elementos de MLC estudados na análise experimental. A opção pela utilização do ANSYS, versão Student, se deu pelo fato de que as ferramentas disponibilizadas pelo referido software permitem a análise dos modelos em regime de não linearidade física e também geométrica. Como resultado das modelagens propostas, avaliou-se os valores de rigidez EI dos elementos de MLC confeccionados com madeiras de pinus e eucalipto para posterior comparação com os resultados teóricos e experimentais. Os modelos propostos permitiram ainda, em caráter complementar, a avaliação dos níveis de tensões nas

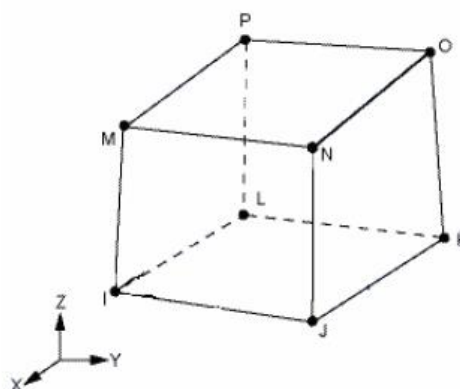
regiões de maior interesse dos elementos flexionados, para uma avaliação mais detalhada dos modos de ruptura obtidos na análise experimental.

Na sequência estão apresentados os aspectos gerais da estratégia de modelagem desenvolvida, juntamente com os comentários mais relevantes.

3.6.1 Elemento Finito Utilizado

Os modelos numéricos desenvolvidos foram elaborados com base em elementos pré-definidos, disponibilizados na biblioteca interna do ANSYS. A escolha do elemento foi feita a partir da consideração de sua representatividade perante o comportamento a ser simulado. Na discretização das peças de madeira utilizou-se o elemento *solid45* (Figura 26), que consiste num elemento hexaédrico, com oito nós, tendo cada nó três graus de liberdade (translações segundo os eixos x, y e z), e permite ainda a consideração de efeitos importantes como, por exemplo, plasticidade e ortotropia para as lamelas de madeiras consideradas na confecção das vigas.

Figura 26 – Elemento finito solid45.



Fonte: Documentação do ANSYS.

3.6.2 Malha de elementos finitos

As malhas dos elementos simulados foram geradas e discretizadas no *software* ANSYS. Tendo-se em vista a dificuldade de construção e de análise dos modelos numéricos, foram criados scripts, contendo as sequências de comandos, os quais foram executados pelo ANSYS, permitindo-se assim a geração e análise automática dos modelos. Os referidos scripts estão apresentados nos apêndices C e D, no final deste trabalho.

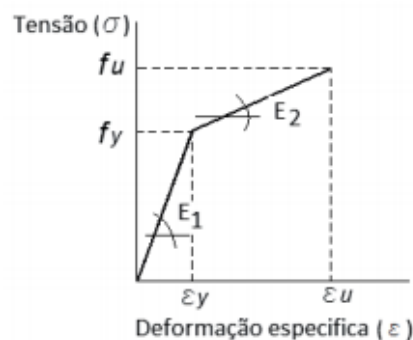
Os comandos necessários para a análise dos modelos numéricos no ANSYS foram escritos em função das propriedades elásticas e plásticas dos materiais, do comportamento das curvas tensão versus deformação experimentais, entre outros, os quais variam de um modelo para outro. As malhas dos modelos numéricos foram analisadas a partir de diferentes níveis de refinamento, até que os resultados conduzissem a respostas satisfatórias em termos de deslocamentos e de tensões. O refinamento das malhas foi definido em cada uma das direções x, y e z (eixos de coordenadas do ANSYS). Assim cada elemento de viga teve as seguintes divisões para a malha: na direção x a base da seção foi dividida em 5 elementos, na direção y a altura foi dividida em 15 elementos e ao longo do comprimento z utilizou-se 105 divisões, totalizando 7875 elementos finitos em cada modelo estudado.

3.6.3 Relação constitutiva para as madeiras

De acordo com Molina (2017), na modelagem da madeira, admitiu-se um comportamento ortotrópico (diferentes propriedades físicas para cada uma das três direções consideradas), com a utilização do critério de resistência de Hill, associado ao encruamento isotrópico. O critério de Hill é uma extensão do critério de von Mises (critério da máxima energia de distorção), para consideração da anisotropia dos materiais, onde a ruptura do material considera diferentes tensões de plastificação nas três direções principais do material.

O modelo constitutivo, adotado para as madeiras, simula um comportamento elasto-plástico, através de curvas bilineares, dependendo das direções principais do material, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Modelo constitutivo adotado para a madeira.



Fonte: Molina (2017).

A modelagem da madeira exigiu a utilização de um total de 21 constantes, sendo estas constantes referentes às propriedades físicas, elásticas e plásticas, da madeira. Por simplicidade, os comportamentos da madeira na tração e na compressão foram considerados equivalentes. Além disso, nenhuma distinção foi feita entre as direções radial e tangencial (isotropia transversal) e os valores considerados, neste caso, corresponderam à direção perpendicular às fibras da madeira (direção radial). As propriedades elásticas das madeiras de pinus e eucalipto foram obtidas através de ensaios experimentais realizados em amostras retiradas das madeiras estudadas.

As relações entre as propriedades elásticas da madeira foram admitidas com base no trabalho desenvolvido por Molina (2008).

Admitiu-se no presente trabalho, para o valor da tensão última de plastificação da madeira (σ_z), na direção das fibras, o valor da resistência da madeira na compressão.

No ANSYS, o eixo de coordenadas “z” correspondeu à direção longitudinal das fibras da madeira, o eixo “y” à direção radial, e o eixo “x” à direção tangencial.

Todas as constantes utilizadas para a modelagem numérica da madeira, assim como as relações utilizadas entre elas, estão apresentadas na sequência.

As propriedades usadas na calibração dos modelos numéricos lineares e não lineares estão apresentadas no Apêndice A.

- **Propriedades elásticas da madeira:**

E_x^\pm = módulo de elasticidade na direção tangencial;

E_y^\pm = módulo de elasticidade na direção radial;

E_z^\pm = módulo de elasticidade na direção longitudinal (compressão);

ν_{xy} = coeficiente de Poisson no plano xy;

ν_{yz} = coeficiente de Poisson no plano yz;

ν_{xz} = coeficiente de Poisson no plano xz;

G_{xy} = módulo de cisalhamento no plano xy;

G_{yz} = módulo de cisalhamento no plano yz;

G_{xz} = módulo de cisalhamento no plano xz;

- **Propriedades plásticas da madeira:**

σ_x^\pm = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção x;

σ_y^\pm = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção y;

σ_z^\pm = tensão de plastificação (tração e compressão) na direção z;

E_{Tx}^\pm = módulo tangente (tração e compressão) na direção x;

E_{Ty}^\pm = módulo tangente (tração e compressão) na direção y;

E_{Tz}^\pm = módulo tangente (tração e compressão) na direção z;

τ_{xy} = tensão cisalhante de plastificação na direção xy;

τ_{yz} = tensão cisalhante de plastificação na direção yz;

τ_{xz} = tensão cisalhante de plastificação na direção xz;

G_{Txy} = módulo tangente de corte no plano xy;

G_{Tyz} = módulo tangente de corte no plano yz;

G_{Txz} = módulo tangente de corte no plano xz;

- **Relações admitidas entre as propriedades elásticas da madeira:**

$$E_x = E_y = (E_z/10);$$

$$G = G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = (E_z/20);$$

$$\nu_{xy} = 0,23$$

$$\nu_{xz} = \nu_{yz} = 0,0013$$

$$G_{Txy} = G_{Tyz} = 180; G_{Txz} = 0,18$$

- **Relações admitidas entre as propriedades plásticas da madeira:**

$$\sigma_z = f_{c0,m} = f_u$$

$$(\sigma_y / \sigma_z) = (\sigma_x / \sigma_z) = 0,19$$

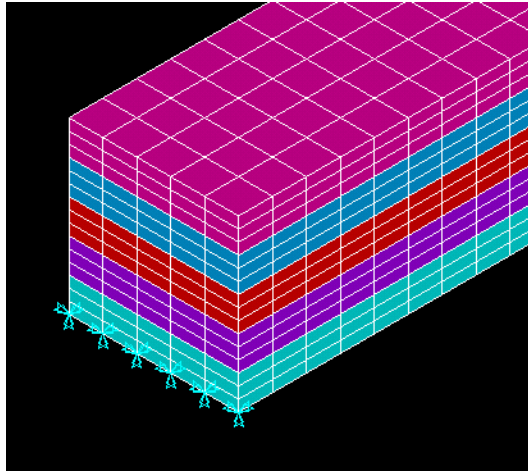
$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0,38\sigma_z; \tau_{xz} = 0,038\sigma_z$$

$$E_{Tx} = E_{Ty} = 41; E_{Tz} = 2800$$

3.6.4 Condições de contorno e vinculações

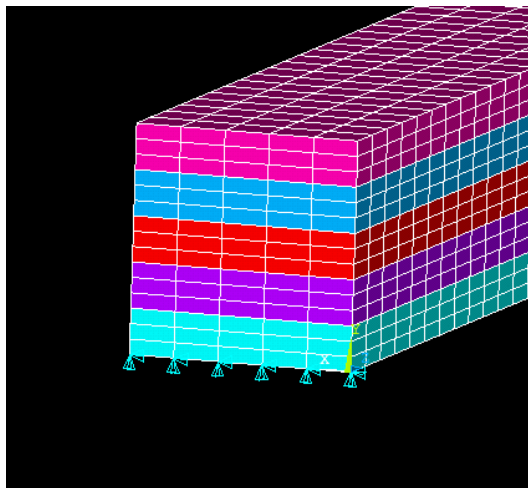
Os modelos analisados foram vinculados em concordância com os ensaios experimentais (Figura 28 e Figura 29). Os nós dos elementos utilizados nos modelos apresentaram três graus de liberdade, referentes às translações em x, y e z (coordenadas locais).

Figura 28 - Vinculações de apoio em todos graus de liberdade: translações em x,y e z.



Fonte: Autor.

Figura 29 - Vinculações de apoio em apenas dois graus de liberdade: translações em x e y, sendo o z liberado para se ter uma estrutura isostática.

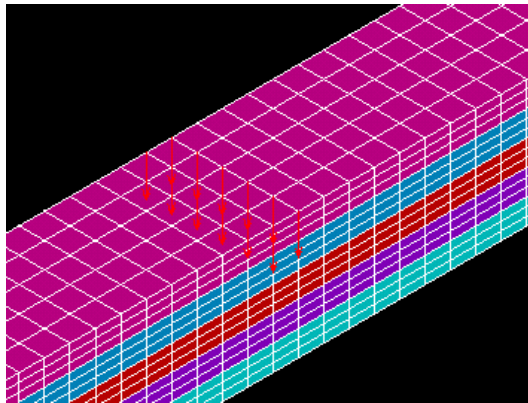


Fonte: Autor.

3.6.5 Considerações sobre a aplicação dos carregamentos

Os carregamentos foram simulados para os valores de cargas máximas aplicados conforme os ensaios experimentais. Neste caso, o valor da carga de ruptura foi dividido pelo número de nós existentes na região central das vigas (elementos). A região central foi discretizada em um total de 12 nós (Figura 30).

Figura 30 - Aplicação de carga nos 12 nós centrais do elemento.



Fonte: Autor.

3.6.6 Validação dos modelos numéricos

A validação dos modelos numéricos foi efetuada a partir da comparação do comportamento das curvas Força versus Flecha. Neste caso, as curvas numéricas foram comparadas com as curvas experimentais para os valores de carga última aplicada. Após a calibração dos modelos, foram obtidos numericamente os valores de rigidez $(EI)_{num}$ para cada uma das vigas ensaiadas experimentalmente, sendo estes valores comparados posteriormente com os resultados teóricos $(EI)_{teo}$ e experimentais $(EI)_{exp}$.

3.6.7 Análise linear

Na análise linear admite-se que a rigidez do conjunto (elemento ou viga) é constante, ou seja, a medida que o carregamento é aplicado ao elemento, a curva tensão versus deformação (ou força versus flecha) até a ruptura do sistema permanece constante, com uma única inclinação $K = \text{Força}/\text{Flecha}$. Em outras palavras, a medida que a força aplicada aumenta, a flecha (ou deformações) aumentam proporcionalmente. A análise linear foi utilizada na determinação dos valores numéricos de rigidez das vigas. Os valores de rigidez (EI) , neste caso, foram determinados a partir de uma força P que causou uma flecha igual a $L/200$ nas vigas. Vale mencionar ainda que para pequenas deflexões uma análise linear é suficiente. A teoria linear foi admitida somente para este intervalo (baixos valores de carga aplicada). Na maior parte dos casos, em uma análise linear, quando se resolve o problema da malha de elementos finitos o problema acabou. O mesmo não acontece para uma análise não linear.

Os dados de força P utilizados, e os valores de deslocamento, obtidos pela simulação foram aplicados na Equação 15, citada anteriormente, de forma a obter o valor de $(EI)_{numérico}$.

3.6.8 Análise não linear

A análise não linear é aquela onde a rigidez do sistema ($K=F/\text{flecha}$) varia até a ruptura final do elemento. Neste caso, a rigidez varia a medida que o carregamento se processa. O cálculo da flecha nesse caso exige o conhecimento da rigidez do sistema para o trecho final da curva tensão versus deformação (Força versus flecha).

A análise não linear parte do princípio que as forças internas e externas que agem na estrutura avaliada devem estar em equilíbrio durante o processamento numérico. Numa análise não linear o carregamento é dividido em trechos e para cada trecho (*step* de carregamento) é proposta uma deformada e a força interna associada a esta deformada é calculada. Se a força interna, neste caso, não confere com o incremento de carga admitido na divisão, então não se tem uma condição de equilíbrio verdadeira. Então são feitas sucessivas iterações e incrementos para checar se a força interna está em equilíbrio com a força externa do sistema até que a condição seja satisfeita.

Na análise linear contabiliza-se numericamente a atualização da rigidez a cada passo de carga aplicada, conhecendo-se assim a rigidez em cada intervalo. A análise não linear é recomendada quando existe plastificação do material e conseqüentemente variação do módulo de elasticidade de modo que não se tenha no sistema analisado variação da deformação não proporcional ao carregamento. A geometria deformada da estrutura altera sua condição de equilíbrio e isso é considerado somente em uma análise não linear.

3.6.8.1 Aspectos da análise não linear

Os carregamentos nos modelos analisados foram aplicados de forma incremental, devido à consideração da não linearidade física. O incremento de carga foi controlado utilizando-se o recurso do ANSYS denominado “*Automatic Time Stepping*”. O recurso citado reduz o valor do incremento quando a previsão do número de iterações ultrapassa o limite estabelecido, caso se obtenha incrementos de deformações plásticas maiores que 15%, ou ainda, deslocamentos excessivos. Utilizou-se como parâmetro de convergência uma tolerância igual a 0,001.

3.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES ANALÍTICOS, EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS DE (EI).

Uma vez determinados os valores analíticos, experimentais e numéricos da rigidez (EI), estes foram comparados para a avaliação do modelo analítico proposto pela versão de revisão da norma ABNT NBR 7190:2013 para madeiras de coníferas (Pinus C30) e para madeiras de folhosas (eucalipto C40) e também para a avaliação da calibração do modelo numérico.

Posteriormente, foram avaliados os modos de rupturas, obtidos para os elementos de MLC com base nos valores de força P, determinados a partir do modelo analítico e numérico.

3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi realizada com a finalidade de verificar se houberam diferenças significativas entre os resultados teóricos, numéricos e experimentais obtidos para o valor de EI.

Para o tratamento estatístico dos dados, utilizou-se, primeiramente, o teste de normalidade, de modo a verificar se os valores obtidos com os tratamentos seguiam uma distribuição normal. Os tratamentos considerados, neste caso, foram os valores de EI para cada caso. O próximo passo consistiu em efetuar a análise de variância, através da ANOVA, para testar a igualdade entre as médias. Além disso, foi realizado o teste de Tukey para verificação de quais médias apresentaram diferenças significativas entre si. Em ambos os testes, utilizou-se um nível de confiança de 95% e, no caso do teste de normalidade, aplicou-se o método de Shapiro-Wilk.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização das lâminas

Os resultados experimentais de caracterização das lâminas de madeira estão apresentados no Apêndice B. Através dos ensaios de caracterização, foram obtidos os valores de módulo de elasticidade na flexão (E_M), módulo de elasticidade na compressão (E_{c0}) resistência à compressão paralela (f_{c0}), resistência à tração paralela (f_{t0}) e resistência ao cisalhamento (f_{v0}).

A classificação visual das madeiras de coníferas realizada inicialmente pelo método completo proposto pelo projeto de revisão da norma brasileira, mostrou-se de difícil utilização e entendimento e precisa ser melhorado. Uma segunda tabela simplificada (Tabela 6), também proposta pelo Projeto de revisão da norma: ABNT/PN 02:126.10-0001-1, foi posteriormente utilizada para as coníferas.

As madeiras de folhosas em geral apresentam menor índice de defeitos quando comparadas com as madeiras de conífera, fazendo com que a classificação visual aconteça de maneira prática e rápida. A tabela simplificada (Tabela 7) proposta pelo projeto de revisão da norma, para classificação visual das madeiras de folhosas apresentava uma estrutura simplificada e mostrou-se de simples utilização.

A partir da análise dos resultados dos módulos de elasticidade na flexão (E_M), foi possível organizar as lâminas com maiores valores de módulo de elasticidade nos extremos dos elementos fletidos, enquanto as lâminas com menores valores de módulo de elasticidade foram colocadas na parte central dos elementos de MLC.

4.2 Valores de carga necessários para a ruptura das vigas

Os valores médios de resistência f_{c0m} , f_{t0m} e f_{v0m} apresentados nas tabelas presentes no Apêndice B foram utilizados para a determinação dos valores de força P_{c0} (compressão), P_{t0} (tração), e P_v (cisalhamento) que provocam a ruptura das vigas de MLC. Os respectivos resultados analíticos de força mínima na seção para ruptura em função da solicitação (compressão, tração e cisalhamento), assim como os valores de força máxima aplicados nos ensaios estão apresentados nas Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Valores analíticos de forças mínimas para a ruptura da seção e força máxima aplicada no ensaio de flexão (Pinus).

Viga	P _{c0} (kgf)	P _{t0} (kgf)	P _{v0} (kgf)	Força Máxima (kgf)	MOR (kgf/cm ²)
1	277,35	407,06	3262,02	495,567	653,64
2	283,88	443,88	2663,05	574,92	719,82
3	306,52	438,78	3525,82	648,827	821,69
4	292,55	448,16	4169,76	573,61	729,41
5	270,02	574,40	2560,67	492,533	648,54
6	311,82	466,00	3623,20	621,871	741,95
7	279,91	448,77	3074,40	485,018	616,11
8	309,17	427,46	3553,45	473,366	591,13
9	298,06	426,64	3413,34	590,432	769,17
10	275,32	565,42	3291,08	501,495	677,81
11	292,14	569,09	3327,28	370,778	492,63
12	279,60	419,91	4134,88	447,512	568,80
13	310,70	349,76	3537,65	568,992	711,05
14	294,29	579,09	4045,56	427,174	563,60

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Valores analíticos de forças mínimas para a ruptura da seção e força máxima aplicada no ensaio de flexão (Eucalipto).

VIGA	P _{c0} (kgf)	P _{t0} (kgf)	P _{v0} (kgf)	Força Máxima (kgf)	MOR (kgf/cm ²)
1	361,82	548,87	3034,28	670,062	1004,22
2	362,57	498,09	3040,55	491,085	734,40
3	487,70	723,28	2434,15	556,512	739,09
4	424,26	562,98	6150,82	706,189	934,37
5	439,53	651,84	2422,79	507,079	747,25
6	357,88	416,81	2919,16	602,774	907,96
7	426,88	591,91	2402,75	646,622	850,34
8	477,70	708,45	6071,85	572,852	776,72
9	457,91	526,61	3124,95	655,515	927,23
10	381,72	653,21	3063,39	576,851	848,30
11	404,81	692,72	3094,57	654,343	907,45
12	398,03	528,17	3112,66	726,527	1024,71
13	399,60	481,81	3160,69	696,468	945,07
14	390,69	621,21	3119,10	647,104	898,17

Fonte: Autor.

Com base nas Tabelas 8 e 9, observa-se que, de uma maneira geral, os elementos de MLC confeccionados com pinus e com eucalipto visualmente apresentaram inicialmente ruptura por compressão paralela às fibras, na fibra superior do elemento fletido, seguida de ruptura por tração na lâmina inferior e por fim, cisalhamento na linha neutra. Para as lâminas superiores dos elementos fletidos, existiu a parcela de esmagamento na direção normal às fibras proporcionada pelo pistão de ensaio, enfraquecendo a região de aplicação da carga e contribuindo para a ruptura do elemento. Além disso, o valor médio da resistência a compressão da madeira é geralmente menor que o valor da resistência média a tração. Neste sentido, observou-se a ruptura do elemento como um todo após a ruptura por tração da fibra inferior. Embora os valores de caracterização mostraram baixos valores para a resistência de

cisalhamento da madeira, o valor necessário para a ruptura para essa solicitação foi o mais alto de acordo com o modelo analítico, mostrando, assim, que ao se admitir a relação $L/h > 20$ para o elemento ensaiado, aumenta-se a resistência do elemento ao cisalhamento.

A figura 31 ilustra as rupturas ocorridas em cada um dos corpos de prova de MLC de pinus.

Figura 31 - Modo de falha dos elementos de MLC de pinus após ruptura.



a) Viga 1



b) Viga 2



c) Viga 3



d) Viga 4



e) Viga 5



f) Viga 6



f) Viga 7



g) Viga 8



g) Viga 9



h) Viga 10



i) Viga 11



j) Viga 12



k) Viga 13

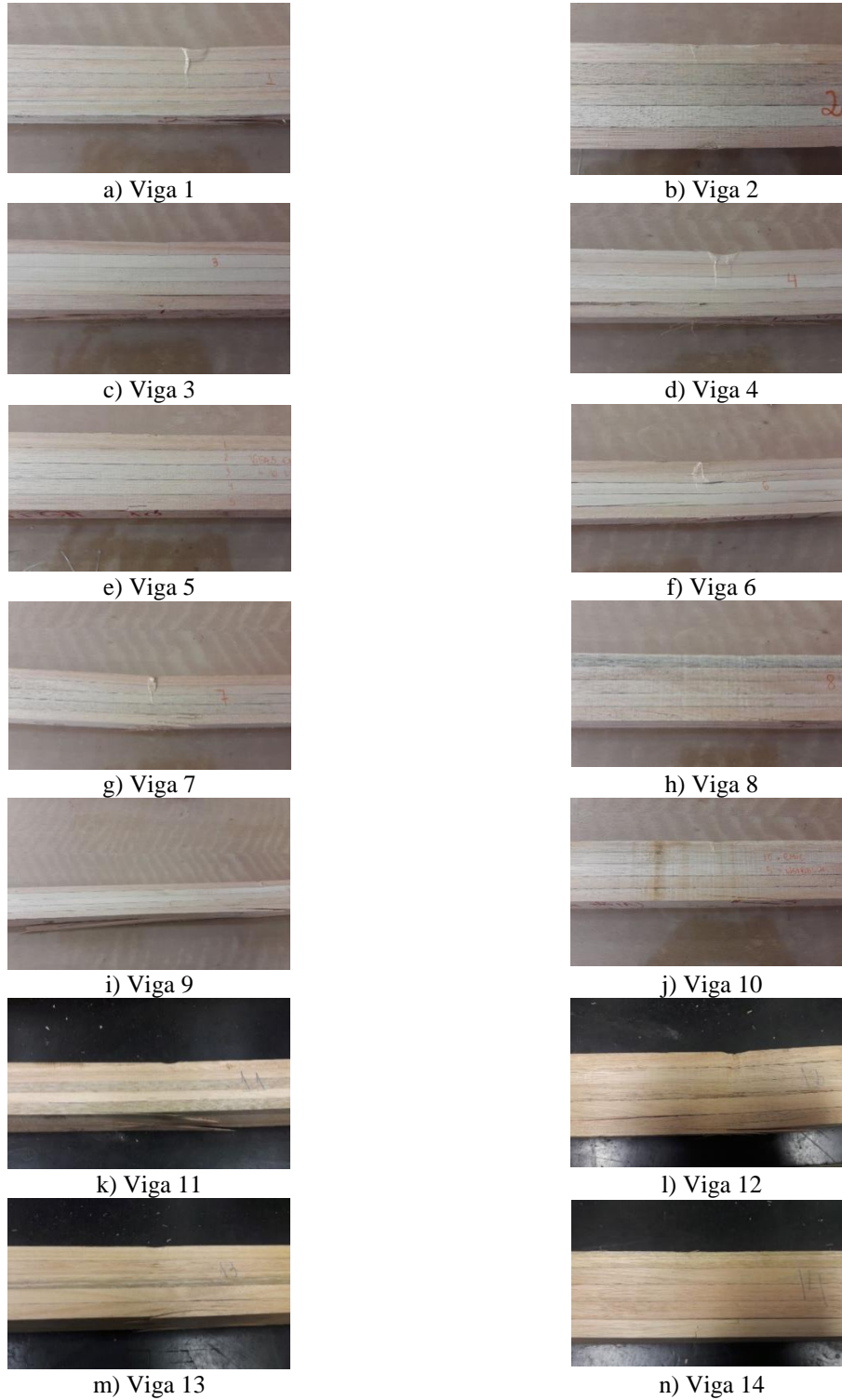


k) Viga 14

Fonte: Autor.

A Figura 32 ilustra as rupturas ocorridas em cada um dos corpos de prova de MLC de eucalipto.

Figura 32 - Modo de falha dos elementos de MLC de eucalipto após ruptura.



Fonte: Autor.

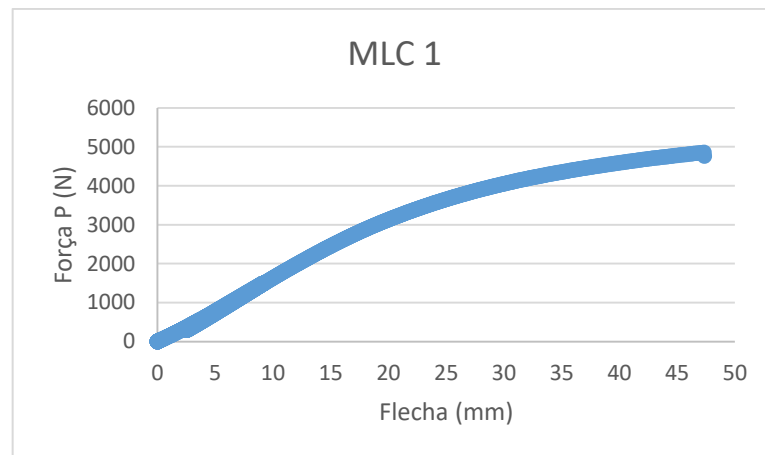
Após a análise dos modos de ruptura experimentais, apresentados pelos elementos fletidos, observou-se que estes foram condizentes com os modos de ruptura previstos

anteriormente no modelo teórico, ou seja, ruptura por compressão da lâmina superior, ruptura por tração da lâmina inferior e cisalhamento na linha neutra.

Observou-se também que a colagem dos elementos de madeira foi eficiente e não foram observadas rupturas na linha de cola.

A Figura 33 ilustra a curva $P \times \delta$ obtida através do ensaio da VIGA MLC 1 de pinus, considerando a aplicação do carregamento até a ruptura sem a retirada do transdutor de deslocamento no centro do vão.

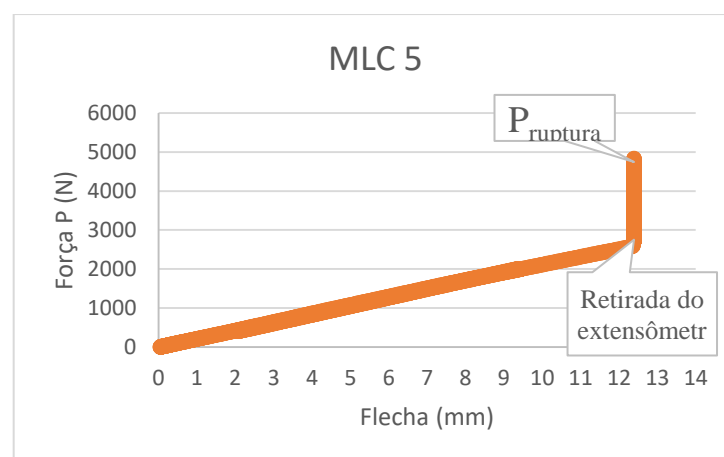
Figura 33 – Curva padrão $P \times \delta$ - VIGA MLC 1



Fonte: Autor.

A Figura 34 mostra o ensaio realizado até 70% da carga de ruptura estimada com posterior retirada do transdutor de deslocamento, equipamento utilizado no ensaio de flexão dos elementos de pinus. Essa estratégia foi utilizada para não danificar o equipamento. As curvas $P \times \delta$ obtidas para os demais elementos ensaios estão apresentadas no Apêndice C deste trabalho.

Figura 34 - Perfil $P \times \delta$ (VIGA MLC 5).



Fonte: Autor.

4.3 Rigidez EI

O modelo teórico da revisão de norma de madeiras ABNT NBR 7190:2013, propõe que seja utilizado o valor do módulo de elasticidade na flexão, para a determinação da rigidez $(EI)_{\text{teórico}}$. Para uma avaliação mais abrangente do modelo proposto, foi também avaliado o valor de $(EI)_{\text{teórico}}$ a partir da utilização do módulo de elasticidade na compressão na direção paralela das fibras. A comparação entre os valores de $(EI)_{\text{teórico}}$, considerando tanto o módulo de elasticidade na flexão quanto o módulo de elasticidade na compressão estão apresentados na Tabela 10 e Tabela 11, em comparação aos valores de EI obtidos experimentalmente, com base na Equação (15). São também apresentados os valores numéricos de (EI), obtidos a partir do modelo linear obtido com base na Equação (15).

Tabela 10 - Valores de rigidez EI (pinus).

VIGAS	EI_{EXP} (kgf.cm ²)	EI_{TEOR1} (kgf.cm ²)	EI_{TEOR2} (kgf.cm ²)	EI_{NUM} (kgf.cm ²)
1	3659668,51	3847716,34	4526725,11	4072409,59
2	5527305,25	5108320,75	6009789,11	5336449,32
3	7197326,32	5634690,84	6629048,04	5788263,75
4	4925126,37	5234103,76	6157769,14	5033940,15
5	5108938,15	4630468,63	5447610,15	4573047,88
6	7398230,97	6072069,79	7143611,51	5857497,59
7	4059358,21	3910406,12	4600477,79	3600005,80
8	5534443,27	4536526,97	5337090,55	4344940,63
9	5313717,02	4939772,35	5811496,88	5144739,47
10	5010407,72	4714751,94	5546766,98	5149676,83
11	5031055,41	4612343,86	5426286,89	4694229,56
12	5059619,76	3810109,64	4482481,93	3563872,46
13	5265816,98	4775908,27	5618715,61	4725449,17
14	3943077,57	3842876,12	4521030,73	3727617,93
Média	5216720,82	4690718,96	5518492,89	4686581,44
Desvio padrão	1055223	689823	811557	755555
CV	0,20228	0,14706	0,14706	0,16122

$EI_{\text{teo},1}$ = Valor de rigidez obtido a partir do módulo de elasticidade na flexão.

$EI_{\text{teo},2}$ = Valor de rigidez obtido a partir do módulo de elasticidade na compressão.

EI_{NUM} = Valor de rigidez obtido a partir da simulação numérica.

A média dos valores experimentais de rigidez (EI) das vigas com madeiras de pinus foram maiores que a média dos valores teóricos obtidos com base no módulo de elasticidade na flexão (teor,1). As diferenças, neste caso, foram de 10,08%. Quando comparados o valor médio experimental de (EI) com o valor teórico obtido com base no módulo de elasticidade na compressão, a diferença foi de 5,47%. Porém, neste segundo caso, o valor de (EI)_{teor} foi maior que o experimental.

Quando comparados os valores experimentais de (EI) com os valores numéricos (EI)_{teor,1} a diferença observada foi 10,16%, sendo o valor médio da rigidez numérica (EI) menor que o valor experimental, neste caso.

Tabela 11- Valores de rigidez EI (eucalipto).

VIGAS	EI _{EXP,2} (kgf.cm ²)	EI _{TEO,1,2} (kgf.cm ²)	EI _{TEO,2,2} (kgf.cm ²)	EI _{NUM,2} (kgf.cm ²)
1	5811068,73	7725559,05	8583954,50	8729524,36
2	6350535,21	7899292,55	8776991,72	8863165,24
3	7507658,50	9512033,72	10568926,36	9343599,35
4	7172126,25	9574834,24	10638704,71	8938997,95
5	7266889,89	8318064,03	9242293,37	8955755,12
6	7049603,63	7655970,07	8506633,41	9062960,71
7	7773292,55	10060687,61	11178541,79	9103715,99
8	7614237,25	9514786,18	10571984,65	9183822,79
9	7219699,22	9058708,11	10065231,23	9312760,68
10	6610469,20	8681757,12	9646396,80	9443912,80
11	7977126,67	9719194,11	10799104,57	9536565,70
12	8876402,44	9470988,67	10523320,74	9614562,35
13	8568059,87	10105340,31	11228155,90	9685216,94
14	7761885,04	9952009,32	11057788,13	9820541,94
Média	7397075,32	9089230,36	10099144,85	9256793,00
Desvio padrão	817089,00	874876,00	972085,00	333307,00
Coef. Var.	0,11046	0,09625	0,09625	0,03601

EI_{teor,1,2} = Valor de rigidez obtido a partir do módulo de elasticidade na flexão.

EI_{teor,2,2} = Valor de rigidez obtido a partir do módulo de elasticidade na compressão.

EI_{NUM,2} = Valor de rigidez obtido a partir da simulação numérica.

Fonte: Autor.

A média dos valores experimentais de rigidez (EI) das vigas com madeiras de eucalipto foram menores que a média dos valores teóricos obtidos com base no módulo de elasticidade na flexão. As diferenças, neste caso, foram de 18,62%. Quando comparados o valor médio experimental de (EI) com o valor teórico obtido com base no módulo de elasticidade na compressão, a diferença foi de 26,76%.

Quando comparados os valores experimentais de (EI) com os valores numéricos (EI)teor,1 a diferença observada foi 19,60%, sendo o valor médio da rigidez numérica (EI) maior que o valor experimental, no caso das vigas de eucalipto.

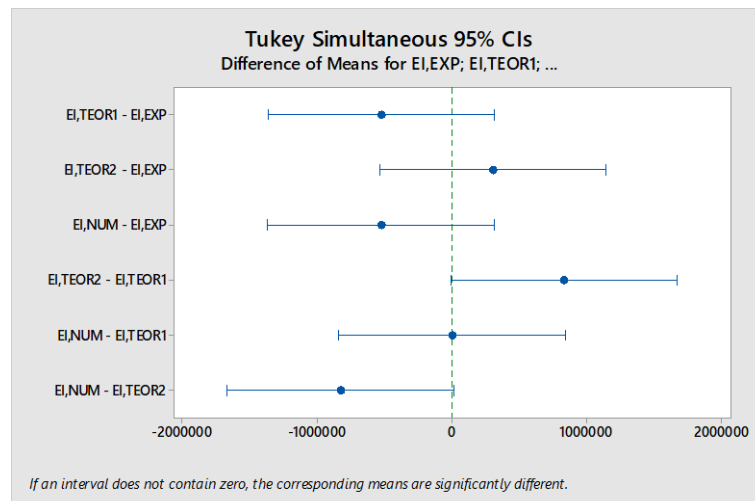
4.3.1 Análise estatística da rigidez EI.

Neste item são apresentadas as comparações entre os resultados obtidos para EI (teórico, numérico e experimental) para verificação da existência de diferenças significativas entre os mesmos.

4.3.1.1 Vigas com madeiras de pinus

O teste de normalidade Shapiro-Wilk indicou que todos os valores de rigidez EI seguiram distribuição normal, pois apresentaram p-value superior a 0,05. A análise de variância ANOVA e o método de múltiplas comparações de Tukey, afirmaram que todas as médias foram iguais. A Figura 35 ilustra a análise de Tukey, onde os intervalos que não estão presentes na linha 0, apresentam médias significativamente diferentes.

Figura 35 - Teste de Tukey para comparação entre as médias de EI_{EXP} , $EI_{teo,1}$, $EI_{teo,2}$ e EI_{NUM} .



Fonte: Autor.

O teste t de Student, mostrou que não houve diferença significativa entre os valores de EI_{exp} e os demais valores de EI ($EI_{teo,1}$, $EI_{teo,2}$ e EI_{NUM}), pois os valores de p-value foram todos superiores a 0,05.

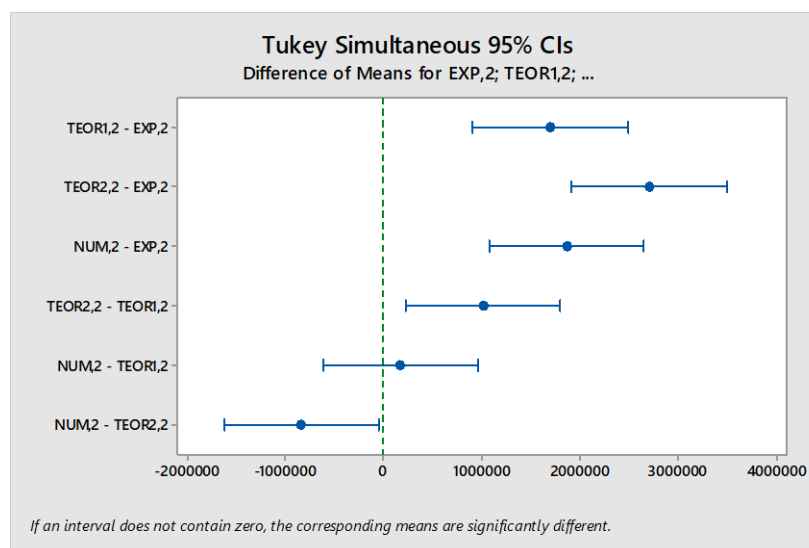
As análises mostraram que o modelo de cálculo proposto pelo projeto de revisão de norma ABNT NBR 7190:2013 está bem ajustado para a madeira de pinus, pois os valores de EI_{teor} foram significativamente iguais aos valores de EI_{EXP} .

Os valores de EI_{NUM} , obtidos através do modelo numérico linear, para a madeira de pinus, também não apresentaram diferenças significativas em relação aos valores experimentais, mostrando que o modelo proposto está bem ajustado para a madeira em questão.

4.3.1.2 Vigas com madeiras de eucalipto

No caso do eucalipto, o teste de normalidade Shapiro-Wilk indicou que todos os valores de rigidez EI seguiram distribuição normal, pois apresentaram p-value superior a 0,05. Por outro lado, a análise de variância ANOVA e o método de múltiplas comparações de Tukey, afirmaram que as médias apresentaram diferenças significativas, sendo apenas os valores de $EI_{NUM,2}$ e $EI_{TEOR1,2}$ significativamente iguais. A Figura 36 ilustra a análise de Tukey, onde os intervalos que não estão presentes na linha 0, apresentam médias significativamente diferentes.

Figura 36 – Teste de Tukey para comparação entre as médias entre EI_{EXP} , $EI_{teo,1}$, $EI_{teo,2}$ e EI_{NUM} .



Fonte: Autor.

O teste t de Student, também indicou que os valores de EI_{exp} e os demais valores de EI ($EI_{teo,1}$, $EI_{teo,2}$ e EI_{NUM}), são significativamente diferentes, pois os valores de p-value foram todos superiores a 0,05.

Os resultados de EI obtidos para a madeira de eucalipto apresentaram diferenças significativas entre si. As diferenças entre EI_{EXP} , $EI_{teo,1}$, $EI_{teo,2}$ e EI_{NUM} mostram que o modelo de cálculo e o modelo numérico utilizados não está bem ajustado para a madeira de eucalipto.

O modelo de cálculo proposto pelo projeto de norma ABNT NBR 7190:2013, inclui valores de módulo de elasticidade na flexão ($E_{M,SS}$ e $E_{M,I}$) e também os valores do momento de inércia correspondentes a quarta parte mais afastada na linha neutra do elemento ($I_{(1/4)}$) e a metade central da seção transversal ($I_{(1/2)}$).

Uma possível justificativa para a diferença entre os resultados experimentais com relação aos resultados teóricos e numéricos, para as madeiras de eucalipto, foi o método de ensaio de flexão utilizado. Neste caso, foi considerado apenas o deslocamento registrado pelo pistão de força da própria EMIC, sem utilização do transdutor de deslocamento.

4.4 Comparação entre os resultados numéricos e experimentais

Neste item, são apresentadas as comparações entre os resultados numéricos e experimentais obtidos para as vigas confeccionadas com madeiras de pinus e eucalipto. As Figuras 37 e 38 ilustram as calibrações dos modelos propostos neste trabalho. As curvas numéricas apresentadas nas figuras são referentes aos modelos linear e não linear, propostos neste trabalho. Os modelos lineares consideraram as propriedades elásticas dos materiais das vigas e os modelos não lineares consideraram as propriedades elásticas e plásticas. Todas as propriedades das madeiras utilizadas nos modelos foram obtidas a partir da caracterização experimental dos materiais (pinus e eucalipto). As curvas em questão (força versus flecha) foram plotadas para os valores de carga última aplicada em conformidade com os ensaios experimentais. Os modelos lineares foram utilizados neste trabalho para a determinação dos valores numéricos de rigidez (EI_{NUM}), enquanto os modelos não lineares foram utilizados para o cálculo das tensões nas regiões de maior solicitação das vigas, como também para a avaliação dos modos de ruptura obtidos experimentalmente.

Figura 37 – Comparação entre curvas numéricas e experimental para madeira de pinus.

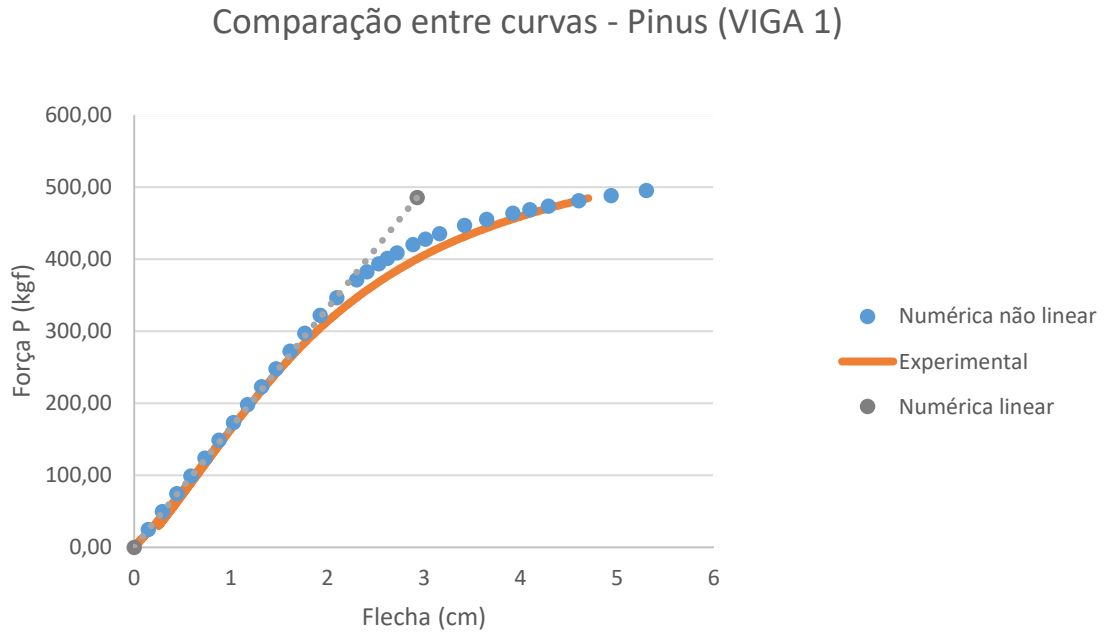
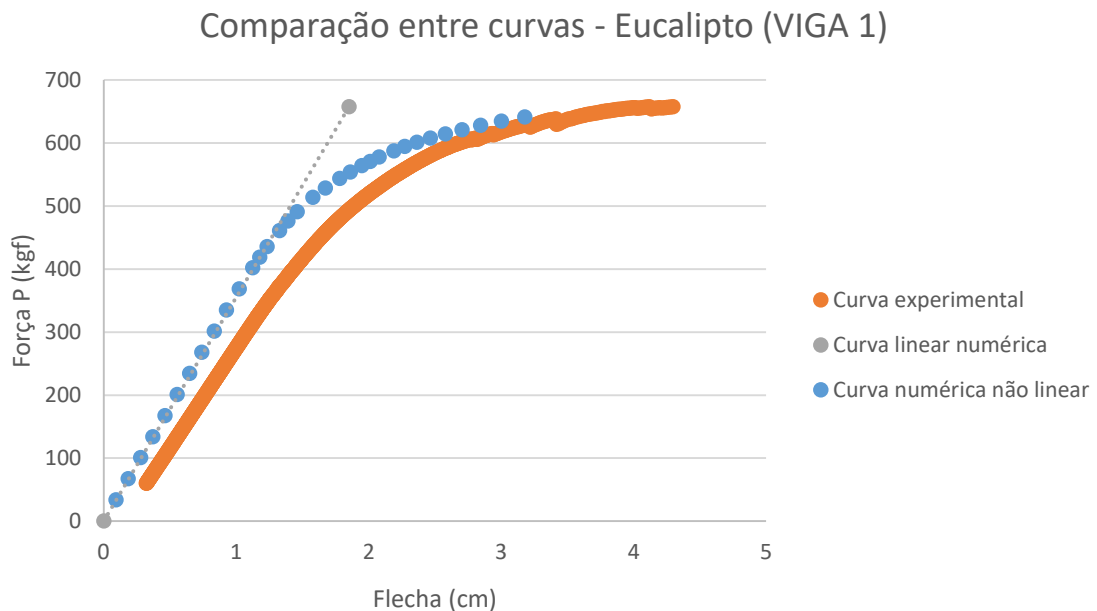


Figura 38 – Comparação entre curvas numéricas e experimental para madeira de eucalipto.



A partir das Figuras 37 e 38, pode-se observar que os modelos não lineares propostos neste trabalho apresentaram uma boa concordância com os resultados experimentais, assim como os modelos lineares. As curvas numérica e experimental para as madeiras de pinus foram praticamente coincidentes para os valores de carga aplicada no modelo. As curvas numéricas obtidas para o eucalipto, foram mais rígidas ($k = \text{Força}/\text{flecha}$) que a curva experimental. As

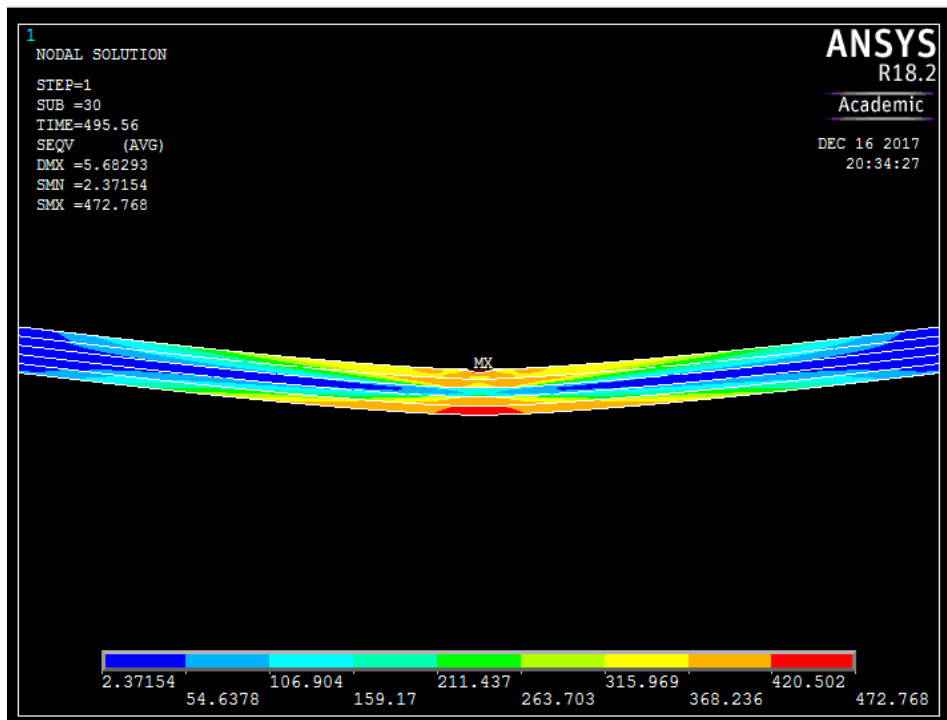
relações entre força e flecha obtidos para ambos os modelos não lineares realizados apresentaram basicamente o mesmo comportamento, ou seja, a fase inicial das curvas apresentou um comportamento linear e a partir de uma determinada força a relação começou a apresentar um comportamento não linear, devido a consideração da não linearidade física do material nos modelos. No caso dos modelos lineares, as relações entre força e flecha foram constantes até a carga última aplicada. Em outras palavras, os modelos apresentaram a mesma rigidez até os valores últimos de carga aplicada em cada caso. A partir da análise destas curvas, foi possível verificar também que para valores de carga aplicados, dentro do regime linear do material, fica claro que pode-se optar por um modelo linear como também por um não linear para se obter uma boa aproximação dos resultados. Para valores de carga última, o modelo não linear apresenta uma aproximação mais satisfatória, principalmente no que se refere à análise das tensões ($\sigma = E \cdot \varepsilon$).

Vale mencionar também que a modelagem da madeira não é uma tarefa simples devido a possibilidade de existência de imperfeições (distorções nas direções das fibras e presença de nós) que influenciam o seu comportamento. Geralmente, a madeira é caracterizada por 3 direções ortogonais (longitudinal, tangencial e radial), tendo cada uma das direções, propriedades mecânicas diferentes das outras duas direções, como também comportamentos diferentes na tração e na compressão. Na compressão, o comportamento da madeira é relativamente plástico, podendo ser aproximado por uma lei constitutiva elasto-plástica com endurecimento. Na tração, o comportamento da madeira é frágil e neste caso o modelo elástico plástico não representa verdadeiramente o comportamento do material.

4.5 Modos de ruptura

A Figura 39 e Figura 40 mostram as simulações das distribuições das tensões nas vigas de pinus e eucalipto analisadas experimentalmente, associadas aos modos de ruptura obtidos.

Figura 39 – Avaliação das tensões na viga de pinus: (a) Tensões de von Mises em kgf/cm²; (b) Modos de ruptura obtidos no ensaio experimental de flexão para viga 1.



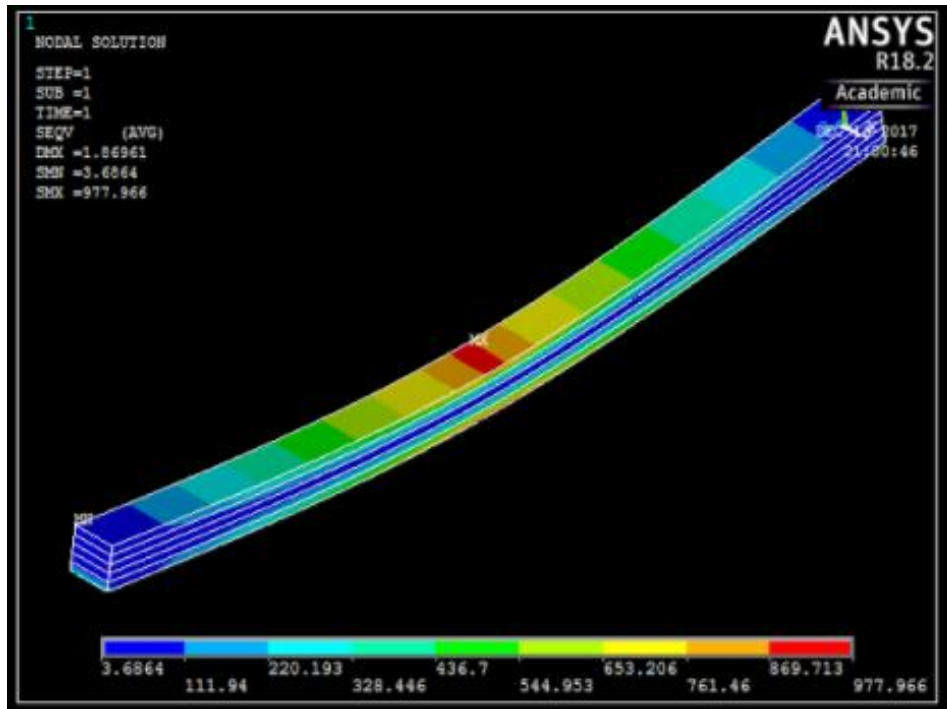
(a)



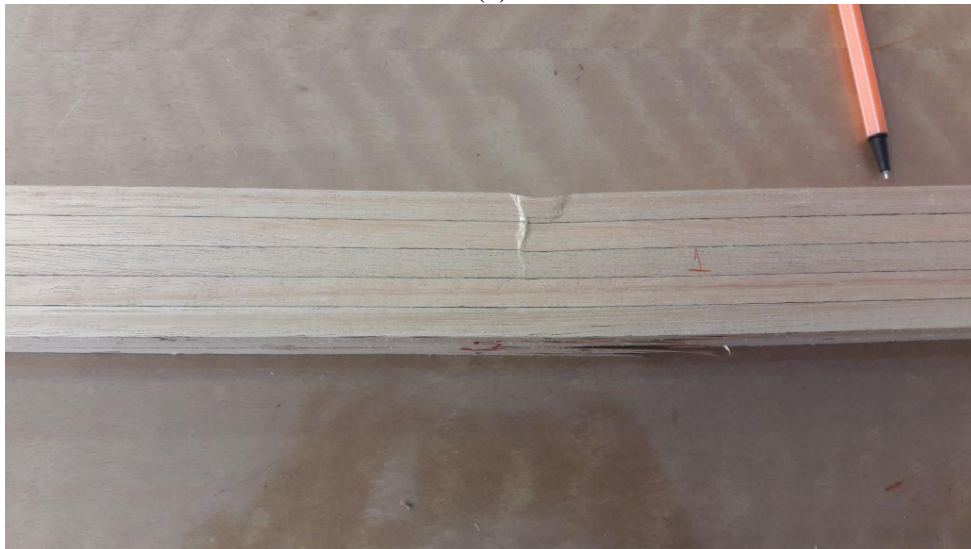
(b)

Fonte: Autor.

Figura 40 - Avaliação das tensões na viga de eucalipto: (a) Tensões de von Mises em kgf/cm^2 ; (b) Modos de ruptura obtidos no ensaio experimental de flexão para viga 1.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Os modelos numéricos propostos neste trabalho, foram capazes de simular o comportamento mecânico das vigas na flexão não somente na fase elástica linear mas também na fase não linear, durante a plastificação dos materiais. A partir dos modelos foi possível identificar a concentração de tensões na região comprimida como também tracionada das vigas analisadas. Este aspecto confirma a ruptura das vigas nessas regiões como observado nos ensaios experimentais de flexão. Dessa forma, as simulações numéricas possibilitaram a análise

das vigas para as cargas de ruptura não somente do ponto de vista global, mas também local no que se refere à concentração de tensões nas regiões mais solicitadas dos materiais.

Para a viga 1 de pinus o valor da tensão máxima de, presente na viga foi de 472,768 kgf/cm². Isso pode ser observado na parte inferior da tela da Figura 39 (a). Neste caso, o ANSYS indica uma escala gradativa de cores com os valores das tensões obtidas para o modelo. Vale mencionar ainda, que o valor de resistência (tração e compressão) admitido para as lâminas 1 e 5 da viga 1 de pinus, foi de 380,7 kgf/cm², indicando a ruptura da mesma nos pontos de maior solicitação (meio do vão).

Para a viga 1 de eucalipto o valor da tensão máxima, presente na viga foi de 977,966 kgf/cm². Isso pode ser observado na parte inferior da tela da Figura 40 (a). O valor de resistência (tração e compressão) admitido para as lâminas 1 e 5 da viga 1 de pinus, foi de 531,18 kgf/cm², indicando a ruptura da mesma nos pontos de maior solicitação (meio do vão).

5 CONCLUSÕES

Os resultados teóricos de rigidez ($EI_{teo,1}$) obtidos para as vigas de pinus segundo o projeto de revisão da ABNT NBR 7190:2013, concordaram com os resultados experimentais, mostrando uma boa aproximação. Os valores teóricos de ($EI_{teo,1}$) foram relativamente menores (aproximadamente 10%) que os valores experimentais. No entanto, a análise estatística realizada indicou que não existiram diferenças significativas entre os referidos valores teóricos e experimentais. Portanto, o modelo teórico proposto pela norma brasileira se ajustou adequadamente ao modelo experimental no caso da utilização de madeiras de pinus C30.

Para as madeiras de eucalipto, os resultados teóricos de rigidez (EI) segundo o projeto de revisão da ABNT NBR 7190:2013, não apresentaram tão boa aproximação com os resultados experimentais como as madeiras de pinus. Os valores teóricos de (EI) foram relativamente maiores (aproximadamente 18,62%) que os valores experimentais. Neste caso, a análise estatística realizada indicou que existiram diferenças significativas entre os referidos valores teóricos e experimentais.

Os modelos numéricos propostos neste trabalho foram capazes de prever o comportamento das vigas de pinus ensaiadas experimentalmente, tanto para cargas de serviço, quanto para cargas últimas aplicadas. A partir do modelo linear, observou-se que o valor médio de rigidez (EI) foi menor (cerca de 10,16%) que o valor obtido experimentalmente, não existindo assim, diferença significativa entre os mesmos. O modelo não linear conseguiu prever com boa aproximação os valores das tensões de ruptura que não são facilmente observadas nos ensaios experimentais.

No caso do eucalipto, os modelos numéricos propostos neste trabalho também foram capazes de prever o comportamento das vigas ensaiadas experimentalmente. A partir do modelo linear, observou-se que o valor médio de rigidez (EI) foi maior (cerca de 19,60%) que o valor obtido experimentalmente, existindo, neste caso, diferença significativa para um nível de significância de 95%. No entanto, para as vigas de eucalipto, o modelo não linear também conseguiu prever com boa aproximação os valores das tensões de ruptura.

As diferenças observadas para as vigas de eucalipto nos resultados numéricos e experimentais de (EI) podem ser explicadas devido a não utilização do transdutor de deslocamento como aconteceu para as vigas de pinus. No caso das vigas de eucalipto, os deslocamentos no centro do vão das vigas foram obtidos pelo próprio pistão de carga da EMIC o qual considera o esmagamento da fibra superior da madeira no ponto de aplicação de carga.

Os modos de ruptura observados nos ensaios experimentais das vigas, foram por compressão na lâmina superior seguidos por tração na lâmina inferior. Embora possa parecer contraditório com a literatura, isto pode ser explicado, neste estudo, com base nos valores médios de resistência obtidos pela caracterização do material. Teoricamente, o valor médio da resistência à tração da madeira é maior que o valor médio da resistência à compressão. Neste sentido, a medida que o nível de carga aumenta na viga durante o ensaio de flexão, a lâmina superior sofre uma compressão normal às fibras no ponto de aplicação da carga (meio do vão) e esse fenômeno contribui, sobretudo, para a diminuição da área resistente da seção transversal. Assim, o esmagamento já presente na lâmina superior ocorre simultaneamente à compressão da fibra superior até que a ruptura por tração aconteça.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar ensaios de flexão com madeiras de eucalipto e resina fenólica considerando a utilização de transdutor de deslocamento na obtenção das flechas no meio do vão e consequente obtenção da rigidez EI.

Obter os valores de EI para outros tipos de madeira (coníferas e dicotiledôneas) considerando diferentes classes de resistência.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMAT. Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção. **Perfil da indústria de materiais de construção**. São Paulo: FGV, 2016.

ALMEIDA, D. H. de et al. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum herb*) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa-mg, v. 37, n. 6, p.117-1181, out. 2013.

ANSYS versão 10.0 Documentation. ANSYS, Inc.

APRILANTI, M. D. **Influência de um corte na borda tracionada de uma viga maciça simulando uma emenda de topo na lâmina inferior de vigas laminadas coladas**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **CB-02 2º PN revisão ABNTNBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **CEE-126 PN 02:126.10-0001-3: Madeiras – Ensaio de caracterização de peças estruturais de madeira**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **CEE-126 PN 02:126.10-0001-5: Madeira laminada colada estrutural: métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

BINDERHOLZ. **The wave – Pabellón deportivo de la universidade NTU, Singapur**. Disponível em: <<https://www.binderholz.com/es/soluciones-de-construccion/publicamunicipal/the-wave-pabellon-deportivo-de-la-universidad-ntu-singapur-republica-de-singapur/>>. Acesso em: 04 jan. 2018.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri: Manole, 2003.

CERCHIARI, A. M. F. **Aprimoramento do poliuretano a base de óleo de mamona na manufatura de Madeira Laminada Colada (MLC) de *Cupressus lusitanica*, *Corymbia maculata* e *Hevea brasiliensis***. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2013.

CUNHA A.B. **Produção de vigas estruturais de madeira avaliadas por meio de ensaios estáticos e dinâmicos**. 2007. 146 f. Tese (Doutorado). Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná; Curitiba, 2007.

DIAS, Alan; BASTOS, Paulo. **Carpinteria: Shopping Iguatemi Fortaleza**. 2016. Disponível em: <<http://www.carpinteria.com.br>>. Acesso em: 19 maio 2016.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro.** 2005. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FIORELLI, J. et al. Natural fiber: reinforced polymer for structural application. In: HAKEEM, K. R.; JAWAID, M.; ALOTHMAN, O. Y. **Agricultural biomass based potential materials.** Switzerland: Springer, 2015. p. 35-49.

HOLMGREN, Eric P., SECKINGER, R. J., KILGREN, L. M., MANTE, F. Evaluating parameters of osseointegrated dental implants using finite element analysis - A twodimensional comparative study examining the effects of implant diameter, implant shape, and load direction. *Journal of oral implantology* vol.XXIV/no two/:80-88, 1998.

ICIMOTO, F. H. **Dormentes em Madeira Laminada Colada de *pinus oocarpa*.** 2013. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MACÊDO, A B; CALIL JUNIOR, C.A N, Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 9, n. 37, p.95-126, jan. 2007.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro.** 2009. 356 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOLINA, J. C. **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

MOLINA, J. C.. **A madeira na engenharia teoria experimentação e simulação.** Itapeva: Novas Edições Acadêmicas, 2017.

NEGRELI, M.; MOLINA, J. C.(2015). **Estudo numérico - experimental de elementos estruturais de madeira laminada colada na flexão.** In XV Encontro Brasileiro em Madeira e em Estruturas em Madeira – EBRAMEM. Curitiba, Anais, 8p.

NOGUEIRA, D. A versatilidade da madeira laminada colada. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p.01-14, jul. 2017.

PALMA, Diogo Cristiano. **Metodologia de simulação por elementos finitos de polias para transportadores de correia de grandes capacidades.** 2009. 20 f. Monografia (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/25826?locale=pt_BR>. Acesso em: 17 dez. 2017.

Ritter, M. A. **Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance.** Washington (1990), DC. 944p.

SANTOS, L. L. **Avaliação Estrutural de Vigas de Madeira Laminada Colada.** 2014. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - Es, 2014.

SEGUNDINHO, P. G. de A. et al. Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p.533-540, set. 2015.

TELES, R. F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com Louro Vermelho (*Sextonia rubra*)**. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Florestais, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ZANGIÁCONO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

APÊNDICE A – Propriedades elásticas e plásticas usadas na calibração dos modelos numéricos não lineares e lineares.

A Tabela A 1 apresenta os valores de coeficiente de Poisson e densidade admitidos para todas as lâminas na calibração dos modelos numéricos não lineares.

Tabela A 1 - Coeficiente de Poisson e densidade admitidos para a madeira na calibração dos modelos não lineares.

Parâmetro	Valor	Unidade
ν_{xy}	0,23	-
ν_{yz}	0,013	-
ν_{xz}	0,013	-
ρ	0	g/cm ³

Fonte: Autor.

As Tabelas A 2 e A 3 apresentam os valores das propriedades elásticas e plásticas usadas na calibração dos modelos numéricos não lineares.

Tabela A 2 - Parâmetros elásticos e plásticos admitidos para calibração dos modelos não lineares da viga 1 de pinus.

Parâmetros elásticos – lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	9033,07	kgf/cm ²	G_{xy}	4516,54	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9033,07	kgf/cm ²	G_{yz}	4516,54	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	90330,7	kgf/cm ²	G_{xz}	4516,54	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 1					
σ_x^{\pm}	73,76	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	73,76	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	388,2	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	147,52	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	147,52	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	14,75	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²
Parâmetros elásticos – lâmina 2					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	7483,49	kgf/cm ²	G_{xy}	3741,75	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7483,49	kgf/cm ²	G_{yz}	3741,75	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	74834,9	kgf/cm ²	G_{xz}	3741,75	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 2					
σ_x^{\pm}	69,65	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	69,65	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	366,6	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	139,31	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	139,31	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	13,93	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²

Parâmetros elásticos – lâmina 3					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	5101,06	kgf/cm ²	G_{xy}	2550,53	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	5101,06	kgf/cm ²	G_{yz}	2550,53	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	51010,6	kgf/cm ²	G_{xz}	2550,53	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 3					
σ_x^{\pm}	67,55	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	67,55	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	355,5	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	135,09	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	135,09	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	13,509	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²
Parâmetros elásticos – lâmina 4					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	9099,43	kgf/cm ²	G_{xy}	4549,71	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9099,43	kgf/cm ²	G_{yz}	4549,71	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	90994,3	kgf/cm ²	G_{xz}	4549,71	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 4					
σ_x^{\pm}	73,76	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	73,76	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	388,2	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	147,52	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	147,52	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	14,752	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²
Parâmetros elásticos – lâmina 5					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	7831,63	kgf/cm ²	G_{xy}	3915,82	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7831,63	kgf/cm ²	G_{yz}	3915,82	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	78316,3	kgf/cm ²	G_{xz}	3915,82	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 5					
σ_x^{\pm}	67,55	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	67,55	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	355,50	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	135,09	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	135,09	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	13,51	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 3 - Parâmetros elásticos e plásticos admitidos para calibração dos modelos não lineares da viga 1 de eucalipto.

Parâmetros elásticos – lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	18937,45	kgf/cm ²	G_{xy}	37874,89	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18937,45	kgf/cm ²	G_{yz}	37874,89	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	189374,46	kgf/cm ²	G_{xz}	37874,89	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 1					
σ_x^{\pm}	103,03	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	103,03	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	542,25	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	206,06	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	206,06	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	20,61	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²
Parâmetros elásticos – lâmina 2					
E_x^{\pm}	16506,54	kgf/cm ²	G_{xy}	8253,27	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16506,54	kgf/cm ²	G_{yz}	8253,27	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	165065,44	kgf/cm ²	G_{xz}	8253,27	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 2					
σ_x^{\pm}	123,07	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	123,07	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	647,76	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	246,15	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	246,15	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	24,61	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²
Parâmetros elásticos – lâmina 3					
E_x^{\pm}	14712,77	kgf/cm ²	G_{xy}	7356,39	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14712,77	kgf/cm ²	G_{yz}	7356,39	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	147127,71	kgf/cm ²	G_{xz}	7356,39	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 3					
σ_x^{\pm}	91,80	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	91,80	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	483,18	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	183,61	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	183,61	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	18,36	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²
Parâmetros elásticos – lâmina 4					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	15436,11	kgf/cm ²	G_{xy}	7718,05	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15436,11	kgf/cm ²	G_{yz}	7718,05	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	154361,1	kgf/cm ²	G_{xz}	7718,05	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 4					
σ_x^{\pm}	96,18	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	96,18	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	506,22	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	192,36	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	192,36	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	19,24	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²

Parâmetros elásticos – lâmina 5					
E_x^{\pm}	17717,55	kgf/cm ²	G_{xy}	8858,77	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17717,55	kgf/cm ²	G_{yz}	8858,77	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	177175,5	kgf/cm ²	G_{xz}	8858,77	kgf/cm ²
Parâmetros plásticos – lâmina 5					
σ_x^{\pm}	83,48	kgf/cm ²	E_{Tx}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_y^{\pm}	83,48	kgf/cm ²	E_{Ty}^{\pm}	41	kgf/cm ²
σ_z^{\pm}	439,36	kgf/cm ²	E_{Tz}^{\pm}	2800	kgf/cm ²
τ_{xy}	166,96	kgf/cm ²	G_{Txy}	180	kgf/cm ²
τ_{yz}	166,96	kgf/cm ²	G_{Tyz}	180	kgf/cm ²
τ_{xz}	16,70	kgf/cm ²	G_{Txz}	0,18	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Os valores de coeficiente de Poisson e densidade admitidos para a calibração dos modelos numéricos lineares foram os mesmos utilizados para os modelos numéricos não lineares, apresentados anteriormente na Tabela A 1.

As Tabelas A 4 a A 31 apresentam os valores das propriedades elásticas usadas na calibração dos modelos numéricos lineares.

Tabela A 4 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 1 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	9033,07	kgf/cm ²	G_{xy}	4516,54	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9033,07	kgf/cm ²	G_{yz}	4516,54	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	90330,74	kgf/cm ²	G_{xz}	4516,54	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	7483,49	kgf/cm ²	G_{xy}	3741,75	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7483,49	kgf/cm ²	G_{yz}	3741,75	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	74834,9	kgf/cm ²	G_{xz}	3741,75	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	5101,06	kgf/cm ²	G_{xy}	2550,53	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	5101,06	kgf/cm ²	G_{yz}	2550,53	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	51010,6	kgf/cm ²	G_{xz}	2550,53	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	9099,43	kgf/cm ²	G_{xy}	4549,71	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9099,43	kgf/cm ²	G_{yz}	4549,71	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	90994,3	kgf/cm ²	G_{xz}	4549,71	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	7831,63	kgf/cm ²	G_{xy}	3915,82	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7831,63	kgf/cm ²	G_{yz}	3915,82	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	78316,3	kgf/cm ²	G_{xz}	3915,82	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 5 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 2 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	11980,86	kgf/cm ²	G_{xy}	5990,43	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	11980,86	kgf/cm ²	G_{yz}	5990,43	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	119808,60	kgf/cm ²	G_{xz}	5990,43	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	7999,14	kgf/cm ²	G_{xy}	3999,57	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7999,14	kgf/cm ²	G_{yz}	3999,57	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	79991,43	kgf/cm ²	G_{xz}	3999,57	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	4981,76	kgf/cm ²	G_{xy}	2490,88	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	4981,76	kgf/cm ²	G_{yz}	2490,88	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	49817,62	kgf/cm ²	G_{xz}	2490,88	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	7287,03	kgf/cm ²	G_{xy}	3643,52	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7287,03	kgf/cm ²	G_{yz}	3643,52	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	72870,35	kgf/cm ²	G_{xz}	3643,52	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	12361,204	kgf/cm ²	G_{xy}	6180,60	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	12361,204	kgf/cm ²	G_{yz}	6180,60	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	123612,04	kgf/cm ²	G_{xz}	6180,60	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 6 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 3 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	12706,93	kgf/cm ²	G_{xy}	6353,46	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	12706,93	kgf/cm ²	G_{yz}	6353,46	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	127069,3	kgf/cm ²	G_{xz}	6353,46	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	9525,98	kgf/cm ²	G_{xy}	4762,99	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9525,98	kgf/cm ²	G_{yz}	4762,99	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	95259,85	kgf/cm ²	G_{xz}	4762,99	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	4812,25	kgf/cm ²	G_{xy}	2406,13	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	4812,25	kgf/cm ²	G_{yz}	2406,13	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	48122,55	kgf/cm ²	G_{xz}	2406,13	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	8749,94	kgf/cm ²	G_{xy}	4374,97	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8749,94	kgf/cm ²	G_{yz}	4374,97	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	87499,40	kgf/cm ²	G_{xz}	4374,97	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	13315,11	kgf/cm ²	G_{xy}	6657,55	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	13315,11	kgf/cm ²	G_{yz}	6657,55	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	133151,08	kgf/cm ²	G_{xz}	6657,55	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 7- Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 4 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	12954,24	kgf/cm ²	G_{xy}	6477,12	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	12954,24	kgf/cm ²	G_{yz}	6477,12	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	129542,40	kgf/cm ²	G_{xz}	6477,12	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	6889,21	kgf/cm ²	G_{xy}	3444,61	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	6889,21	kgf/cm ²	G_{yz}	3444,61	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	68892,13	kgf/cm ²	G_{xz}	3444,61	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	6548,28	kgf/cm ²	G_{xy}	3274,14	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	6548,28	kgf/cm ²	G_{yz}	3274,14	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	65482,81	kgf/cm ²	G_{xz}	3274,14	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	11591,84	kgf/cm ²	G_{xy}	5795,92	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	11591,84	kgf/cm ²	G_{yz}	5795,92	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	115918,38	kgf/cm ²	G_{xz}	5795,92	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	8587,00	kgf/cm ²	G_{xy}	4293,50	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8587,00	kgf/cm ²	G_{yz}	4293,50	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	85870,00	kgf/cm ²	G_{xz}	4293,50	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 8 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 5 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	9505,71	kgf/cm ²	G_{xy}	4752,86	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9505,71	kgf/cm ²	G_{yz}	4752,86	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	95057,13	kgf/cm ²	G_{xz}	4752,86	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	9136,62	kgf/cm ²	G_{xy}	4568,31	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9136,62	kgf/cm ²	G_{yz}	4568,31	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	91366,16	kgf/cm ²	G_{xz}	4568,31	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	6453,51	kgf/cm ²	G_{xy}	3226,75	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	6453,51	kgf/cm ²	G_{yz}	3226,75	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	64535,09	kgf/cm ²	G_{xz}	3226,75	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	9111,36	kgf/cm ²	G_{xy}	4555,68	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9111,36	kgf/cm ²	G_{yz}	4555,68	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	91113,58	kgf/cm ²	G_{xz}	4555,68	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	9435,89	kgf/cm ²	G_{xy}	4717,95	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9435,89	kgf/cm ²	G_{yz}	4717,95	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	94358,93	kgf/cm ²	G_{xz}	4717,95	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 9 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 6 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	13343,24	kgf/cm ²	G_{xy}	6671,62	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	13343,24	kgf/cm ²	G_{yz}	6671,62	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	133432,42	kgf/cm ²	G_{xz}	6671,62	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	8512,99	kgf/cm ²	G_{xy}	4256,49	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8512,99	kgf/cm ²	G_{yz}	4256,49	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	85129,89	kgf/cm ²	G_{xz}	4256,49	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	4791,41	kgf/cm ²	G_{xy}	2395,71	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	4791,41	kgf/cm ²	G_{yz}	2395,71	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	47914,12	kgf/cm ²	G_{xz}	2395,71	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	8520,05	kgf/cm ²	G_{xy}	4260,02	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8520,05	kgf/cm ²	G_{yz}	4260,02	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	85200,45	kgf/cm ²	G_{xz}	4260,02	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	13475,46	kgf/cm ²	G_{xy}	6737,73	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	13475,46	kgf/cm ²	G_{yz}	6737,73	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	134754,58	kgf/cm ²	G_{xz}	6737,73	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 10 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 7 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	7471,06	kgf/cm ²	G_{xy}	3735,53	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7471,06	kgf/cm ²	G_{yz}	3735,53	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	74710,63	kgf/cm ²	G_{xz}	3735,53	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	7327,44	kgf/cm ²	G_{xy}	3663,72	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7327,44	kgf/cm ²	G_{yz}	3663,72	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	73274,36	kgf/cm ²	G_{xz}	3663,72	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	6576,47	kgf/cm ²	G_{xy}	3288,23	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	6576,47	kgf/cm ²	G_{yz}	3288,23	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	65764,66	kgf/cm ²	G_{xz}	3288,23	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	7359,81	kgf/cm ²	G_{xy}	3679,91	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7359,81	kgf/cm ²	G_{yz}	3679,91	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	73598,12	kgf/cm ²	G_{xz}	3679,91	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	7204,02	kgf/cm ²	G_{xy}	3602,01	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7204,02	kgf/cm ²	G_{yz}	3602,01	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	72040,20	kgf/cm ²	G_{xz}	3602,01	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 11 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 8 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	8777,47	kgf/cm ²	G_{xy}	4388,74	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8777,47	kgf/cm ²	G_{yz}	4388,74	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	87774,72	kgf/cm ²	G_{xz}	4388,74	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	7831,75	kgf/cm ²	G_{xy}	3915,87	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7831,75	kgf/cm ²	G_{yz}	3915,87	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	78317,47	kgf/cm ²	G_{xz}	3915,87	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	4392,91	kgf/cm ²	G_{xy}	2196,45	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	4392,91	kgf/cm ²	G_{yz}	2196,45	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	43929,07	kgf/cm ²	G_{xz}	2196,45	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	7949,15	kgf/cm ²	G_{xy}	3974,57	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7949,15	kgf/cm ²	G_{yz}	3974,57	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	79491,47	kgf/cm ²	G_{xz}	3974,57	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	9995,58	kgf/cm ²	G_{xy}	4997,79	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9995,58	kgf/cm ²	G_{yz}	4997,79	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	99955,85	kgf/cm ²	G_{xz}	4997,79	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 12 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 9 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	10888,34	kgf/cm ²	G_{xy}	5444,17	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	10888,34	kgf/cm ²	G_{yz}	5444,17	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	108883,36	kgf/cm ²	G_{xz}	5444,17	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	8224,30	kgf/cm ²	G_{xy}	4112,15	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8224,30	kgf/cm ²	G_{yz}	4112,15	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	82242,97	kgf/cm ²	G_{xz}	4112,15	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	8064,55	kgf/cm ²	G_{xy}	4032,27	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8064,55	kgf/cm ²	G_{yz}	4032,27	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	80645,48	kgf/cm ²	G_{xz}	4032,27	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	8368,30	kgf/cm ²	G_{xy}	4184,15	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8368,30	kgf/cm ²	G_{yz}	4184,15	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	83683,01	kgf/cm ²	G_{xz}	4184,15	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	11534,41	kgf/cm ²	G_{xy}	5767,20	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	11534,41	kgf/cm ²	G_{yz}	5767,20	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	115344,08	kgf/cm ²	G_{xz}	5767,20	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 13 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 10 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	11248,72	kgf/cm ²	G_{xy}	5624,36	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	11248,72	kgf/cm ²	G_{yz}	5624,36	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	112487,24	kgf/cm ²	G_{xz}	5624,36	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	8154,88	kgf/cm ²	G_{xy}	4077,44	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8154,88	kgf/cm ²	G_{yz}	4077,44	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	81548,85	kgf/cm ²	G_{xz}	4077,44	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	6248,34	kgf/cm ²	G_{xy}	3124,17	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	6248,34	kgf/cm ²	G_{yz}	3124,17	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	62483,42	kgf/cm ²	G_{xz}	3124,17	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	8080,09	kgf/cm ²	G_{xy}	4040,04	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8080,09	kgf/cm ²	G_{yz}	4040,04	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	80800,89	kgf/cm ²	G_{xz}	4040,04	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	11516,35	kgf/cm ²	G_{xy}	5758,17	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	11516,35	kgf/cm ²	G_{yz}	5758,17	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	115163,49	kgf/cm ²	G_{xz}	5758,17	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 14 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 11 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	9914,82	kgf/cm ²	G_{xy}	4957,41	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9914,82	kgf/cm ²	G_{yz}	4957,41	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	99148,23	kgf/cm ²	G_{xz}	4957,41	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	8496,12	kgf/cm ²	G_{xy}	4248,06	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8496,12	kgf/cm ²	G_{yz}	4248,06	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	84961,23	kgf/cm ²	G_{xz}	4248,06	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	5982,73	kgf/cm ²	G_{xy}	2991,36	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	5982,73	kgf/cm ²	G_{yz}	2991,36	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	59827,26	kgf/cm ²	G_{xz}	2991,36	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	8477,04	kgf/cm ²	G_{xy}	4238,52	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	8477,04	kgf/cm ²	G_{yz}	4238,52	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	84770,44	kgf/cm ²	G_{xz}	4238,52	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	10130,70	kgf/cm ²	G_{xy}	5065,35	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	10130,70	kgf/cm ²	G_{yz}	5065,35	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	101306,97	kgf/cm ²	G_{xz}	5065,35	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 15 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 12 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	7382,24	kgf/cm ²	G_{xy}	3691,12	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7382,24	kgf/cm ²	G_{yz}	3691,12	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	73822,36	kgf/cm ²	G_{xz}	3691,12	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	6683,71	kgf/cm ²	G_{xy}	3341,85	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	6683,71	kgf/cm ²	G_{yz}	3341,85	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	66837,10	kgf/cm ²	G_{xz}	3341,85	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	6130,67	kgf/cm ²	G_{xy}	3065,33	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	6130,67	kgf/cm ²	G_{yz}	3065,33	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	61306,66	kgf/cm ²	G_{xz}	3065,33	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	7032,78	kgf/cm ²	G_{xy}	3516,39	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7032,78	kgf/cm ²	G_{yz}	3516,39	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	70327,79	kgf/cm ²	G_{xz}	3516,39	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	7419,29	kgf/cm ²	G_{xy}	3709,65	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7419,29	kgf/cm ²	G_{yz}	3709,65	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	74192,92	kgf/cm ²	G_{xz}	3709,65	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 16 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 13 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	9159,75	kgf/cm ²	G_{xy}	4579,88	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9159,75	kgf/cm ²	G_{yz}	4579,88	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	91597,54	kgf/cm ²	G_{xz}	4579,88	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	9036,79	kgf/cm ²	G_{xy}	4518,39	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	9036,79	kgf/cm ²	G_{yz}	4518,39	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	90367,86	kgf/cm ²	G_{xz}	4518,39	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	5843,88	kgf/cm ²	G_{xy}	2921,94	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	5843,88	kgf/cm ²	G_{yz}	2921,94	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	58438,81	kgf/cm ²	G_{xz}	2921,94	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	6628,30	kgf/cm ²	G_{xy}	3314,15	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	6628,30	kgf/cm ²	G_{yz}	3314,15	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	66282,98	kgf/cm ²	G_{xz}	3314,15	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	11516,35	kgf/cm ²	G_{xy}	5773,99	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	11516,35	kgf/cm ²	G_{yz}	5773,99	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	11516,35	kgf/cm ²	G_{xz}	5773,99	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 17 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 14 de pinus.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	7724,10	kgf/cm ²	G_{xy}	3862,05	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7724,10	kgf/cm ²	G_{yz}	3862,05	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	77240,95	kgf/cm ²	G_{xz}	3862,05	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	7496,26	kgf/cm ²	G_{xy}	3748,13	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7496,26	kgf/cm ²	G_{yz}	3748,13	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	74962,60	kgf/cm ²	G_{xz}	3748,13	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	5603,40	kgf/cm ²	G_{xy}	2801,70	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	5603,40	kgf/cm ²	G_{yz}	2801,70	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	56034,02	kgf/cm ²	G_{xz}	2801,70	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	7555,58	kgf/cm ²	G_{xy}	3777,79	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7555,58	kgf/cm ²	G_{yz}	3777,79	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	75555,77	kgf/cm ²	G_{xz}	3777,79	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	7627,70	kgf/cm ²	G_{xy}	3813,85	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	7627,70	kgf/cm ²	G_{yz}	3813,85	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	76277,02	kgf/cm ²	G_{xz}	3813,85	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 18 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 1 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	18937,45	kgf/cm ²	G_{xy}	37874,89	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18937,45	kgf/cm ²	G_{yz}	37874,89	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	189374,47	kgf/cm ²	G_{xz}	37874,89	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	16506,54	kgf/cm ²	G_{xy}	8253,27	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16506,54	kgf/cm ²	G_{yz}	8253,27	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	165065,44	kgf/cm ²	G_{xz}	8253,27	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14712,77	kgf/cm ²	G_{xy}	7356,39	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14712,77	kgf/cm ²	G_{yz}	7356,39	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	147127,71	kgf/cm ²	G_{xz}	7356,39	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	15436,11	kgf/cm ²	G_{xy}	7718,05	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15436,11	kgf/cm ²	G_{yz}	7718,05	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	154361,07	kgf/cm ²	G_{xz}	7718,05	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	17717,55	kgf/cm ²	G_{xy}	8858,77	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17717,55	kgf/cm ²	G_{yz}	8858,77	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	177175,49	kgf/cm ²	G_{xz}	8858,77	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 19 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 2 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	19336,82	kgf/cm ²	G_{xy}	9668,41	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	19336,82	kgf/cm ²	G_{yz}	9668,41	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	193368,17	kgf/cm ²	G_{xz}	9668,41	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	16636,29	kgf/cm ²	G_{xy}	8318,15	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16636,29	kgf/cm ²	G_{yz}	8318,15	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	166362,93	kgf/cm ²	G_{xz}	8318,15	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14724,41	kgf/cm ²	G_{xy}	7362,20	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14724,41	kgf/cm ²	G_{yz}	7362,20	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	147244,06	kgf/cm ²	G_{xz}	7362,20	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	15442,89	kgf/cm ²	G_{xy}	7721,44	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15442,89	kgf/cm ²	G_{yz}	7721,44	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	154428,88	kgf/cm ²	G_{xz}	7721,44	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18141,73	kgf/cm ²	G_{xy}	9070,87	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18141,73	kgf/cm ²	G_{yz}	9070,87	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	181417,30	kgf/cm ²	G_{xz}	9070,87	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 20 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 3 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	19501,96	kgf/cm ²	G_{xy}	9750,98	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	19501,96	kgf/cm ²	G_{yz}	9750,98	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	195019,60	kgf/cm ²	G_{xz}	9750,98	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	15540,35	kgf/cm ²	G_{xy}	7770,18	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15540,35	kgf/cm ²	G_{yz}	7770,18	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	155403,53	kgf/cm ²	G_{xz}	7770,18	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14746,18	kgf/cm ²	G_{xy}	7373,09	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14746,18	kgf/cm ²	G_{yz}	7373,09	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	147461,77	kgf/cm ²	G_{xz}	7373,09	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	16818,48	kgf/cm ²	G_{xy}	8409,24	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16818,48	kgf/cm ²	G_{yz}	8409,24	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	168184,75	kgf/cm ²	G_{xz}	8409,24	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18171,78	kgf/cm ²	G_{xy}	9085,89	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18171,78	kgf/cm ²	G_{yz}	9085,89	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	181717,81	kgf/cm ²	G_{xz}	9085,89	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 21 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 4 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	19576,34	kgf/cm ²	G_{xy}	9788,17	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	19576,34	kgf/cm ²	G_{yz}	9788,17	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	195763,39	kgf/cm ²	G_{xz}	9788,17	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	15563,38	kgf/cm ²	G_{xy}	7781,69	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15563,38	kgf/cm ²	G_{yz}	7781,69	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	155633,78	kgf/cm ²	G_{xz}	7781,69	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14772,10	kgf/cm ²	G_{xy}	7386,05	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14772,10	kgf/cm ²	G_{yz}	7386,05	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	147720,99	kgf/cm ²	G_{xz}	7386,05	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	16838,80	kgf/cm ²	G_{xy}	8419,40	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16838,80	kgf/cm ²	G_{yz}	8419,40	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	168387,98	kgf/cm ²	G_{xz}	8419,40	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18193,94	kgf/cm ²	G_{xy}	9096,97	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18193,94	kgf/cm ²	G_{yz}	9096,97	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	181939,40	kgf/cm ²	G_{xz}	9096,97	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 22 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 5 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	19646,33	kgf/cm ²	G_{xy}	9823,17	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	19646,33	kgf/cm ²	G_{yz}	9823,17	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	196463,32	kgf/cm ²	G_{xz}	9823,17	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	15573,43	kgf/cm ²	G_{xy}	7786,72	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15573,43	kgf/cm ²	G_{yz}	7786,72	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	155734,32	kgf/cm ²	G_{xz}	7786,72	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14775,19	kgf/cm ²	G_{xy}	7387,59	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14775,19	kgf/cm ²	G_{yz}	7387,59	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	147751,88	kgf/cm ²	G_{xz}	7387,59	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	16890,42	kgf/cm ²	G_{xy}	8445,21	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16890,42	kgf/cm ²	G_{yz}	8445,21	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	168904,16	kgf/cm ²	G_{xz}	8445,21	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18205,40	kgf/cm ²	G_{xy}	9102,70	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18205,40	kgf/cm ²	G_{yz}	9102,70	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	182054,01	kgf/cm ²	G_{xz}	9102,70	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 23 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 6 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	20062,45	kgf/cm ²	G_{xy}	10031,24	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	20062,45	kgf/cm ²	G_{yz}	10031,24	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	200624,47	kgf/cm ²	G_{xz}	10031,24	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	15588,42	kgf/cm ²	G_{xy}	7794,21	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15588,42	kgf/cm ²	G_{yz}	7794,21	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	155884,22	kgf/cm ²	G_{xz}	7794,21	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14815,59	kgf/cm ²	G_{xy}	7407,79	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14815,59	kgf/cm ²	G_{yz}	7407,79	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	148155,89	kgf/cm ²	G_{xz}	7407,79	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	16905,61	kgf/cm ²	G_{xy}	8452,81	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16905,61	kgf/cm ²	G_{yz}	8452,81	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	169056,10	kgf/cm ²	G_{xz}	8452,81	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18358,50	kgf/cm ²	G_{xy}	9179,25	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18358,50	kgf/cm ²	G_{yz}	9179,25	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	183585,02	kgf/cm ²	G_{xz}	9179,25	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 24 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 7 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	20246,56	kgf/cm ²	G_{xy}	10123,28	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	20246,56	kgf/cm ²	G_{yz}	10123,28	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	202465,57	kgf/cm ²	G_{xz}	10123,28	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	15602,88	kgf/cm ²	G_{xy}	7801,44	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15602,88	kgf/cm ²	G_{yz}	7801,44	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	156028,82	kgf/cm ²	G_{xz}	7801,44	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14906,51	kgf/cm ²	G_{xy}	7453,25	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14906,51	kgf/cm ²	G_{yz}	7453,25	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	149065,07	kgf/cm ²	G_{xz}	7453,25	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	16910,05	kgf/cm ²	G_{xy}	8455,02	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16910,05	kgf/cm ²	G_{yz}	8455,02	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	169100,46	kgf/cm ²	G_{xz}	8455,02	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18390,46	kgf/cm ²	G_{xy}	9195,23	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18390,46	kgf/cm ²	G_{yz}	9195,23	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	183904,60	kgf/cm ²	G_{xz}	9195,23	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 25 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 8 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	20595,21	kgf/cm ²	G_{xy}	10297,60	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	20595,21	kgf/cm ²	G_{yz}	10297,60	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	205952,08	kgf/cm ²	G_{xz}	10297,60	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	15814,68	kgf/cm ²	G_{xy}	7907,34	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15814,68	kgf/cm ²	G_{yz}	7907,34	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	158146,77	kgf/cm ²	G_{xz}	7907,34	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14913,13	kgf/cm ²	G_{xy}	7456,56	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14913,13	kgf/cm ²	G_{yz}	7456,56	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	149131,25	kgf/cm ²	G_{xz}	7456,56	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	17022,83	kgf/cm ²	G_{xy}	8511,41	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17022,83	kgf/cm ²	G_{yz}	8511,41	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	170228,26	kgf/cm ²	G_{xz}	8511,41	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18395,07	kgf/cm ²	G_{xy}	9197,53	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18395,07	kgf/cm ²	G_{yz}	9197,53	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	183950,69	kgf/cm ²	G_{xz}	9197,53	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 26 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 9 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	21205,67	kgf/cm ²	G_{xy}	10602,84	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	21205,67	kgf/cm ²	G_{yz}	10602,84	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	212056,72	kgf/cm ²	G_{xz}	10602,84	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	15933,23	kgf/cm ²	G_{xy}	7966,61	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15933,23	kgf/cm ²	G_{yz}	7966,61	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	159332,29	kgf/cm ²	G_{xz}	7966,61	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14943,20	kgf/cm ²	G_{xy}	7471,60	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14943,20	kgf/cm ²	G_{yz}	7471,60	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	149431,97	kgf/cm ²	G_{xz}	7471,60	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	17089,16	kgf/cm ²	G_{xy}	8544,58	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17089,16	kgf/cm ²	G_{yz}	8544,58	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	170891,59	kgf/cm ²	G_{xz}	8544,58	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18444,31	kgf/cm ²	G_{xy}	9222,16	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18444,31	kgf/cm ²	G_{yz}	9222,16	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	184443,11	kgf/cm ²	G_{xz}	9222,16	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 27 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 10 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	21798,96	kgf/cm ²	G_{xy}	10899,48	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	21798,96	kgf/cm ²	G_{yz}	10899,48	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	217989,63	kgf/cm ²	G_{xz}	10899,48	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	16033,67	kgf/cm ²	G_{xy}	8016,84	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16033,67	kgf/cm ²	G_{yz}	8016,84	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	160336,70	kgf/cm ²	G_{xz}	8016,84	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14946,63	kgf/cm ²	G_{xy}	7473,32	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14946,63	kgf/cm ²	G_{yz}	7473,32	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	149466,33	kgf/cm ²	G_{xz}	7473,32	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	17315,39	kgf/cm ²	G_{xy}	8657,70	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17315,39	kgf/cm ²	G_{yz}	8657,70	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	173153,93	kgf/cm ²	G_{xz}	8657,70	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18503,32	kgf/cm ²	G_{xy}	9251,66	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18503,32	kgf/cm ²	G_{yz}	9251,66	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	185033,22	kgf/cm ²	G_{xz}	9251,66	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 28 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 11 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	22220,17	kgf/cm ²	G_{xy}	11110,08	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	22220,17	kgf/cm ²	G_{yz}	11110,08	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	222201,67	kgf/cm ²	G_{xz}	11110,08	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	16172,59	kgf/cm ²	G_{xy}	8086,29	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16172,59	kgf/cm ²	G_{yz}	8086,29	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	161725,87	kgf/cm ²	G_{xz}	8086,29	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	14992,07	kgf/cm ²	G_{xy}	7496,04	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	14992,07	kgf/cm ²	G_{yz}	7496,04	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	149920,72	kgf/cm ²	G_{xz}	7496,04	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	17331,22	kgf/cm ²	G_{xy}	8665,61	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17331,22	kgf/cm ²	G_{yz}	8665,61	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	173312,19	kgf/cm ²	G_{xz}	8665,61	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18557,01	kgf/cm ²	G_{xy}	9278,51	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18557,01	kgf/cm ²	G_{yz}	9278,51	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	185570,10	kgf/cm ²	G_{xz}	9278,51	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 29 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 12 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	22365,77	kgf/cm ²	G_{xy}	11182,89	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	22365,77	kgf/cm ²	G_{yz}	11182,89	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	223657,72	kgf/cm ²	G_{xz}	11182,89	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	16276,71	kgf/cm ²	G_{xy}	8138,36	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16276,71	kgf/cm ²	G_{yz}	8138,36	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	162767,10	kgf/cm ²	G_{xz}	8138,36	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	15137,91	kgf/cm ²	G_{xy}	7568,96	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15137,91	kgf/cm ²	G_{yz}	7568,96	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	151379,12	kgf/cm ²	G_{xz}	7568,96	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	17445,65	kgf/cm ²	G_{xy}	8722,83	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17445,65	kgf/cm ²	G_{yz}	8722,83	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	174456,52	kgf/cm ²	G_{xz}	8722,83	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18757,84	kgf/cm ²	G_{xy}	9378,92	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18757,84	kgf/cm ²	G_{yz}	9378,92	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	187578,43	kgf/cm ²	G_{xz}	9378,92	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 30 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 13 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	22654,32	kgf/cm ²	G_{xy}	11327,16	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	22654,32	kgf/cm ²	G_{yz}	11327,16	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	226543,21	kgf/cm ²	G_{xz}	11327,16	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	16300,32	kgf/cm ²	G_{xy}	8150,16	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16300,32	kgf/cm ²	G_{yz}	8150,16	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	163003,17	kgf/cm ²	G_{xz}	8150,16	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	15204,41	kgf/cm ²	G_{xy}	7602,20	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15204,41	kgf/cm ²	G_{yz}	7602,20	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	152044,07	kgf/cm ²	G_{xz}	7602,20	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	17477,83	kgf/cm ²	G_{xy}	8738,92	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17477,83	kgf/cm ²	G_{yz}	8738,92	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	174778,34	kgf/cm ²	G_{xz}	8738,92	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18839,29	kgf/cm ²	G_{xy}	9419,64	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18839,29	kgf/cm ²	G_{yz}	9419,64	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	188392,88	kgf/cm ²	G_{xz}	9419,64	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

Tabela A 31 - Parâmetros elásticos para o modelo numérico da viga 14 de eucalipto.

Lâmina 1					
Parâmetro	Valor	Unidade	Parâmetro	Valor	Unidade
E_x^{\pm}	23407,19	kgf/cm ²	G_{xy}	11703,59	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	23407,19	kgf/cm ²	G_{yz}	11703,59	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	234071,88	kgf/cm ²	G_{xz}	11703,59	kgf/cm ²
Lâmina 2					
E_x^{\pm}	16312,80	kgf/cm ²	G_{xy}	8156,40	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	16312,80	kgf/cm ²	G_{yz}	8156,40	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	163127,98	kgf/cm ²	G_{xz}	8156,40	kgf/cm ²
Lâmina 3					
E_x^{\pm}	15297,07	kgf/cm ²	G_{xy}	7648,53	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	15297,07	kgf/cm ²	G_{yz}	7648,53	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	152970,69	kgf/cm ²	G_{xz}	7648,53	kgf/cm ²
Lâmina 4					
E_x^{\pm}	17566,46	kgf/cm ²	G_{xy}	8783,23	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	17566,46	kgf/cm ²	G_{yz}	8783,23	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	175664,57	kgf/cm ²	G_{xz}	8783,23	kgf/cm ²
Lâmina 5					
E_x^{\pm}	18839,43	kgf/cm ²	G_{xy}	9419,72	kgf/cm ²
E_y^{\pm}	18839,43	kgf/cm ²	G_{yz}	9419,72	kgf/cm ²
E_z^{\pm}	188394,30	kgf/cm ²	G_{xz}	9419,72	kgf/cm ²

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – Resultados experimentais de caracterização das lâminas de madeira.

Os resultados experimentais de caracterização das lâminas de madeira estão apresentados nas tabelas a seguir (Tabela B 1 a Tabela B 48). Através dos ensaios de caracterização, foram obtidos os valores de módulo de elasticidade na flexão (E_M), módulo de elasticidade na compressão (E_{c0}) resistência à compressão paralela (f_{c0}), resistência à tração paralela (f_{t0}) e resistência ao cisalhamento (f_{v0}).

Tabela B 1 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 1 de MLC de pinus.

VIGA 1	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
Lâmina 1	S3	ND	8858,47	10421,72	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 2	S2	ND	7338,84	8633,93	35,95	52,34	12,84	0,55
Lâmina 3	SE	ND	5002,46	5885,24	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 4	S3	ND	8923,54	10498,28	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 5	SE	D	7680,25	9035,59	34,86	55,89	10,66	0,44

Fonte: Autor.

Tabela B 2 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 2 de MLC de pinus.

VIGA 2	Classificação visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
Lâmina 1	S2	ND	11749,27	13822,67	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 2	S2	ND	7844,52	9228,85	43,43	54,51	10,41	0,56
Lâmina 3	S3	ND	4885,46	5747,61	36,48	74,25	7,99	0,62
Lâmina 4	S2	D	7146,18	8407,27	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 5	SE	D	12122,26	14261,48	43,43	54,51	10,41	0,56

Fonte: Autor.

Tabela B 3 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 3 de MLC de pinus.

	Classificação visual		E_m (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 3								
Lâmina 1	SE	D	12703,83	14945,69	36,48	74,25	7,99	0,62
Lâmina 2	S1	D	6756,04	7948,29	39,87	74,16	10,62	0,53
Lâmina 3	S3	ND	6421,70	7554,94	35,95	52,34	12,84	0,55
Lâmina 4	S1	D	11367,77	13373,84	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 5	SE	D	8421,01	9907,07	34,86	55,89	10,66	0,44

Fonte: Autor.

Tabela B 4 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 4 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 4								
Lâmina 1	S3	D	12703,83	14945,69	36,48	74,25	7,99	0,62
Lâmina 2	SE	ND	6756,04	7948,29	39,87	74,16	10,62	0,53
Lâmina 3	S3	ND	6421,70	7554,94	35,95	52,34	12,84	0,55
Lâmina 4	S3	D	11367,77	13373,84	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 5	S1	D	8421,01	9907,07	34,86	55,89	10,66	0,44

Fonte: Autor.

Tabela B 5 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 5 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 5								
Lâmina 1	S2	D	9321,97	10967,02	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 2	S2	D	8960,01	10541,18	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 3	S3	ND	6328,76	7445,60	36,48	74,25	7,99	0,62
Lâmina 4	S1	ND	8935,24	10512,04	39,87	74,16	10,62	0,53
Lâmina 5	SE	ND	9253,50	10886,47	39,87	74,16	10,62	0,53

Fonte: Autor.

Tabela B 6 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 6 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 6								
Lâmina 1	S3	D	13085,32	15394,49	36,48	74,25	7,99	0,62
Lâmina 2	S3	ND	8348,43	9821,69	43,43	54,51	10,41	0,56
Lâmina 3	S3	ND	4698,79	5527,99	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 4	S3	ND	8355,35	9829,83	36,48	74,25	7,99	0,62
Lâmina 5	S2	ND	13214,98	15547,03	43,43	54,51	10,41	0,56

Fonte: Autor.

Tabela B 7 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 7 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 7								
Lâmina 1	S3	ND	7326,65	8619,59	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 2	S3	D	7185,80	8453,88	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 3	S3	ND	6449,34	7587,46	37,86	42,87	9,45	0,48
Lâmina 4	S3	ND	7217,55	8491,23	37,86	42,87	9,45	0,48
Lâmina 5	SE	D	7064,77	8311,49	34,86	55,89	10,66	0,44

Fonte: Autor.

Tabela B 8 - Valores de caracterização das lâminas referentes a elemento 8 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 8								
Lâmina 1	S3	D	8607,80	10126,83	37,86	42,87	9,45	0,48
Lâmina 2	S3	ND	7680,36	9035,72	37,86	42,87	9,45	0,48
Lâmina 3	S1	ND	4307,99	5068,23	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 4	S3	ND	7795,49	9171,16	39,87	74,16	10,62	0,53
Lâmina 5	S3	D	9802,37	11532,20	35,95	52,34	12,84	0,55

Fonte: Autor.

Tabela B 9 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 9 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 9								
Lâmina 1	SE	ND	10677,86	12562,19	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 2	S2	ND	8065,32	9488,61	35,95	52,34	12,84	0,55
Lâmina 3	S3	ND	7908,66	9304,31	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 4	S3	D	8206,54	9654,76	35,95	52,34	12,84	0,55
Lâmina 5	S2	ND	11311,45	13307,59	43,43	54,51	10,41	0,56

Fonte: Autor.

Tabela B 10 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 10 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 10								
Lâmina 1	S3	D	11031,29	12977,98	36,48	74,25	7,99	0,62
Lâmina 2	SE	ND	7997,25	9408,53	37,86	42,87	9,45	0,48
Lâmina 3	SE	ND	6127,56	7208,90	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 4	SE	ND	7923,90	9322,24	39,87	74,16	10,62	0,53
Lâmina 5	S3	D	11293,74	13286,75	38,07	74,93	10,62	0,60

Fonte: Autor.

Tabela B 11 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 11 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 11								
Lâmina 1	SE	ND	9723,17	11439,02	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 2	S2	D	8331,89	9802,23	35,95	52,34	12,84	0,55
Lâmina 3	S3	ND	5867,08	6902,45	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 4	SE	D	8313,18	9780,21	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 5	S1	ND	9934,87	11688,08	39,87	74,16	10,62	0,53

Fonte: Autor.

Tabela B 12 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 12 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 12								
Lâmina 1	SE	ND	7239,54	8517,10	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 2	S3	D	6554,51	7711,19	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 3	SE	ND	6012,16	7073,13	35,95	52,34	12,84	0,55
Lâmina 4	S3	ND	6896,84	8113,92	43,43	54,51	10,41	0,56
Lâmina 5	SE	ND	7275,88	8559,86	35,95	52,34	12,84	0,55

Fonte: Autor.

Tabela B 13 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 13 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 13								
Lâmina 1	S2	ND	8982,70	10567,88	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 2	S3	ND	8862,11	10426,01	43,43	54,51	10,41	0,56
Lâmina 3	S3	ND	5730,92	6742,26	39,87	74,16	10,62	0,53
Lâmina 4	S2	ND	6500,17	7647,26	34,86	55,89	10,66	0,44
Lâmina 5	SE	ND	11324,76	13323,24	37,86	42,87	9,45	0,48

Fonte: Autor.

Tabela B 14 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 14 de MLC de pinus.

	Classificação Visual		E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 14								
Lâmina 1	S3	D	7574,79	8911,52	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 2	S3	ND	7351,36	8648,66	36,48	74,25	7,99	0,62
Lâmina 3	SE	ND	5495,09	6464,81	35,95	52,34	12,84	0,55
Lâmina 4	S3	D	7409,53	8717,09	38,07	74,93	10,62	0,60
Lâmina 5	S1	D	7480,26	8800,30	38,07	74,93	10,62	0,60

Fonte: Autor.

Tabela B 15 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 1 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 1							
Lâmina 1	2	18571,29	20634,77	53,18	76,34	8,42	0,63
Lâmina 2	3	16187,39	17985,99	63,52	94,21	11,62	0,69
Lâmina 3	3	14428,30	16031,44	47,38	116,06	10,43	0,54
Lâmina 4	2	15137,65	16819,61	49,64	49,06	10,38	0,63
Lâmina 5	3	17374,98	19305,53	43,09	80,67	7,89	0,58

Fonte: Autor.

Tabela B 16 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 2 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 2							
Lâmina 1	2	18962,94	21069,93	53,18	76,34	8,42	0,65
Lâmina 2	3	16314,63	18127,37	43,09	80,67	7,89	0,53
Lâmina 3	3	14439,71	16044,12	47,38	116,06	10,43	0,53
Lâmina 4	3	15144,30	16827,00	47,38	116,06	10,43	0,52
Lâmina 5	2	17790,96	19767,73	55,05	73,05	10,18	0,65

Fonte: Autor.

Tabela B 17 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 3 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 3							
Lâmina 1	2	19124,89	21249,88	63,52	94,21	11,62	0,71
Lâmina 2	3	15239,88	16933,20	47,38	116,06	10,43	0,54
Lâmina 3	3	14461,06	16067,84	43,09	80,67	7,89	0,49
Lâmina 4	3	16493,29	18325,88	53,18	76,34	8,42	0,54
Lâmina 5	2	17820,43	19800,48	63,52	94,21	11,62	0,66

Fonte: Autor.

Tabela B 18 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 4 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 4							
Lâmina 1	2	19197,83	21330,92	55,05	73,05	10,18	0,60
Lâmina 2	2	15262,46	16958,29	49,64	49,06	10,38	0,60
Lâmina 3	3	14486,48	16096,09	49,83	64,12	19,87	0,53
Lâmina 4	3	16513,22	18348,02	53,18	76,34	8,42	0,54
Lâmina 5	2	17842,16	19824,62	55,05	73,05	10,18	0,61

Fonte: Autor.

Tabela B 19 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 5 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 5							
Lâmina 1	2	19266,47	21407,19	63,52	94,21	11,62	0,71
Lâmina 2	3	15272,32	16969,24	43,09	80,67	7,89	0,52
Lâmina 3	3	14489,51	16099,46	53,18	76,34	8,42	0,51
Lâmina 4	3	16563,84	18404,27	63,52	94,21	11,62	0,70
Lâmina 5	2	17853,40	19837,11	63,52	94,21	11,62	0,67

Fonte: Autor.

Tabela B 20 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 6 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 6							
Lâmina 1	2	19674,54	21860,60	55,05	73,05	10,18	0,69
Lâmina 2	3	15287,02	16985,58	55,52	84,55	9,77	0,54
Lâmina 3	3	14529,13	16143,48	47,38	116,06	10,43	0,53
Lâmina 4	3	16578,74	18420,82	43,09	80,67	7,89	0,55
Lâmina 5	2	18003,54	20003,93	49,83	64,12	19,87	0,66

Fonte: Autor.

Tabela B 21 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 7 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 7							
Lâmina 1	2	19855,09	22061,21	55,05	73,05	10,18	0,72
Lâmina 2	3	15301,20	17001,33	55,52	84,55	9,77	0,55
Lâmina 3	3	14618,29	16242,54	43,09	80,67	7,89	0,51
Lâmina 4	3	16583,09	18425,66	43,09	80,67	7,89	0,53
Lâmina 5	2	18034,88	20038,76	53,18	76,34	8,42	0,59

Fonte: Autor.

Tabela B 22 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 8 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 8							
Lâmina 1	1	20197,00	22441,11	63,52	94,21	11,62	0,72
Lâmina 2	3	15508,90	17232,11	47,38	116,06	10,43	0,55
Lâmina 3	3	14624,78	16249,76	49,83	64,12	19,87	0,53
Lâmina 4	3	16693,69	18548,54	53,18	76,34	8,42	0,59
Lâmina 5	2	18039,40	20043,78	63,52	94,21	11,62	0,68

Fonte: Autor.

Tabela B 23 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 9 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 9							
Lâmina 1	1	20795,66	23106,29	63,52	94,21	11,62	0,72
Lâmina 2	3	15625,16	17361,29	43,09	80,67	7,89	0,53
Lâmina 3	3	14654,27	16282,52	47,38	116,06	10,43	0,52
Lâmina 4	3	16758,74	18620,82	55,52	84,55	9,77	0,57
Lâmina 5	2	18087,69	20097,43	55,05	73,05	10,18	0,65

Fonte: Autor.

Tabela B 24 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 10 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 10							
Lâmina 1	1	21377,48	23752,76	55,05	73,05	10,18	0,75
Lâmina 2	3	15723,66	17470,73	47,38	116,06	10,43	0,58
Lâmina 3	3	14657,64	16286,27	47,38	116,06	10,43	0,54
Lâmina 4	3	16980,60	18867,33	55,52	84,55	9,77	0,56
Lâmina 5	2	18145,56	20161,73	63,52	94,21	11,62	0,66

Fonte: Autor.

Tabela B 25 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 11 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 11			0				
Lâmina 1	1	21790,54	24211,71	55,05	73,05	10,18	0,73
Lâmina 2	2	15859,89	17622,10	49,83	64,12	19,87	0,60
Lâmina 3	3	14702,20	16335,78	49,64	49,06	10,38	0,67
Lâmina 4	2	16996,12	18884,58	55,05	73,05	10,18	0,60
Lâmina 5	2	18198,21	20220,23	63,52	94,21	11,62	0,72

Fonte: Autor.

Tabela B 26 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 12 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 12							
Lâmina 1	1	21933,33	24370,37	55,05	73,05	10,18	0,75
Lâmina 2	3	15962,00	17735,56	43,09	80,67	7,89	0,54
Lâmina 3	3	14845,22	16494,69	47,38	116,06	10,43	0,51
Lâmina 4	2	17108,34	19009,27	63,52	94,21	11,62	0,68
Lâmina 5	2	18395,16	20439,07	55,05	73,05	10,18	0,67

Fonte: Autor.

Tabela B 27 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 13 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 13							
Lâmina 1	1	22216,30	24684,78	53,18	76,34	8,42	0,70
Lâmina 2	3	15985,15	17761,28	55,52	84,55	9,77	0,59
Lâmina 3	3	14910,43	16567,14	49,64	49,06	10,38	0,66
Lâmina 4	2	17139,90	19044,33	55,52	84,55	9,77	0,61
Lâmina 5	2	18475,03	20527,81	49,83	64,12	19,87	0,72

Fonte: Autor.

Tabela B 28 - Valores de caracterização das lâminas referentes ao elemento 14 de MLC de eucalipto.

	Classificação visual	E_M (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{c0m} (MPa)	f_{t0m} (MPa)	f_{v0m} (MPa)	ρ (g/cm ³)
VIGA 14							
Lâmina 1	1	22954,61	25505,12	53,18	76,34	8,42	0,71
Lâmina 2	3	15997,39	17774,88	43,09	80,67	7,89	0,53
Lâmina 3	3	15001,30	16668,11	49,64	49,06	10,38	0,57
Lâmina 4	2	17226,81	19140,90	49,64	49,06	10,38	0,64
Lâmina 5	3	18475,17	20527,97	55,52	84,55	9,77	0,55

Fonte: Autor.

APÊNDICE C– Curvas obtidas nos ensaios experimentais dos elementos de MLC de pinus e eucalipto.

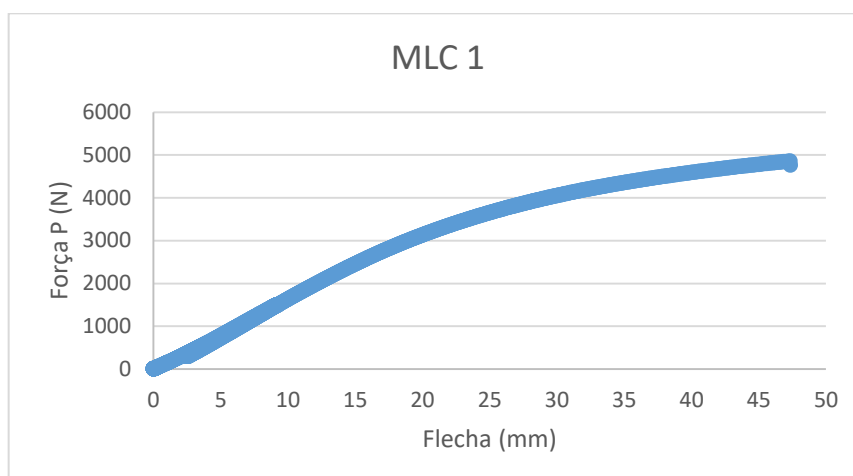


Figura C 1- Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 1 - pinus)

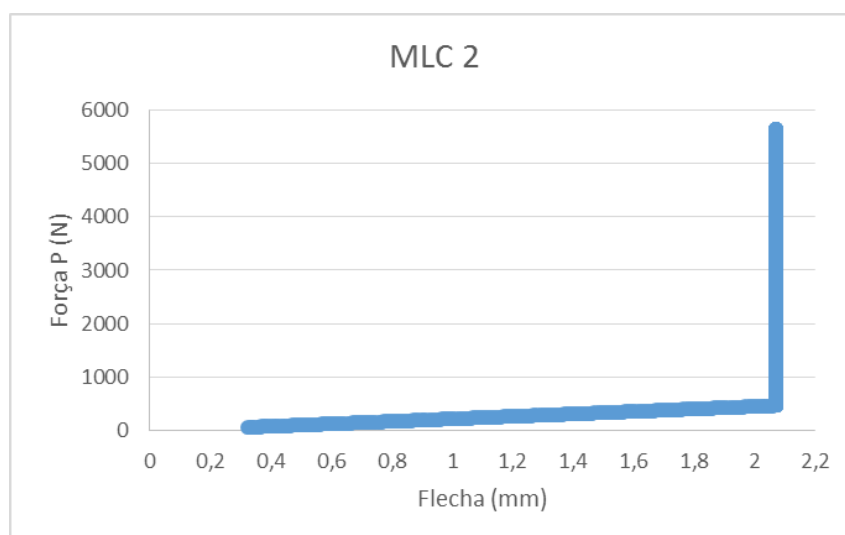


Figura C 2- Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 2 - pinus)

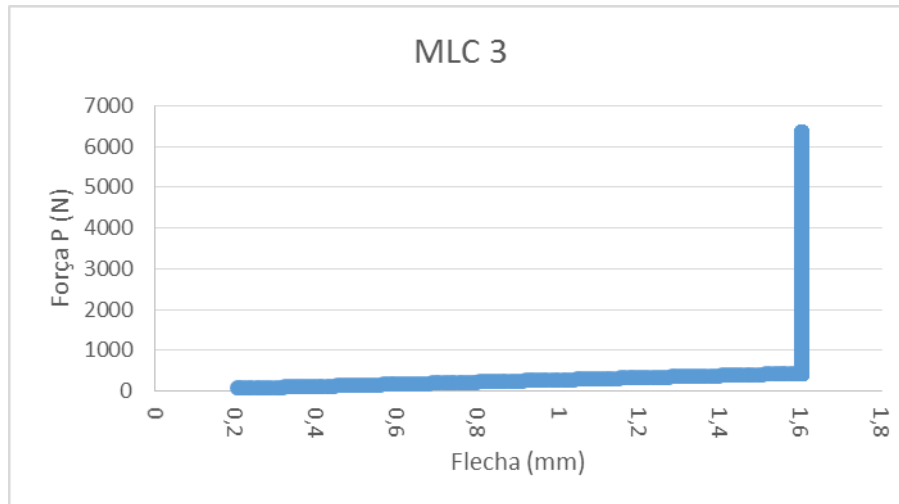


Figura C 3 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 3 - pinus).

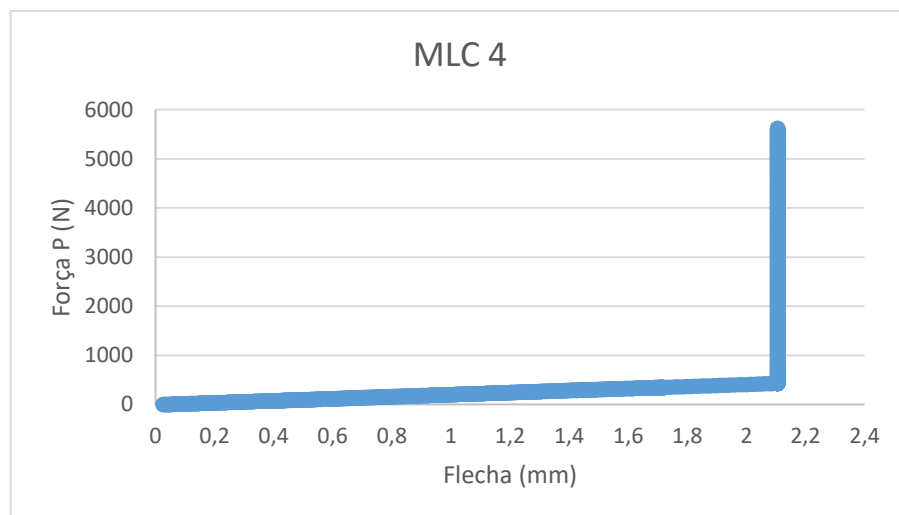


Figura C 4 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 4 - pinus).

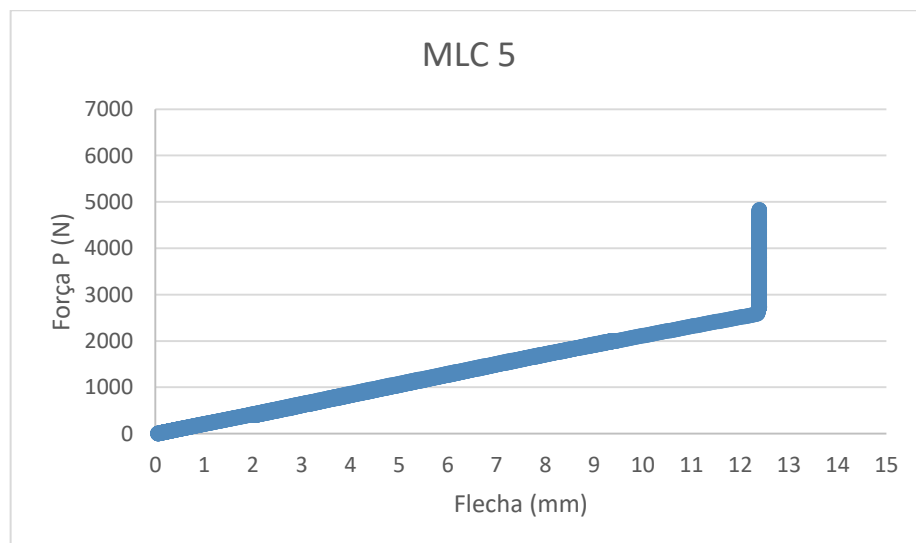


Figura C 5 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 5 - pinus).

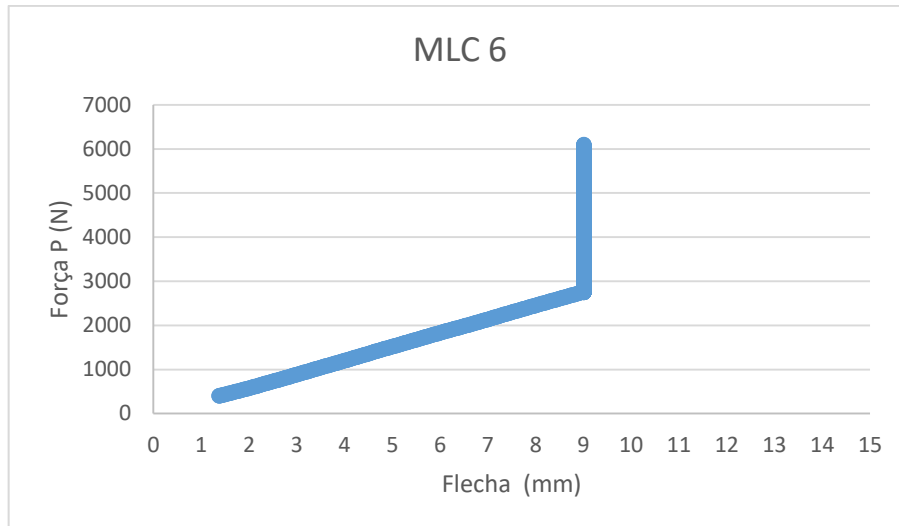


Figura C 6 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 6 - pinus).

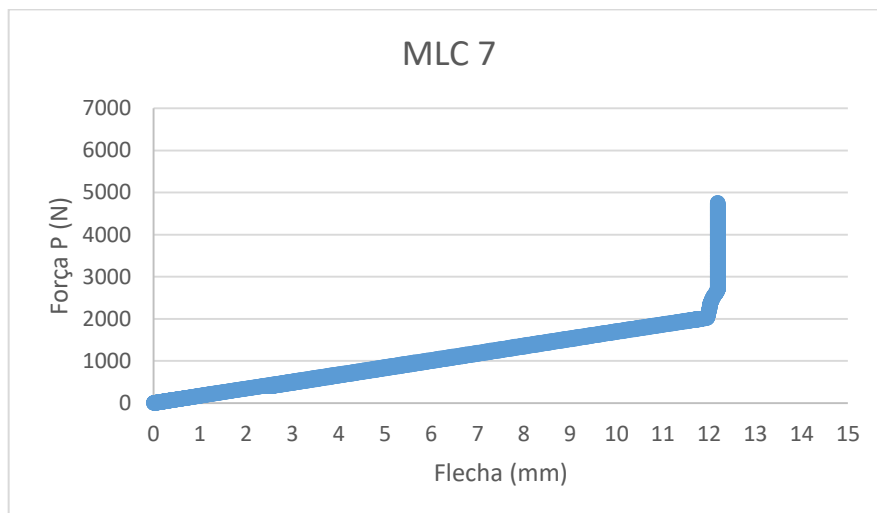


Figura C 7 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 7 - pinus).

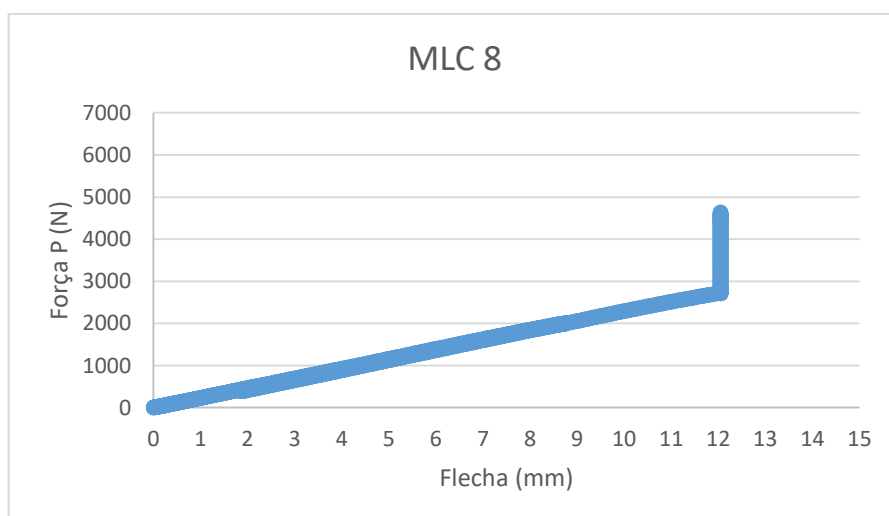


Figura C 8 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 8 - pinus).

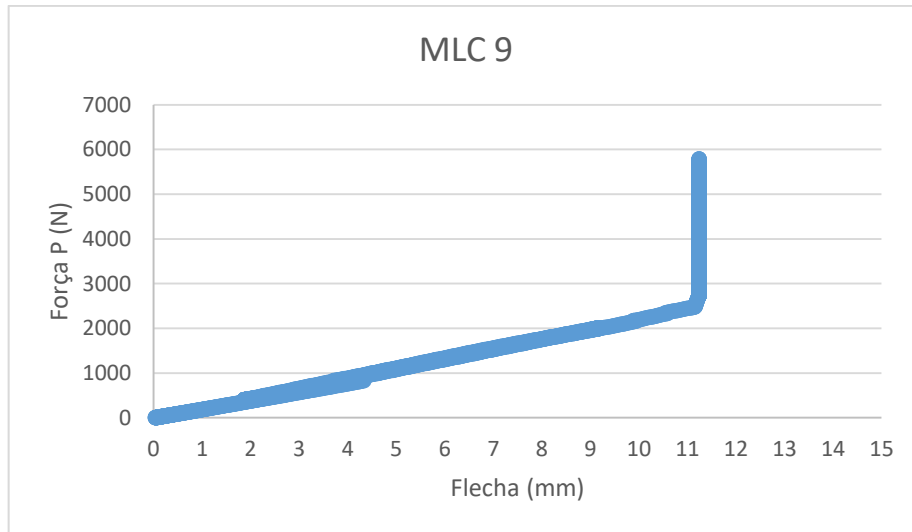


Figura C 9 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 9 - pinus).

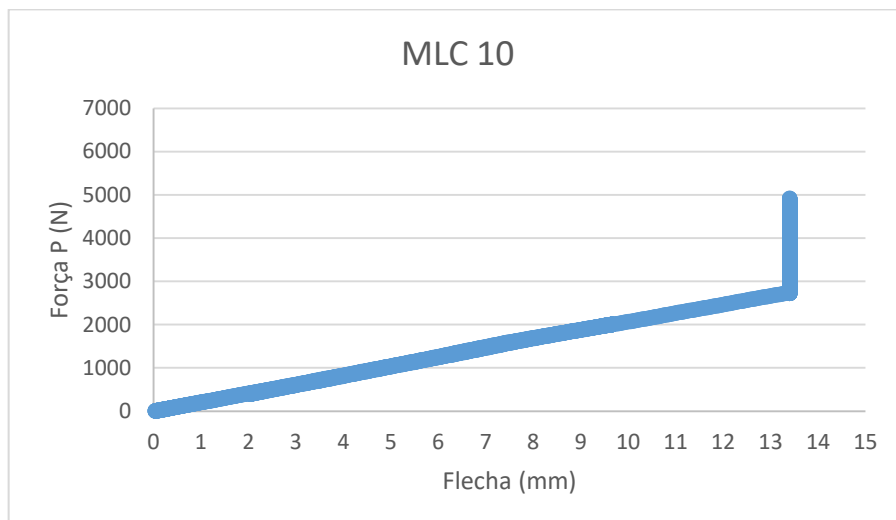


Figura C 10 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 10 - pinus).

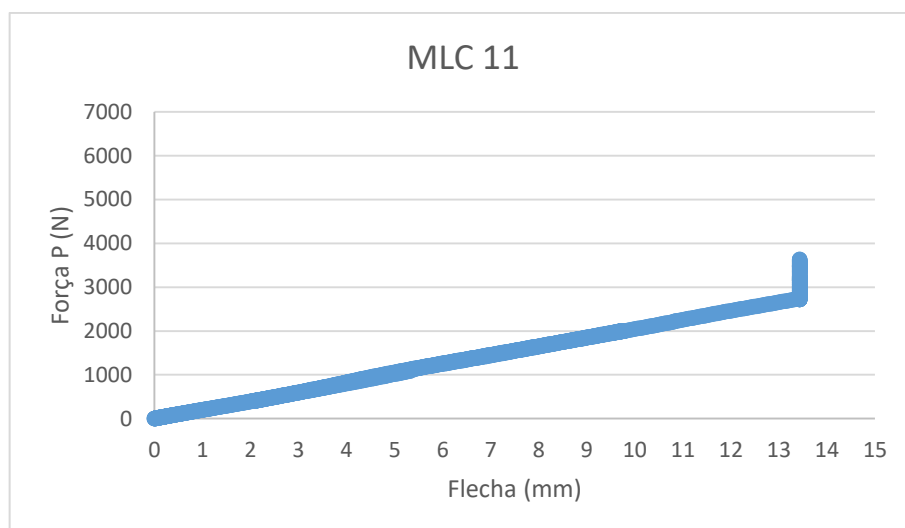


Figura C 11- Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 11 - pinus).

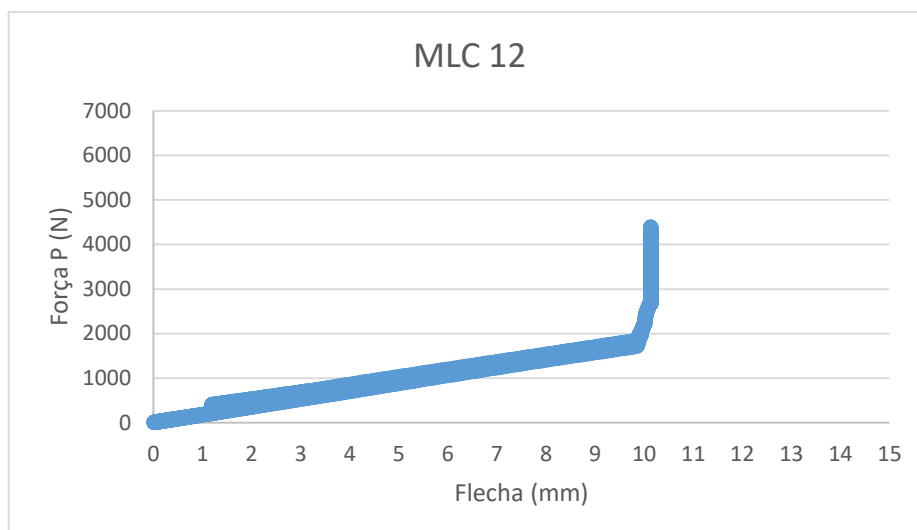


Figura C 12- Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 12 - pinus).

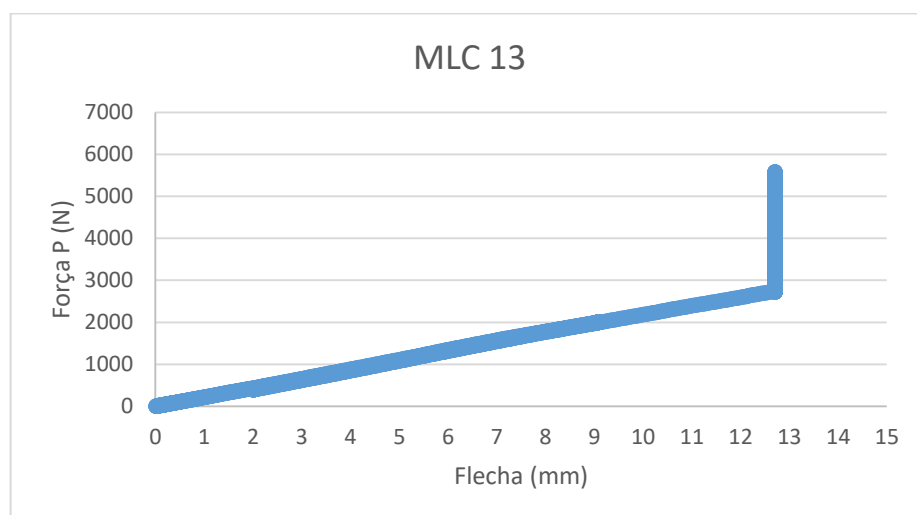


Figura C 13 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 13 - pinus).

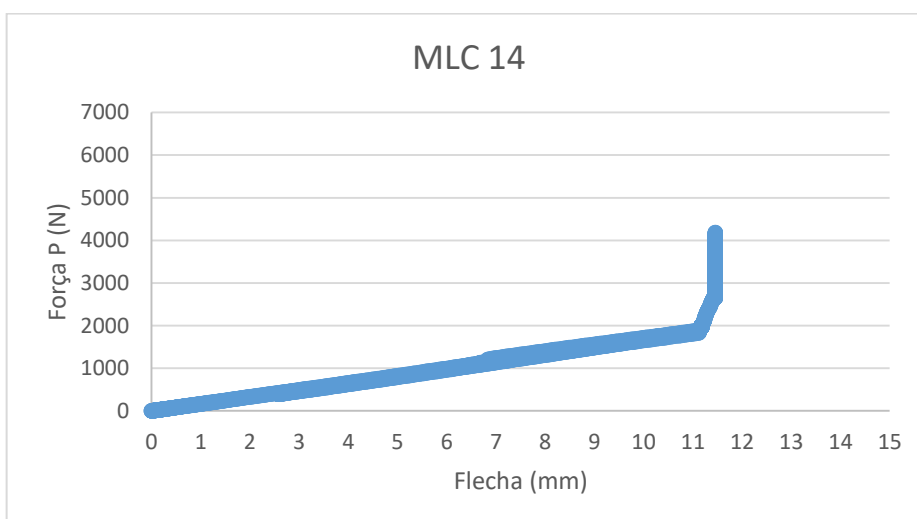


Figura C 14 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 14 - pinus).

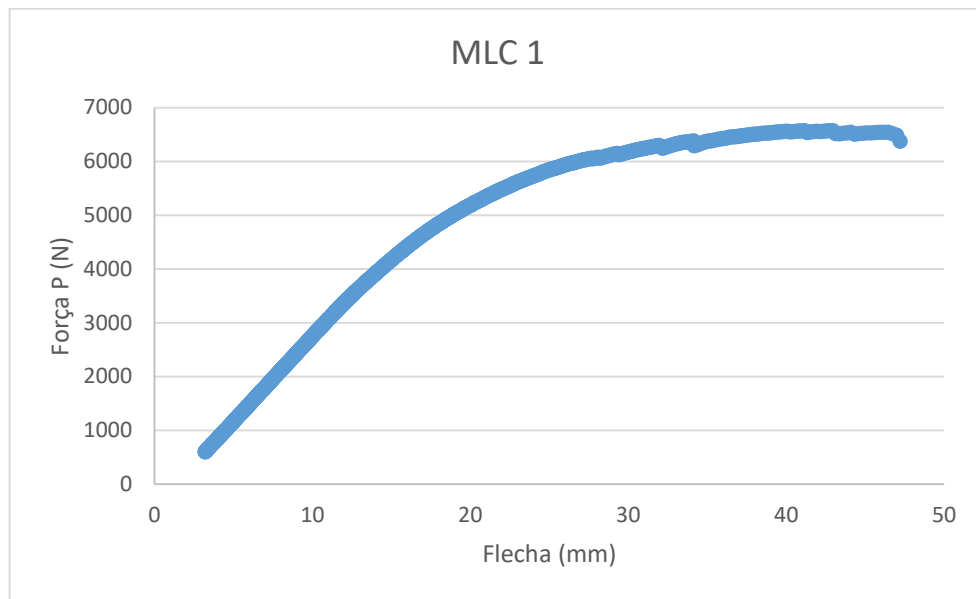


Figura C 15 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 1 - eucalipto).

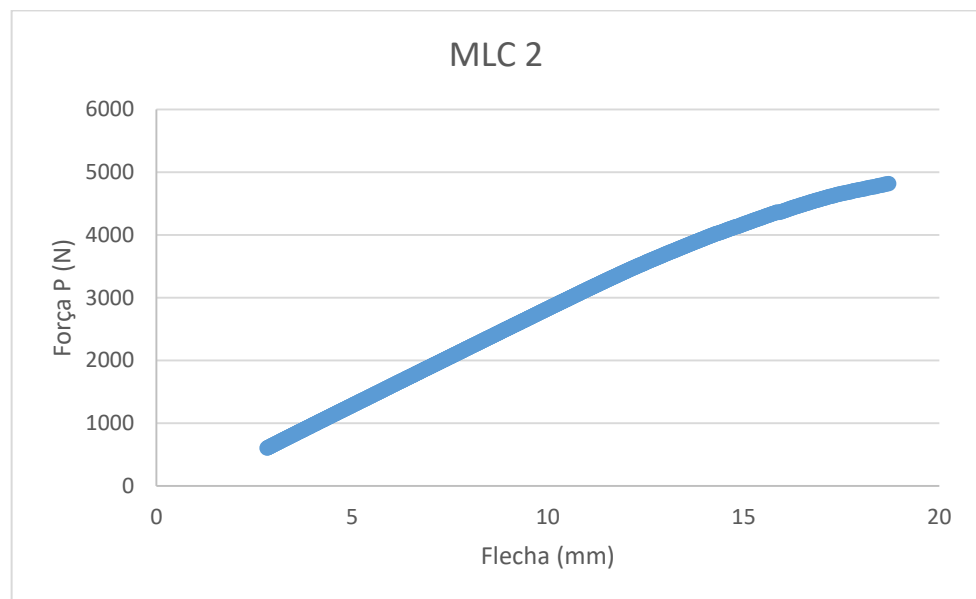


Figura C 16 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 2 - eucalipto).

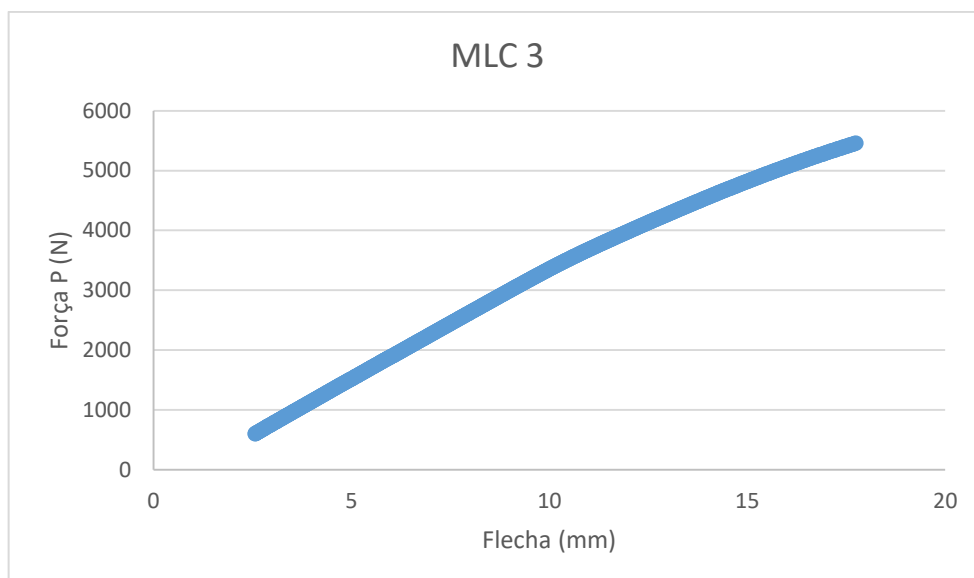


Figura C 17- Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 3 - eucalipto).

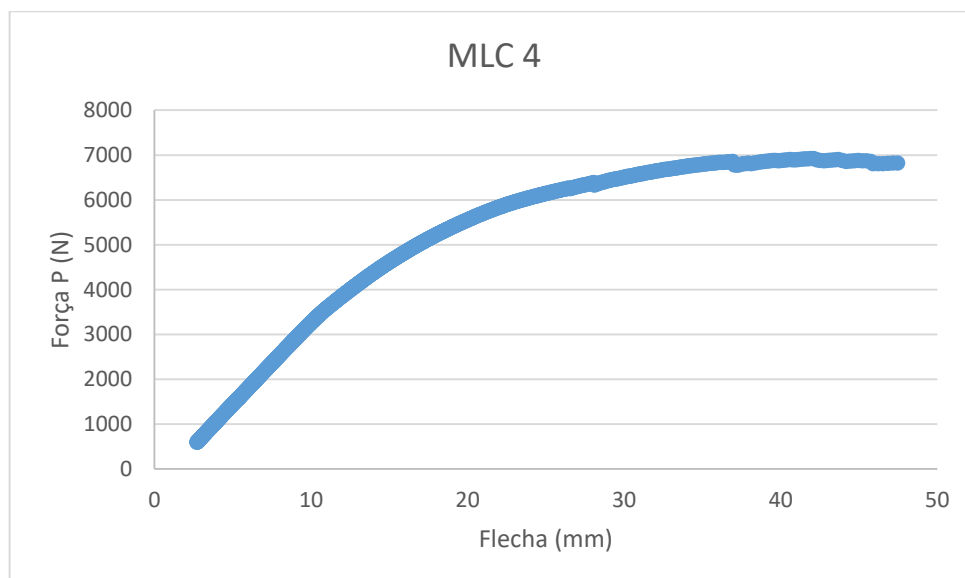


Figura C 18- Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 4 - eucalipto).

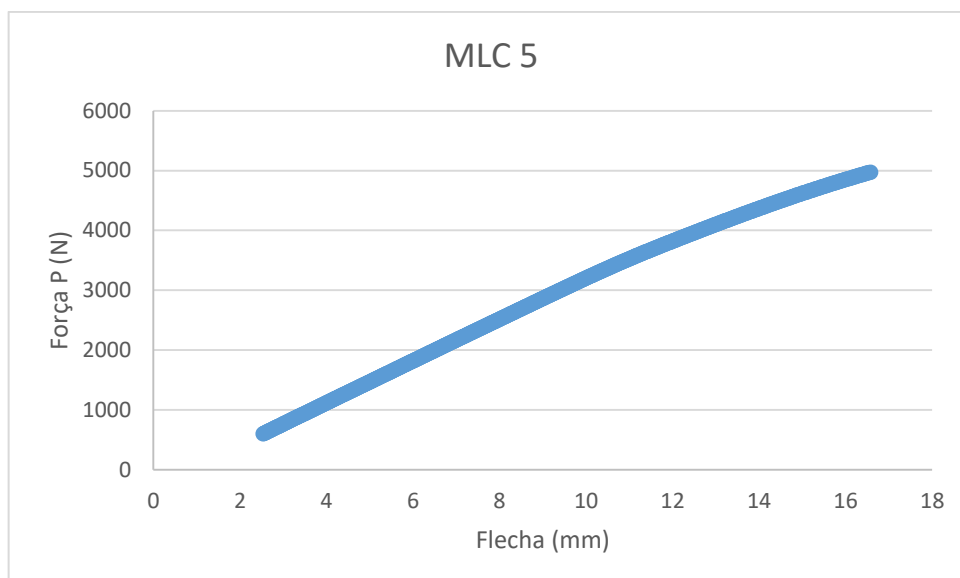


Figura C 19 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 5 - eucalipto).

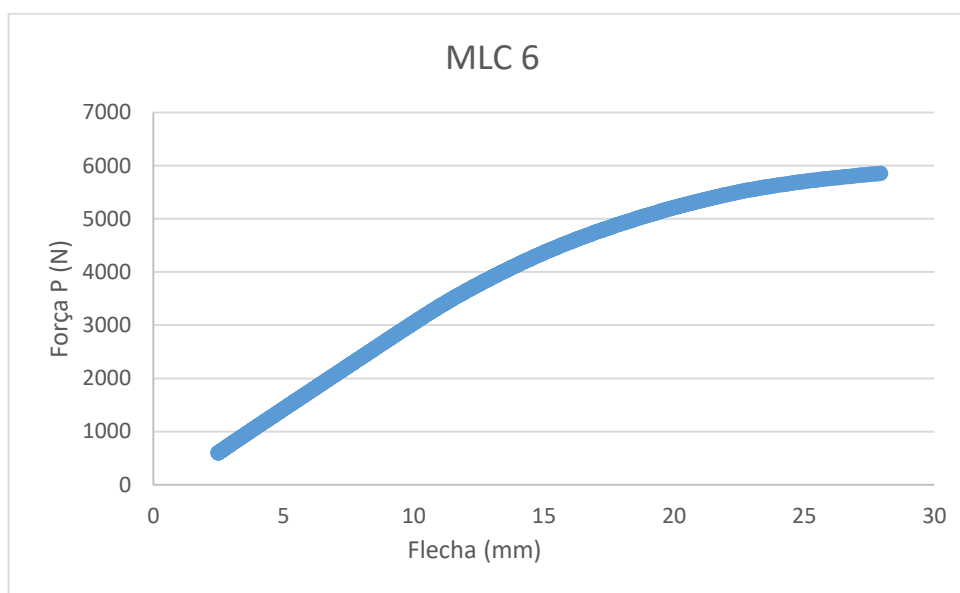


Figura C 20 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 6 - eucalipto).

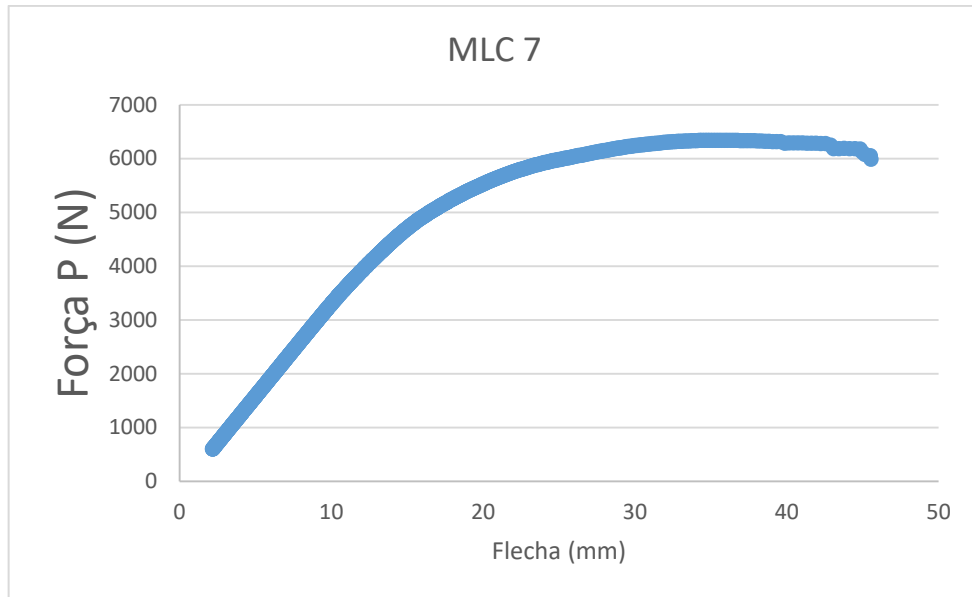


Figura C 21 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 7 - eucalipto).

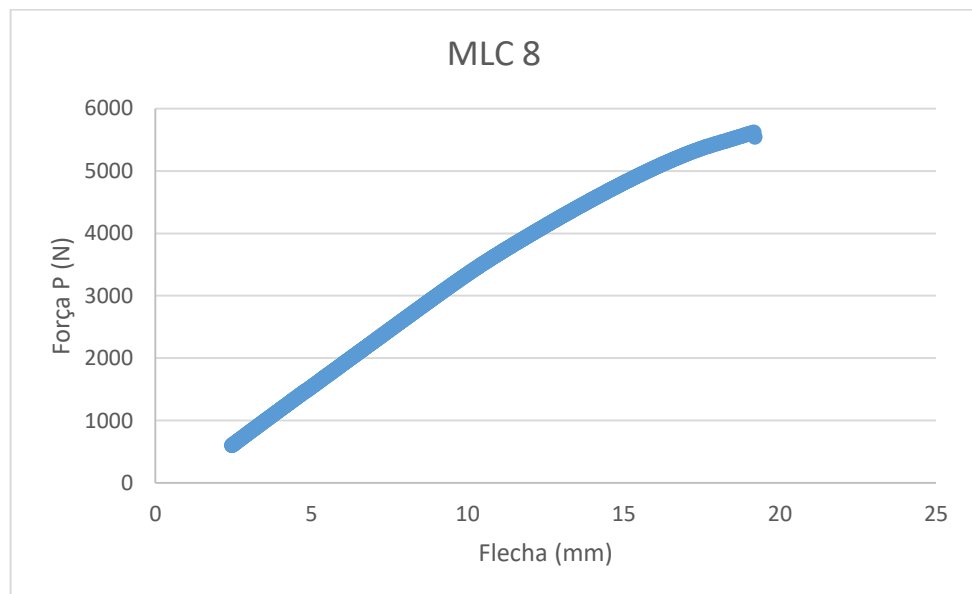


Figura C 22 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 8 - eucalipto).

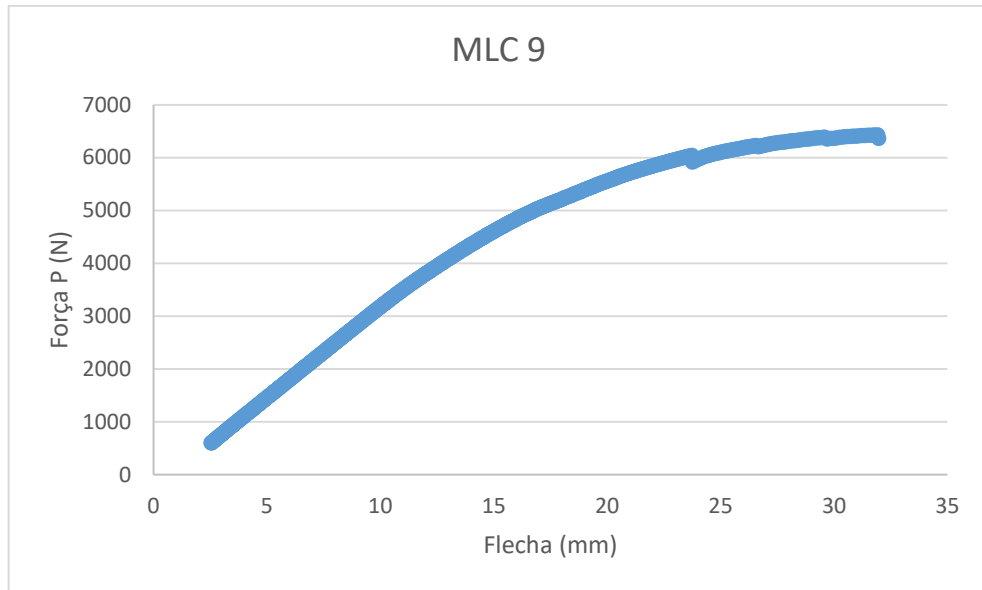


Figura C 23 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 9 - eucalipto).

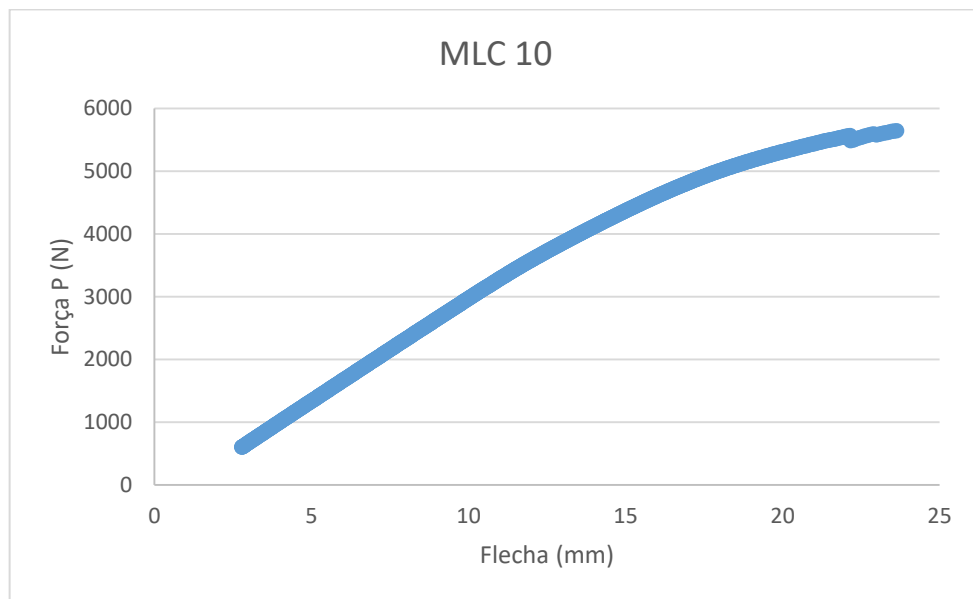


Figura C 24 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 10 - eucalipto).

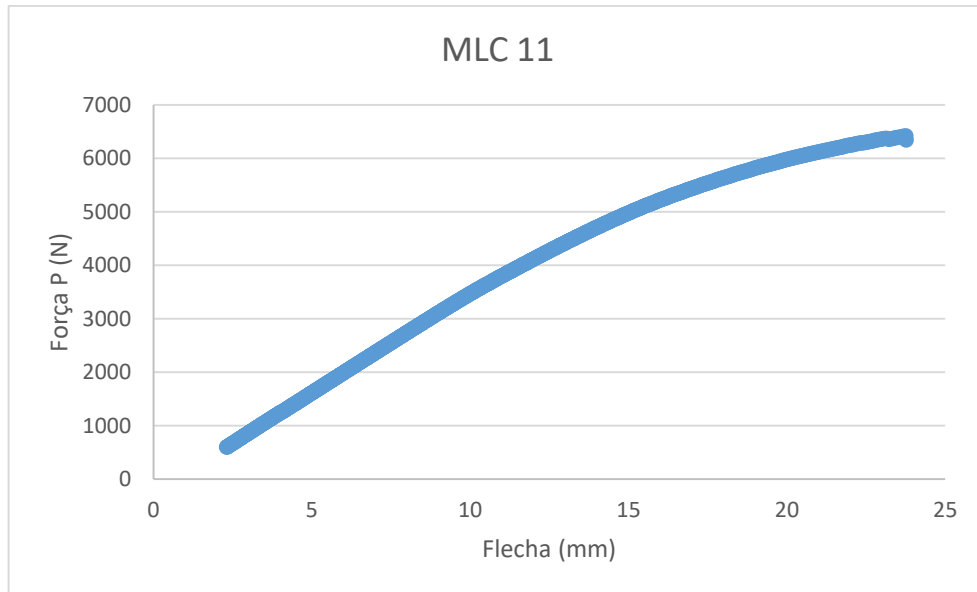


Figura C 25 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 11 - eucalipto).

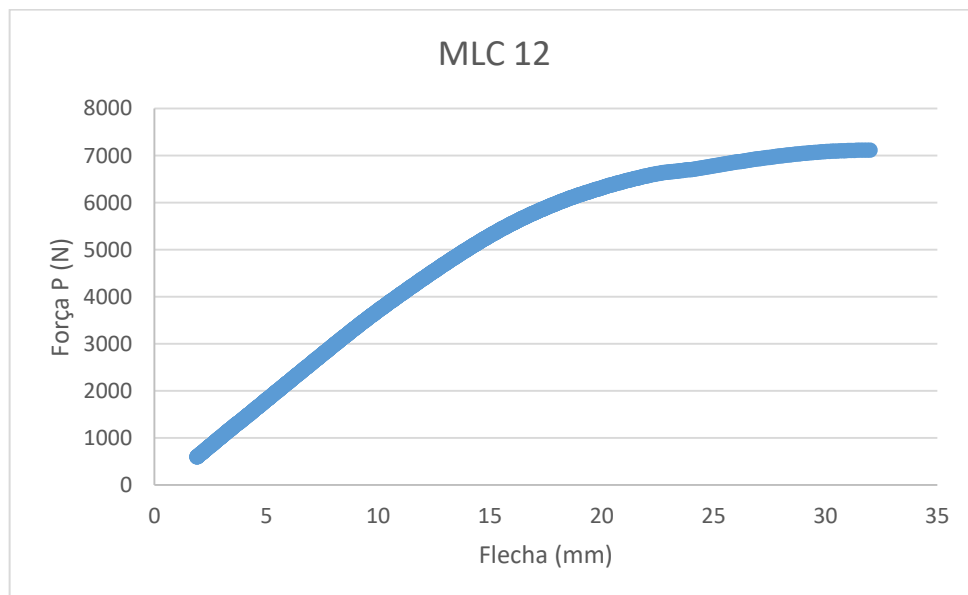


Figura C 26 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 12 - eucalipto).

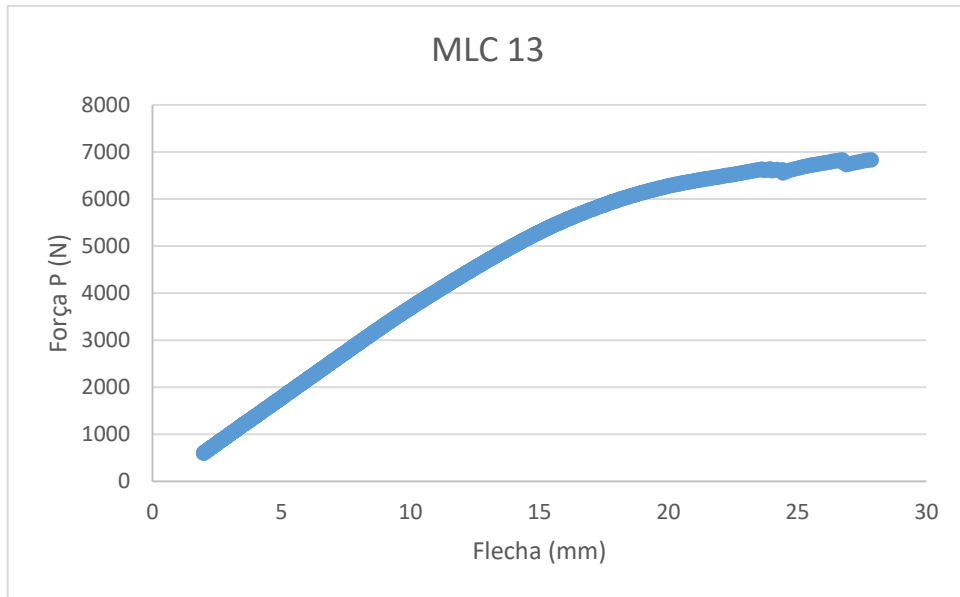


Figura C 27 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 13 - eucalipto).

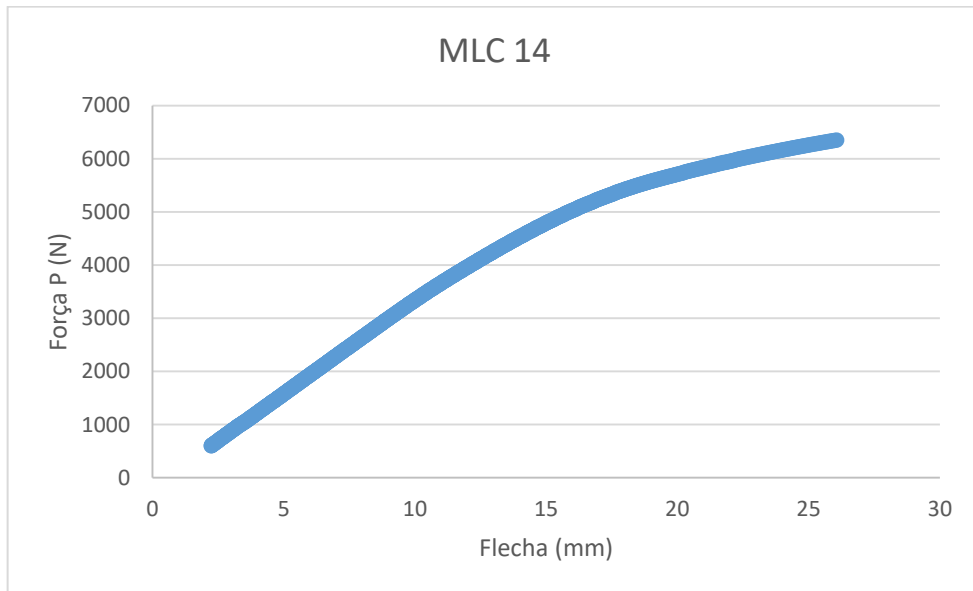


Figura C 28 - Curva Força x Flecha para o elemento (Viga 14 - eucalipto).

APÊNDICE D – Scripts utilizados para calibração dos modelos não lineares de pinus e eucalipto.

Na sequência está apresentado o script utilizado para a calibração do modelo não linear referente à viga 1 de pinus.

```

FINISH
/CLEAR

! *****
! MODELO 01: VIGA DE MADEIRA LAMINADA COLADA - pinus sp
! *****
! SCRIPT PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO
! PROGRAMA UTILIZADO: ANSYS - VERSÃO 11.0
! MALHA GERADA NO PRÓPRIO ANSYS
! SIMULAÇÃO DE VIGA COMPLETA COM MODELO ORTOTRÓPICO COM NÃO LINEARIDADE FÍSICA E GEOMÉTRICA
! Seção transversal: b = 5 cm h = 5 cm e L = 105 cm
! Total de 5 lâminas (Espessura de cada uma das lâminas = 1 cm)
! Simulação de ensaio estático da viga com força última aplicada de 495.56 kgf (no meio do vão)
! Carga última em 12 nós centrais
! Flecha limite considerada na análise linear no cálculo valor (EI)num: L/200 = 0.525 cm
! Direções adotadas para a madeira: direção x (tangencial); direção y (radial) e direção z (longitudinal)

! *****
! Unidades consideradas no modelo
! *****
! Dimensões em (cm)
! Forças aplicadas em (Kgf)

! *****
! Parâmetros auxiliares:
! *****
! Material 01: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 01 (superior)
! Material 02: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 02
! Material 03: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 03
! Material 04: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 04
! Material 05: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 05 (inferior)

! *****
! Indicação de diferentes cores para os elementos
! *****
/CONFIG,NRES,10000
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT

! *****
! OPÇÕES GERAIS
! *****
ALLSEL,ALL
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT

! *****
! Dados de entrada do material para cada uma das lâminas:
! *****
! Lâmina 1 (superior)
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
/PREP7
ET,1,SOLID45

! *****
! Criando a "Real Constant 1" para o elemento 1 (solid45)
! *****
R,1

! *****
! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:

```

```

! *****
! (Ez=90330.7 kgf/cm^2) e (Ex=Ey=Ez/10)
! (vyz = vxz); (G = Gxy = Gxz = Gyz = Ez/20)
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,9033.07
MPDATA,EY,1,,9033.07
MPDATA,EZ,1,,90330.7
MPDATA,PRXY,1,,0.23
MPDATA,PRYZ,1,,0.013
MPDATA,PRXZ,1,,0.013
MPDATA,GXY,1,,4516.535
MPDATA,GYZ,1,,4516.535
MPDATA,GXZ,1,,4516.535
! *****
! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos
! *****
! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (fc0 = Sz)
! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (Sy/Sz) = (Sx/Sz) = 0.19
! Etx = Etz= Etz/10 (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)
! Tensão de escoamento na compressão em z: Sz = 388.2 kgf/cm^2
! Tensão de escoamento no cisalhamento (Txy=Tyz = 0.38Sz = 147.516 kgf/cm^2) (Txz = 0.038 Sz = 14.7516 kgf/cm^2)
! Módulo tangente de corte: Gxy = Gyz = 180, Gxz = 0.180 com base em Molina (2008)
! *****
TBDE,ANIS,1
TB,ANIS,1,,0
TBMODIF,1,1,73.758
TBMODIF,1,2,73.758
TBMODIF,1,3,388.2

TBMODIF,2,1,41
TBMODIF,2,2,41
TBMODIF,2,3,2800

TBMODIF,3,1,73.758
TBMODIF,3,2,73.758
TBMODIF,3,3,388.2

TBMODIF,4,1,41
TBMODIF,4,2,41
TBMODIF,4,3,2800

TBMODIF,5,1,147.516
TBMODIF,5,2,147.516
TBMODIF,5,3,14.7516

TBMODIF,6,1,180
TBMODIF,6,2,180
TBMODIF,6,3,0.180
! *****
! Lâmina 2
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,2,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 2 para o elemento 2 (solid45)
! *****
R,2
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:
! *****
! (Ez=74834.9 kgf/cm^2) e (Ex=Ey=Ez/10)
! (vyz = vxz); (G = Gxy = Gxz = Gyz = Ez/20)
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,7483.49
MPDATA,EY,2,,7483.49
MPDATA,EZ,2,,74834.9

```


MPDATA,PRXY,2,,0.23
 MPDATA,PRYZ,2,,0.0013
 MPDATA,PRXZ,2,,0.0013
 MPDATA,GXY,2,,3741.745
 MPDATA,GYZ,2,,3741.745
 MPDATA,GXZ,2,,3741.745

! *****
 ! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos
 ! *****
 ! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (fc0)
 ! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (Sy/Sz) = (Sx/Sz) = 0.19
 ! $E_{tx} = E_{tz} = E_{tz}/10$ (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)
 ! Tensão de escoamento na compressão em z: $S_z = 366.6 \text{ kgf/cm}^2$
 ! Tensão de escoamento no cisalhamento ($T_{xy} = T_{yz} = 0.38 S_z = 139.308 \text{ kgf/cm}^2$) ($T_{xz} = 0.038 S_z = 13.9308 \text{ kgf/cm}^2$)
 ! Módulo tangente de corte: $G_{xy} = G_{yz} = 180, G_{xz} = 0.180$

! *****
 TBDE,ANIS,2
 TB,ANIS,2,,,0
 TBMODIF,1,1,69.654
 TBMODIF,1,2,69.654
 TBMODIF,1,3,366.6

TBMODIF,2,1,41
 TBMODIF,2,2,41
 TBMODIF,2,3,2800

TBMODIF,3,1,69.654
 TBMODIF,3,2,69.654
 TBMODIF,3,3,366.6

TBMODIF,4,1,41
 TBMODIF,4,2,41
 TBMODIF,4,3,2800

TBMODIF,5,1,139.308
 TBMODIF,5,2,139.308
 TBMODIF,5,3,13.9308

TBMODIF,6,1,180
 TBMODIF,6,2,180
 TBMODIF,6,3,0.180

! *****
 ! Lâmina 3
 ! *****
 ! Definição do elemento solid45:
 ! *****
 ET,3,SOLID45
 ! *****
 ! Criando a 'Real Constant 3 para o elemento 3 (solid45) - (Não aceita real constant)
 ! *****
 R,3

! *****
 ! Parâmetros elasticos para madeira e relações entre os mesmos:
 ! *****
 ! ($E_z = 51010.6 \text{ kgf/cm}^2$) e ($E_x = E_y = E_z/10$)
 ! ($\nu_{yz} = \nu_{xz}$); ($G = G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = E_z/20$)

! *****
 MPTEMP,,,,,,,,
 MPTEMP,1,0
 MPDATA,EX,3,,5101.06
 MPDATA,EY,3,,5101.06
 MPDATA,EZ,3,,51010.6
 MPDATA,PRXY,3,,0.23
 MPDATA,PRYZ,3,,0.0013
 MPDATA,PRXZ,3,,0.0013
 MPDATA,GXY,3,,2550.53
 MPDATA,GYZ,3,,2550.53
 MPDATA,GXZ,3,,2550.53

! *****
 ! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos

```

! *****
! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (fc0)
! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (Sy/Sz) = (Sx/Sz) = 0.19
! Etx = Etz= Etz/10 (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)
! Tensão de escoamento na compressão em z: Sz = 355.5 kgf/cm^2
! Tensão de escoamento no cisalhamento (Txy=Tyz = 0.38Sz = 135.09 kgf/cm^2) (Txz = 0.038 Sz = 13.509 kgf/cm^2)
! Módulo tangente de corte: Gxy = Gyz = 180, Gxz = 0.180

! *****
TBDE,ANIS,3
TB,ANIS,3,,0
TBMODIF,1,1,67.545
TBMODIF,1,2,67.545
TBMODIF,1,3,355.5

TBMODIF,2,1,41
TBMODIF,2,2,41
TBMODIF,2,3,2800

TBMODIF,3,1,67.545
TBMODIF,3,2,67.545
TBMODIF,3,3,355.5

TBMODIF,4,1,41
TBMODIF,4,2,41
TBMODIF,4,3,2800

TBMODIF,5,1,135.09
TBMODIF,5,2,135.09
TBMODIF,5,3,13.509

TBMODIF,6,1,180
TBMODIF,6,2,180
TBMODIF,6,3,0.180

! *****
! Lâmina 4 (superior)
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,4,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 4 para o elemento 4 (solid45)
! *****
R,4

! *****
! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:
! *****
! (Ez=90994.3 kgf/cm^2) e (Ex=Ey=Ez/10)
! (vyz = vxz); (G = Gxy = Gxz = Gyz = Ez/20)

! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,4,,9099.43
MPDATA,EY,4,,9099.43
MPDATA,EZ,4,,9099.43
MPDATA,PRXY,4,,0.23
MPDATA,PRYZ,4,,0.0013
MPDATA,PRXZ,4,,0.0013
MPDATA,GXY,4,,4549.715
MPDATA,GYZ,4,,4549.715
MPDATA,GXZ,4,,4549.715

! *****
! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos
! *****
! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (fc0)
! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (Sy/Sz) = (Sx/Sz) = 0.19
! Etx = Etz= Etz/10 (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)
! Tensão de escoamento na compressão em z: Sz = 388.2 kgf/cm^2
! Tensão de escoamento no cisalhamento (Txy=Tyz = 0.38Sz = 147.516 kgf/cm^2) (Txz = 0.038 Sz = 147.516 kgf/cm^2)
! Módulo tangente de corte: Gxy = Gyz = 180, Gxz = 0.180
! *****
TBDE,ANIS,4

```

TB,ANIS,4,,0
 TBMODIF,1,1,73.758
 TBMODIF,1,2,73.758
 TBMODIF,1,3,388.2

TBMODIF,2,1,41
 TBMODIF,2,2,41
 TBMODIF,2,3,2800

TBMODIF,3,1,73.758
 TBMODIF,3,2,73.758
 TBMODIF,3,3,388.2

TBMODIF,4,1,41
 TBMODIF,4,2,41
 TBMODIF,4,3,2800

TBMODIF,5,1,147.516
 TBMODIF,5,2,147.516
 TBMODIF,5,3,14.7516

TBMODIF,6,1,180
 TBMODIF,6,2,180
 TBMODIF,6,3,0.180

```
! *****
! Lâmina 5
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,5,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 5 para o elemento 5 (solid45)
! *****
R,5
```

```
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:
! *****
! (Ez=78316.3 kgf/cm^2) e (Ex=Ey=Ez/10)
! (vyz = vxz); (G = Gxy = Gxz = Gyz = Ez/20)
! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,5,,7831.63
MPDATA,EY,5,,7831.63
MPDATA,EZ,5,,78316.3
MPDATA,PRXY,5,,0.23
MPDATA,PRYZ,5,,0.0013
MPDATA,PRXZ,5,,0.0013
MPDATA,GXY,5,,3915.82
MPDATA,GYZ,5,,3915.82
MPDATA,GXZ,5,,3915.82
```

```
! *****
! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos
! *****
! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (fc0)
! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (Sy/Sz) = (Sx/Sz) = 0.19
! Etx = Ety = Etz/10 (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)
! Tensão de escoamento na compressão em z: Sz = 355.5 kgf/cm^2
! Tensão de escoamento no cisalhamento (Txy=Tyz = 0.38Sz = 135.09 kgf/cm^2) (Txz = 0.038 Sz = 13.509 kgf/cm^2)
! Módulo tangente de corte: Gxy = Gyz = 180, Gxz = 0.180
! *****
TBDE,ANIS,5
TB,ANIS,5,,0
TBMODIF,1,1,67.545
TBMODIF,1,2,67.545
TBMODIF,1,3,355.5
```

TBMODIF,2,1,41
 TBMODIF,2,2,41
 TBMODIF,2,3,2800

TBMODIF,3,1,67.545
 TBMODIF,3,2,67.545

TBMODIF,3,3,355.5

TBMODIF,4,1,41
TBMODIF,4,2,41
TBMODIF,4,3,2800

TBMODIF,5,1,135.09
TBMODIF,5,2,135.09
TBMODIF,5,3,13.509

TBMODIF,6,1,180
TBMODIF,6,2,180
TBMODIF,6,3,0.180

```

! *****
! Construção e discretização da malha de elementos finitos
! *****
! LÂMINA 01
! *****
! Criação do bloco 01 - Lamina 01 (inferior) - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (0<y<1cm)
! *****
BLOCK,0,5,0,1,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 1 ao volume criado para formar a lâmina 1
! *****
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da lâmina 1 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,2
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,1, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,11
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , ,1
!*
/ULMESH,OFF
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

```

```

! *****
! LÂMINA 02
! *****
! Criação do bloco 02 - Lamina 02 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (1<y<2cm)
! *****
BLOCK,0,5,1,2,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 02 ao volume criado para formar a lâmina 02
! *****
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da lâmina 2 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,14
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,15
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,1, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,23
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , , ,1
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! LÂMINA 03
! *****
! Criação do bloco 02 - Lamina 03 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (2<y<3cm)
! *****
BLOCK,0,5,2,3,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 03 ao volume criado para formar a lâmina 03
! *****
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2

```

```

ESYS, 0
SECNUM,
TYPE, 3
MAT, 3
REAL, 3
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da lâmina 3 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,35
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,Y
!*
LESIZE,_Y1,,,105,,,,,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,26
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,Y
!*
LESIZE,_Y1,,,5,,,,,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,27
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,Y
!*
LESIZE,_Y1,,,2,,,,,1
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! LÂMINA 04
! *****
! Criação do bloco 04 - Lamina 04 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (3<y<4cm)
! *****
BLOCK,0,5,3,4,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 04 ao volume criado para formar a lâmina 03
! *****
TYPE, 4
MAT, 4
REAL, 4
ESYS, 0
SECNUM,
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,9
FITEM,5,35
FITEM,5,47

```

```

CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,47
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,, ,105,, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,38
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,, ,5,, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,39
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,, ,2,, , , ,1
!*
/VIEW,1,, ,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 4
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! LÂMINA 05
! *****
! Criação do bloco 05 - Lamina 05 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (4<y<5cm)
! *****
BLOCK,0,5,4,5,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 04 ao volume criado para formar a lâmina 03
! *****
TYPE, 5
MAT, 5
REAL, 5
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da lâmina 5 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,59
CM,_Y,LINE
LSEL,, ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y

```

```

!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,50
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,51
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,2, , , ,1
!*
/VIEW,1, , ,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , 5
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! Definir merge no volume para que as lâminas tenham seus nós unidos
! *****
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , , low

! *****
! Vinculação dos apoios
! *****
! Seleção dos nós das extremidades (z=105) - Impedimento das translações nos eixos x, y
! *****
FLST,2,6,1,ORDE,4
FITEM,2,2
FITEM,2,10
FITEM,2,13
FITEM,2,-16
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY, , , ,

FLST,2,6,1,ORDE,2
FITEM,2,25
FITEM,2,-30
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY,UZ, , ,

! *****
! Seleção dos nós da face superior e aplicação do carregamento correspondente na direção y
! *****
! Carregamento nos terços do vão (F=-495.56 kgf/número de nós): Fz=- 495.56 kgf/12nós = 41.2966666667 kgf/nó
! *****
! Pontos de aplicação das cargas: z = 52.0 cm e z = 53.0 - faixa 1 (meio da peça)

```



```

! *****
! Faixa 1 (52 < z < 53):Fz=- 495.56 kgf/12nós = 41.2966666667 kgf/nó
! Sinal negativo indica que a carga está aplicada no sentido contrário ao sentido positivo de y
! *****
/SOLU
FLST,2,12,1,ORDE,12
FITEM,2,10900
FITEM,2,-10901
FITEM,2,11004
FITEM,2,-11005
FITEM,2,11108
FITEM,2,-11109
FITEM,2,11212
FITEM,2,-11213
FITEM,2,11316
FITEM,2,-11317
FITEM,2,11420
FITEM,2,-11421
!*
/GO
F,P51X,FY,-41.2966666667

! *****
! Consideração da não linearidade física do material
! *****
! Aplicação dos valores de carga incremental aplicados no modelo até a ruptura
! *****
! Carga de ruptura aplica no ensaio de flexão: F= 495.56 kgf
! Tamanho do passo de carga F1: F/20 (F=24.778 kgf)
! Valor mínimo do passo de carga F2: F1/5 (4.9556 kgf)
! Valor máximo do passo de carga F3: F1 (F=24.778 kgf)
! *****
!*
/SOLU
DELTIM,24.778,4.9556,24.778
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
TIME,495.56

! *****
! Rodar o modelo
! *****
/SOLU
SOLVE
SAVE
FINISH

```

Na sequência está apresentado o script utilizado para a calibração do modelo não linear referente à viga 1 de eucalipto.

```
FINISH
/CLEAR
```

```
! *****
! MODELO 01: VIGA DE MADEIRA LAMINADA COLADA - eucalipto
! *****
! SCRIPT PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO
! PROGRAMA UTILIZADO: ANSYS - VERSÃO 11.0
! MALHA GERADA NO PRÓPRIO ANSYS
! SIMULAÇÃO DE VIGA COMPLETA COM MODELO ORTOTRÓPICO COM NÃO LINEARIDADE FÍSICA E GEOMÉTRICA
! Seção transversal: b = 5 cm h = 5 cm e L = 105 cm
! Total de 5 lâminas (Espessura de cada uma das lâminas = 1 cm)
! Simulação de ensaio estático da viga com força última aplicada de 670,0596 kgf (no meio do vão)
! Carga última em 12 nós centrais
! Flecha limite considerada na análise linear no cálcudo valor (EI)num: L/200 = 0.525 cm
! Direções adotadas para a madeira: direção x (tangencial); direção y (radial) e direção z (longitudinal)

! *****
! Unidades consideradas no modelo
! *****
! Dimensões em (cm)
! Forças aplicadas em (Kgf)

! *****
! Parâmetros auxiliares:
! *****
! Material 01: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 01 (superior)
! Material 02: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 02
! Material 03: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 03
! Material 04: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 04
! Material 05: Madeira (solid 45) - ortotrópico - Lamina 05 (inferior)

! *****
! Indicação de diferentes cores para os elementos
! *****
/CONFIG,NRES,10000
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT

! *****
! OPÇÕES GERAIS
! *****
ALLSEL,ALL
/PNUM,MAT,1
/NUMBER,1
/REPLOT

! *****
! Dados de entrada do material para cada uma das lâminas:
! *****
! Lâmina 1 (superior)
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
/PREP7
ET,1,SOLID45

! *****
! Criando a "Real Constant 1" para o elemento 1 (solid45)
! *****
R,1

! *****
! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:
! *****
! (Ez=189374.465 kgf/cm^2) e (Ex=Ey=Ez/10)
! (vyz = vxz); (G = Gxy = Gxz = Gyz = Ez/20)

! *****
```

```

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,18937.4465
MPDATA,EY,1,,18937.4465
MPDATA,EZ,1,,18937.4465
MPDATA,PRXY,1,,0.23
MPDATA,PRYZ,1,,0.013
MPDATA,PRXZ,1,,0.013
MPDATA,GXY,1,,37874.892
MPDATA,GYZ,1,,37874.892
MPDATA,GXZ,1,,37874.892

```

```

! *****
! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos
! *****
! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental ( $f_{c0} = S_z$ )
! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y:  $(S_y/S_z) = (S_x/S_z) = 0.19$ 
!  $E_{tx} = E_{tz} = E_{tz}/10$  (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)
! Tensão de escoamento na compressão em z:  $S_z = 542.25 \text{ kgf/cm}^2$ 
! Tensão de escoamento no cisalhamento ( $T_{xy} = T_{yz} = 0.38S_z = 206.055 \text{ kgf/cm}^2$ ) ( $T_{xz} = 0.038 S_z = 20.6055 \text{ kgf/cm}^2$ )
! Módulo tangente de corte:  $G_{xy} = G_{yz} = 180$ ,  $G_{xz} = 0.180$  com base em Molina (2008)
! *****

```

```

TBDE,ANIS,1
TB,ANIS,1,,0
TBMODIF,1,1,103.0275
TBMODIF,1,2,103.0275
TBMODIF,1,3,542.25

```

```

TBMODIF,2,1,41
TBMODIF,2,2,41
TBMODIF,2,3,2800

```

```

TBMODIF,3,1,103.0275
TBMODIF,3,2,103.0275
TBMODIF,3,3,542.25

```

```

TBMODIF,4,1,41
TBMODIF,4,2,41
TBMODIF,4,3,2800

```

```

TBMODIF,5,1,206.055
TBMODIF,5,2,206.055
TBMODIF,5,3,20.6055

```

```

TBMODIF,6,1,180
TBMODIF,6,2,180
TBMODIF,6,3,0.180

```

```

! *****
! Lâmina 2
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,2,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 2 para o elemento 2 (solid45)
! *****
R,2

```

```

! *****
! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:
! *****
! ( $E_z = 165065.44 \text{ kgf/cm}^2$ ) e ( $E_x = E_y = E_z/10$ )
! ( $\nu_{yz} = \nu_{xz}$ ); ( $G = G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = E_z/20$ )

```

```

! *****
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,2,,16506.544
MPDATA,EY,2,,16506.544
MPDATA,EZ,2,,16506.544
MPDATA,PRXY,2,,0.23
MPDATA,PRYZ,2,,0.0013
MPDATA,PRXZ,2,,0.0013
MPDATA,GXY,2,,8253.272
MPDATA,GYZ,2,,8253.272

```

MPDATA,GXZ,2,,8253.272

```
! *****
! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos
! *****
! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (fc0)
! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (Sy/Sz) = (Sx/Sz) = 0.19
! Etx = Etz= Etz/10 (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)
! Tensão de escoamento na compressão em z: Sz = 647.76 kgf/cm^2
! Tensão de escoamento no cisalhamento (Txy=Tyz = 0.38Sz = 246.1488 kgf/cm^2) (Txz = 0.038 Sz = 24.61488 kgf/cm^2)
! Módulo tangente de corte: Gxy = Gyz = 180, Gxz = 0.180
```

! *****

```
TBDE,ANIS,2
TB,ANIS,2,,0
TBMODIF,1,1,123.0744
TBMODIF,1,2,123.0744
TBMODIF,1,3,647.76
```

```
TBMODIF,2,1,41
TBMODIF,2,2,41
TBMODIF,2,3,2800
```

```
TBMODIF,3,1,123.0744
TBMODIF,3,2,123.0744
TBMODIF,3,3,647.76
```

```
TBMODIF,4,1,41
TBMODIF,4,2,41
TBMODIF,4,3,2800
```

```
TBMODIF,5,1,246.1488
TBMODIF,5,2,246.1488
TBMODIF,5,3,24.61488
```

```
TBMODIF,6,1,180
TBMODIF,6,2,180
TBMODIF,6,3,0.180
```

! *****

! Lâmina 3

! *****

! Definição do elemento solid45:

! *****

ET,3,SOLID45

! *****

! Criando a "Real Constant 3 para o elemento 3 (solid45) - (Não aceita real constant)

! *****

R,3

! *****

! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:

! *****

! (Ez=147127.71 kgf/cm^2) e (Ex=Ey=Ez/10)

! (vyz = vxz); (G = Gxy = Gxz = Gyz = Ez/20)

! *****

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,3,,14712.771

MPDATA,EY,3,,14712.771

MPDATA,EZ,3,,147127.71

MPDATA,PRXY,3,,0.23

MPDATA,PRYZ,3,,0.0013

MPDATA,PRXZ,3,,0.0013

MPDATA,GXY,3,,7356.3855

MPDATA,GYZ,3,,7356.3855

MPDATA,GXZ,3,,7356.3855

! *****

! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos

! *****

! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (fc0)

! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (Sy/Sz) = (Sx/Sz) = 0.19

! Etx = Etz= Etz/10 (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)

! Tensão de escoamento na compressão em z: Sz = 483.18 kgf/cm^2

! Tensão de escoamento no cisalhamento ($T_{xy}=T_{yz} = 0.38S_z = 183.6084 \text{ kgf/cm}^2$) ($T_{xz} = 0.038 S_z = 18.36084 \text{ kgf/cm}^2$)
! Módulo tangente de corte: $G_{xy} = G_{yz} = 180$, $G_{xz} = 0.180$

! *****

TBDE,ANIS,3
TB,ANIS,3,,0
TBMODIF,1,1,91.8042
TBMODIF,1,2,91.8042
TBMODIF,1,3,483.18

TBMODIF,2,1,41
TBMODIF,2,2,41
TBMODIF,2,3,2800

TBMODIF,3,1,91.8042
TBMODIF,3,2,91.8042
TBMODIF,3,3,483.18

TBMODIF,4,1,41
TBMODIF,4,2,41
TBMODIF,4,3,2800

TBMODIF,5,1,183.6084
TBMODIF,5,2,183.6084
TBMODIF,5,3,18.36084

TBMODIF,6,1,180
TBMODIF,6,2,180
TBMODIF,6,3,0.180

! *****

! Lâmina 4 (superior)

! *****

! Definição do elemento solid45:

! *****

ET,4,SOLID45

! *****

! Criando a "Real Constant 4 para o elemento 4 (solid45)

! *****

R,4

! *****

! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:

! *****

! ($E_z = 154361.07 \text{ kgf/cm}^2$) e ($E_x = E_y = E_z/10$)

! ($\nu_{yz} = \nu_{xz}$); ($G = G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = E_z/20$)

! *****

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,4,,15436.107

MPDATA,EY,4,,15436.107

MPDATA,EZ,4,,154361.07

MPDATA,PRXY,4,,0.23

MPDATA,PRYZ,4,,0.0013

MPDATA,PRXZ,4,,0.0013

MPDATA,GXY,4,,7718.0535

MPDATA,GYZ,4,,7718.0535

MPDATA,GXZ,4,,7718.0535

! *****

! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos

! *****

! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (f_c0)

! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (S_y/S_z) = (S_x/S_z) = 0.19

! $E_{tx} = E_{tz} = E_z/10$ (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)

! Tensão de escoamento na compressão em z: $S_z = 506.22 \text{ kgf/cm}^2$

! Tensão de escoamento no cisalhamento ($T_{xy}=T_{yz} = 0.38S_z = 192.3636 \text{ kgf/cm}^2$) ($T_{xz} = 0.038 S_z = 19.23636 \text{ kgf/cm}^2$)

! Módulo tangente de corte: $G_{xy} = G_{yz} = 180$, $G_{xz} = 0.180$

! *****

TBDE,ANIS,4

TB,ANIS,4,,0

TBMODIF,1,1,96.1818

TBMODIF,1,2,96.1818

TBMODIF,1,3,506.22

TBMODIF,2,1,41
 TBMODIF,2,2,41
 TBMODIF,2,3,2800

TBMODIF,3,1,96.1818
 TBMODIF,3,2,96.1818
 TBMODIF,3,3,506.22

TBMODIF,4,1,41
 TBMODIF,4,2,41
 TBMODIF,4,3,2800

TBMODIF,5,1,192.3636
 TBMODIF,5,2,192.3636
 TBMODIF,5,3,19.23636

TBMODIF,6,1,180
 TBMODIF,6,2,180
 TBMODIF,6,3,0.180

```
! *****
! Lâmina 5
! *****
! Definição do elemento solid45:
! *****
ET,5,SOLID45
! *****
! Criando a "Real Constant 5 para o elemento 5 (solid45)
! *****
R,5
```

```
! *****
! Parâmetros elásticos para madeira e relações entre os mesmos:
! *****
! (Ez=177175.49 kgf/cm^2) e (Ex=Ey=Ez/10)
! (vyz = vxz); (G = Gxy = Gxz = Gyz = Ez/20)
! *****
MPTEMP,.....
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,5,,17717.549
MPDATA,EY,5,,17717.549
MPDATA,EZ,5,,177175.49
MPDATA,PRXY,5,,0.23
MPDATA,PRYZ,5,,0.0013
MPDATA,PRXZ,5,,0.0013
MPDATA,GXY,5,,8858.7745
MPDATA,GYZ,5,,8858.7745
MPDATA,GXZ,5,,8858.7745
```

```
! *****
! Definição dos parâmetros plásticos para a madeira e relações entre os mesmos
! *****
! Tensão de escoamento na tração e compressão em z = tensão de compressão experimental (fc0)
! Tensão de escoamento na tração e compressão em x e y: (Sy/Sz) = (Sx/Sz) = 0.19
! Etz = Etz= Etz/10 (mesmo módulo tangente admitido para tração e compressão) com base em Molina (2008)
! Tensão de escoamento na compressão em z: Sz = 439.36 kgf/cm^2
! Tensão de escoamento no cisalhamento (Txy=Tyz = 0.38Sz = 166.9568 kgf/cm^2) (Txz = 0.038 Sz = 16.69568 kgf/cm^2)
! Módulo tangente de corte: Gxy = Gyz = 180, Gxz = 0.180
! *****
```

TBDE,ANIS,5
 TB,ANIS,5,,0
 TBMODIF,1,1,83.4784
 TBMODIF,1,2,83.4784
 TBMODIF,1,3,439.36

TBMODIF,2,1,41
 TBMODIF,2,2,41
 TBMODIF,2,3,2800

TBMODIF,3,1,83.4784
 TBMODIF,3,2,83.4784
 TBMODIF,3,3,439.36

TBMODIF,4,1,41
 TBMODIF,4,2,41
 TBMODIF,4,3,2800

TBMODIF,5,1,166.9568
 TBMODIF,5,2,166.9568
 TBMODIF,5,3,16.69568

TBMODIF,6,1,180
 TBMODIF,6,2,180
 TBMODIF,6,3,0.180

```

! *****
! Construção e discretização da malha de elementos finitos
! *****
! LÂMINA 01
! *****
! Criação do bloco 01 - Lamina 01 (inferior) - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (0<y<1cm)
! *****
BLOCK,0,5,0,1,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 1 ao volume criado para formar a lâmina 1
! *****
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 1
ESYS, 0
SECTNUM,
! *****
! Dividindo a malha da lâmina 1 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,2
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,.5,,,,,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,.1,,,,,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,11
CM,_Y,LINE
LSEL,,,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1,,.105,,,,,1
!*
/UL,MESH,OFF
CM,_Y,VOLU
VSEL,,,1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! LÂMINA 02
! *****
! Criação do bloco 02 - Lamina 02 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (1<y<2cm)
! *****

```

```

BLOCK,0,5,1,2,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 02 ao volume criado para formar a lâmina 02
! *****
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da lâmina 2 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,14
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,15
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,1, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,23
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , , ,1
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! LÂMINA 03
! *****
! Criação do bloco 02 - Lamina 03 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (2<y<3cm)
! *****
BLOCK,0,5,2,3,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 03 ao volume criado para formar a lâmina 03
! *****
TYPE, 2
MAT, 2
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
TYPE, 3
MAT, 3
REAL, 3

```



```

ESYS, 0
SECNUM,
! *****
! Dividindo a malha da lâmina 3 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,35
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,26
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,27
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,2, , , , ,1
!*
/VIEW,1,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! LÂMINA 04
! *****
! Criação do bloco 04 - Lamina 04 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (3<y<4cm)
! *****
BLOCK,0,5,3,4,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 04 ao volume criado para formar a lâmina 03
! *****
TYPE, 4
MAT, 4
REAL, 4
ESYS, 0
SECNUM,
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,9
FITEM,5,35
FITEM,5,47
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*

```

```

FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,47
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,38
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,39
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,2, , , ,1
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 4
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! LÂMINA 05
! *****
! Criação do bloco 05 - Lamina 05 - 5,0 x 1,0 x 105,0 cm (4<y<5cm)
! *****
BLOCK,0,5,4,5,0,105,
! *****
! Atribuindo o material 04 ao volume criado para formar a lâmina 03
! *****
TYPE, 5
MAT, 5
REAL, 5
ESYS, 0
SECTNUM,
! *****
! Dividindo a malha da lâmina 5 e transformando em volume
! *****
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,59
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,105, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,50

```

```

CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,5, , , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,51
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,_,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,2, , , , ,1
!*
!*
/VIEW,1,,,1
/ANG,1
/REP,FAST
/AUTO,1
/REP,FAST
CM,_Y,VOLU
VSEL, , , , ,5
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,_Y1
MSHKEY,0
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
! *****
! Definir merge no volume para que as lâminas tenham seus nós unidos
! *****
ALLSEL,ALL
NSEL,ALL
NUMMRG,NODE, , , , low

! *****
! Vinculação dos apoios
! *****
! Seleção dos nós das extremidades (z=105) - Impedimento das translações nos eixos x, y
! *****
FLST,2,6,1,ORDE,4
FITEM,2,2
FITEM,2,10
FITEM,2,13
FITEM,2,-16
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY, , , ,

FLST,2,6,1,ORDE,2
FITEM,2,25
FITEM,2,-30
!*
/GO
D,P51X, , , , ,UX,UY,UZ, , ,

! *****
! Seleção dos nós da face superior e aplicação do carregamento correspondente na direção y
! *****
! Carregamento nos terços do vão (F=-495.56 kgf/número de nós): Fz=- 670.06 kgf/12nós = 55.83 kgf/nó
! *****
! Pontos de aplicação das cargas: z = 52.0 cm e z = 53.0 - faixa 1 (meio da peça)
! *****
! Faixa 1 (52 < z < 53):Fz=- 670.06 kgf/12nós = 55.83 kgf/nó
! Sinal negativo indica que a carga está aplicada no sentido contrário ao sentido positivo de y
! *****
/SOLU

```

```

FLST,2,12,1,ORDE,12
FITEM,2,10900
FITEM,2,-10901
FITEM,2,11004
FITEM,2,-11005
FITEM,2,11108
FITEM,2,-11109
FITEM,2,11212
FITEM,2,-11213
FITEM,2,11316
FITEM,2,-11317
FITEM,2,11420
FITEM,2,-11421
!*
/GO
F,P51X,FY,-55.8383

```

```

! *****
! Consideração da não linearidade física do material
! *****
! Aplicação dos valores de carga incremental aplicados no modelo até a ruptura
! *****
! Carga de ruptura aplica no ensaio de flexão: F= 670.06 kgf
! Tamanho do passo de carga F1: F/20 (F=33.5 kgf)
! Valor mínimo do passo de carga F2: F1/5 (6.7 kgf)
! Valor máximo do passo de carga F3: F1 (F=33.5kgf)
! *****
!*
/SOLU
DELTIM,33.5,6.7,33.5
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
TIME,670.06

```

```

! *****
! Rodar o modelo
! *****
/SOLU
SOLVE
SAVE
FINISH

```