

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

ANÁLISE DA ESTABILIDADE LATERAL EM VIGAS DE  
MADEIRA LAMELAR COLADA

Renan Scapinello

Passo Fundo

2021



CIP – Catalogação na Publicação

---

S284a Scapinello, Renan

Análise da estabilidade lateral em vigas de madeira lamelar colada (MLC) [recurso eletrônico] / Renan Scapinello. – 2021. 5.5 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Busato Ramires.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Engenharia civil. 2. Estruturas de madeira (Construção civil). 3. Madeira. 4. Vigas de madeira. I. Ramires, Fernando Busato, orientador. II. Título.

CDU: 624.011.1

---

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Universidade de Passo Fundo  
Faculdade de Engenharia e Arquitetura  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

Renan Scapinello

ANÁLISE DA ESTABILIDADE LATERAL EM VIGAS DE  
MADEIRA LAMELAR COLADA

Passo Fundo, 2021.

Renan Scapinello

## ANÁLISE DA ESTABILIDADE LATERAL EM VIGAS DE MADEIRA LAMELAR COLADA (MLC)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Fernando Busato Ramires.

Passo Fundo , 2021.

Renan Scapinello

## ANÁLISE DA ESTABILIDADE LATERAL EM VIGAS DE MADEIRA LAMELAR COLADA (MLC)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Fernando Busato Ramires.

Data de aprovação: Passo Fundo, 26 de abril de 2021.

Fernando Busato Ramires, Dr.  
Orientador

Juliana da Cruz Vianna Pires, Dr<sup>a</sup>.  
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima, Dr.  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Zacarias Martin Chamberlain Pravia, Dr.  
Universidade de Passo Fundo – UPF

Francisco Dalla Rosa, Dr.  
Universidade de Passo Fundo – UPF

Passo Fundo , 2021.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador e amigo Dr. Fernando Busato Ramires, pela troca de conhecimentos, experiências, pela paciência e pelo frequente estímulo, que sem o qual, não seria possível a finalização deste projeto. Agradeço também aos funcionários Amilton Sartor, Lucas Dias, Leunir Freitas e em especial ao estagiário e amigo Felipe Sasso, do Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura – CETEC, da UPF, por toda a parceria e auxílio ao longo do desenvolvimento dos procedimentos experimentais da pesquisa.

Agradeço a todos os professores do mestrado, membros orientadores da banca e aos grandes amigos encontrados no decorrer desta caminhada.

Agradeço aos meus pais, Luiz Carlos Scapinello e Rosi Núbia Scapinello e a minha irmã, Ediely Zuniga, desde sempre meus grandes incentivadores, por tudo que fazem e sempre fizeram para que nossa família permanecesse unida, amável e fundada na confiança mútua.

Agradeço a minha esposa, companheira e melhor amiga Vanessa Ribeiro Della Vechia, pelo amor, carinho, apoio e auxílio incondicional, que sem o qual nada disso seria possível. Por fim, agradeço a pessoa mais importante da minha vida, que acompanhou o andamento deste trabalho desde a barriga da mamãe até seu nascimento, que me ensina diariamente novos valores e que teve que dividir o tempo com este estudo, minha amada filha Lílian Della Vechia Scapinello.

## RESUMO

A madeira é um recurso renovável e facilmente disponível em todas as regiões do país. Por ser um material leve, econômico, esteticamente agradável e durável quando corretamente tratado, sua utilização como material de construção obteve grande desenvolvimento em contextos urbanos ao longo do tempo. Dentre diferentes compósitos estruturais obtidos a partir desta matéria-prima renovável, a madeira lamelada colada (MLC) se destaca, por ser capaz de vencer grandes vãos em variadas geometrias. Assim, aliando-se o potencial da MLC, com a necessidade crescente de se construir de forma sustentável, o presente estudo relata a metodologia e resultados de uma investigação experimental com o objetivo de prever o momento crítico que leva vigas de MLC da espécie Pinus à instabilidade lateral elástica, explorando e comparando a aplicabilidade das teorias existentes a estes valores. Através da pesquisa realizada, pôde-se perceber a importância da caracterização prévia dos elementos de madeira e da correta escolha metodológica a se aplicar em suas definições. Quando comparados os resultados experimentais aos obtidos de formulações normatizadas, observa-se proximidades nos valores obtidos, principalmente em relação ao método teórico do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), estatisticamente validado aos resultados ensaiados. Já em relação à formulação teórica publicada por Timoshenko e Gere. (1963) apresenta-se com diferença significativa entre os resultados obtidos, uma vez que o equacionamento de tal teorização leva em conta materiais de comportamento isotrópicos e não anisotrópico como a madeira. O que leva a evidenciar o impacto que a constituição física dos materiais exerce sobre seu comportamento mecânico.

Palavras-chaves: Madeira lamelada colada; Vigas; Instabilidade lateral.

## **ABSTRACT**

Timber is a renewable resource and is easily available in all regions of the country. For being a lightweight, economical, aesthetically pleasing and durable material when treated, the use as a construction material has been greatly development in urban contexts over time. Among the different structural composites obtained from this renewable raw material, glued laminated timber (glulam) stands out, being able to overcome large spans in various geometries. Therefore, allying the potential of MLC elements, with the growing need to build in a sustainable way, the present study reports the methodology and results of an experimental investigation with the objective of predicting the critical moment that leads MLC beams of the species *Pinus* to elastic lateral instability, exploring and comparing the applicability of existing theories to those values. Through the research carried out, it was possible to perceive the importance of the previous characterization of the wooden elements and the correct methodological choice to be applied in their definitions. When comparing the experimental results to those obtained from standardized formulations, there are similarities in the values obtained, mainly in relation to the theoretical method of the Project approved in the national vote of NBR 7190 (2011), statistically validated to the tested results. Regarding the theoretical formulation published by Timoshenko and Gere. (1963) presents a significant difference between the results obtained, since the equation of such theorization takes into account isotropic and non-orthotropic behavior materials such as wood. Which leads to evidence of the impact that the physical constitution of materials has on their mechanical behavior.

Key-words: Glued Laminated Timber; Glulam; Beams; Buckling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição da área de plantios de eucaliptos e pinus por estado, 2012. ....	18
Figura 2: Esquema de uma viga de madeira lamelada colada. ....	23
Figura 3: Esquema do processo de fabricação da MLC. ....	26
Figura 4: Emenda dentada vertical e emenda dentada horizontal. ....	27
Figura 5: Espaçamentos mínimos para as emendas em vigas de MLC. ....	28
Figura 6: Disposição das lamelas de acordo com o módulo de elasticidade. ....	31
Figura 7: Ensaio não destrutivo de flexão estática. ....	34
Figura 8: Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na lamela. ....	36
Figura 9: Corpo de prova e ensaio de cisalhamento na lamela. ....	36
Figura 10: Corpo de prova para ensaio de tração da lâmina de cola. ....	37
Figura 11: Ensaio de tração da lâmina de cola. ....	38
Figura 12: Carga crítica ( $P_{cr}$ ) de vigas retangulares de madeira para diferentes relações altura/largura (d/b). ....	45
Figura 13: Dispositivo de aplicação de carregamento. ....	46
Figura 14: (a) Contraventamento metálico; (b) Contraventamento atirantado. ....	47
Figura 15: (a) Contraventamento em madeira serrada; (b) Contraventamento em MLC. ....	48
Figura 16: Viga bi-apoiada submetida a um carregamento P. ....	49
Figura 17: Aplicação da carga ao longo da altura da seção transversal. ....	50
Figura 18: Etapas metodológicas. ....	53
Figura 19: Floresta de Pinus. ....	54
Figura 20: Componentes para a fabricação do adesivo a base de UF. ....	55
Figura 21: Mistura pronta do adesivo a base de UF. ....	55
Figura 22: Corpos de prova para a determinação da umidade da madeira. ....	57
Figura 23: Dimensão do corpo de prova para a determinação da umidade da madeira. ....	57
Figura 24: Temperatura da estufa para secagem dos corpos de prova. ....	58
Figura 25: Corpos de prova submersos em água. ....	59
Figura 26: Medição dos corpos de prova saturados. ....	59
Figura 27: Ruptura de corpo de prova por compressão paralela às fibras. ....	60
Figura 28: Ensaio de cisalhamento em corpo de prova assimétrico maciço. ....	60
Figura 29: Preparação dos corpos de prova assimétricos para ensaio de cisalhamento. ....	61
Figura 30: Dimensões do corpo de prova simétrico proposto ao ensaio de cisalhamento. ....	62
Figura 31: Corpos de prova maciços simétricos propostos ao ensaio de cisalhamento. ....	62
Figura 32: Identificação das lamelas. ....	63
Figura 33: Ensaio de flexão estática nas lamelas. ....	64
Figura 34: Posicionamento do manômetro e da carga no ensaio de flexão estática. ....	64
Figura 35: Aferição dos sargentos com célula de carga. ....	66
Figura 36: Posicionamento das lamelas sobre a bancada. ....	66
Figura 37: Lamelas após o recebimento do adesivo a base de UF. ....	67
Figura 38: Viga teste montada com a pressão dos sargentos aplicada. ....	67
Figura 39: Viga pronta após 24 horas de cura do adesivo. ....	68
Figura 40: Viga de MLC antes de ser plainada. ....	69
Figura 41: Viga de MLC após ser plainada. ....	69
Figura 42: Identificação das vigas de MLC. ....	69
Figura 43: Esquema do ensaio de flexão simples da viga teste. ....	70
Figura 44: Esquemática planejada para o ensaio de instabilidade lateral. ....	71
Figura 45: Dispositivo de apoio 1 do ensaio de instabilidade lateral. ....	72
Figura 46: Dispositivo de apoio 2 do ensaio de instabilidade lateral. ....	73
Figura 47: Detalhe do aplicador de carga no centro do vão da viga. ....	74

Figura 48: Detalhe dos elementos de medição instalados. ....	75
Figura 49: Detalhe da aquisição de dados. ....	75
Figura 50: Sistema posicionado para o ensaio de instabilidade lateral. ....	77
Figura 51: Comparativo da resistência ao cisalhamento média em corpos de prova assimétricos. ....	83
Figura 52: Comparativo da resistência ao cisalhamento média em corpos de prova simétricos. .....	86
Figura 53: Comparativo da resistência ao cisalhamento médio em corpos de prova simétricos e assimétricos. ....	86
Figura 54: Classificação visual das lamelas. ....	87
Figura 55: Posicionamento das lamelas na viga teste. ....	91
Figura 56: Comparativo dos módulos de elasticidade da viga teste. ....	92
Figura 57: Deformação com o carregamento máximo da viga teste. ....	94
Figura 58: Deformação residual após o alívio do carregamento máximo da viga teste. ....	94
Figura 59: Posicionamento das lamelas nas vigas V8. ....	95
Figura 60: Posicionamento das lamelas nas vigas V10. ....	96
Figura 61: Posicionamento das lamelas nas vigas V12. ....	96
Figura 62: Comparativo dos módulos de elasticidade das vigas de MLC. ....	97
Figura 63: Ensaio de estabilidade lateral em andamento. ....	100
Figura 64: Gráfico do ensaio de estabilidade lateral da viga V81-2. ....	100
Figura 65: Comparativo das médias de cargas pontuais máximas das vigas de MLC. ....	102
Figura 66: Comparativo das médias de deslocamentos máximos das vigas de MLC. ....	103
Figura 67: Comparativo das médias de cargas pontuais máximas das vigas de MLC. ....	104
Figura 68: Comparativo dos Momentos Críticos experimentais e normativos. ....	107
Figura 69: Razão entre os momentos normativos e experimentais. ....	107
Figura 70: Comparativo dos Momentos Críticos experimentais e bibliográficos. ....	109
Figura 71: Ensaio 1 da Viga V81 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	119
Figura 72: Ensaio 2 da Viga V81 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	119
Figura 73: Ensaio 3 da Viga V81 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	120
Figura 74: Ensaio 1 da Viga V82 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	120
Figura 75: Ensaio 2 da Viga V82 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	121
Figura 76: Ensaio 3 da Viga V82 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	121
Figura 77: Ensaio 1 da Viga V83 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	122
Figura 78: Ensaio 2 da Viga V83 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	122
Figura 79: Ensaio 3 da Viga V83 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	123
Figura 80: Ensaio 1 da Viga V101 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	123
Figura 81: Ensaio 2 da Viga V101 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	124
Figura 82: Ensaio 3 da Viga V101 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	124
Figura 83: Ensaio 1 da Viga V102 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	125
Figura 84: Ensaio 2 da Viga V102 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	125
Figura 85: Ensaio 3 da Viga V102 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	126
Figura 86: Ensaio 1 da Viga V103 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	126
Figura 87: Ensaio 2 da Viga V103 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	127
Figura 88: Ensaio 3 da Viga V103 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	127
Figura 89: Ensaio 1 da Viga V121 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	128
Figura 90: Ensaio 2 da Viga V121 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	128
Figura 91: Ensaio 3 da Viga V121 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	129
Figura 92: Ensaio 1 da Viga V122 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	129
Figura 93: Ensaio 2 da Viga V122 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	130
Figura 94: Ensaio 3 da Viga V122 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	130

Figura 95: Ensaio 1 da Viga V123 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	131
Figura 96: Ensaio 2 da Viga V123 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	131
Figura 97: Ensaio 3 da Viga V123 – Relação deslocamentos x carregamento. ....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da madeira de acordo com a classe de umidade.....	20
Tabela 2: Classificação da madeira de acordo com a classe de resistência das dicotiledôneas para classe de umidade U=12%.....	22
Tabela 3: Classificação da madeira de acordo com a classe de resistência das coníferas para classe de umidade U=12%.....	22
Tabela 4: Pressão de colagem das ligações de continuidade das lamelas.....	29
Tabela 5: Pressão de colagem das ligações de continuidade das lamelas.....	33
Tabela 6: Definição de classes de carregamento e valores de $k_{mod1}$ .....	43
Tabela 7: Valores de $k_{mod2}$ .....	43
Tabela 8: Teor de umidade dos corpos de prova.....	79
Tabela 9: Densidade básica dos corpos de prova.....	80
Tabela 10: Ensaio de compressão paralela às fibras.....	81
Tabela 11: Ensaio de cisalhamento maciço de acordo com a NBR 7190 (1997).....	81
Tabela 12: Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola de acordo com a NBR 7190 (1997).....	82
Tabela 13: Análise de variância em relação aos ensaios de cisalhamento assimétricos.....	83
Tabela 14: Ensaio de cisalhamento simétrico maciço proposto.....	84
Tabela 15: Ensaio de cisalhamento simétricos na lâmina de cola proposto.....	85
Tabela 16: Análise de variância em relação aos ensaios de cisalhamento maciços.....	87
Tabela 17: Caracterização das lamelas.....	88
Tabela 18: Média dos módulos de elasticidade dos grupos classificados de forma visual.....	90
Tabela 19: Caracterização da viga teste através do ensaio de flexão estática.....	92
Tabela 20: Comparativo dos módulos de elasticidade da viga teste.....	92
Tabela 21: Verificação da falha na viga teste.....	93
Tabela 22: Caracterização das vigas de MLC através do ensaio de flexão estática.....	97
Tabela 23: Comparativo dos módulos de elasticidade das vigas de MLC.....	97
Tabela 24: Análise de variância em relação aos ensaios de módulo de elasticidade.....	98
Tabela 25: Verificação da falha nas vigas de MLC.....	99
Tabela 26: Resultados dos ensaios de instabilidade lateral.....	101
Tabela 27: Média dos resultados dos ensaios de instabilidade lateral.....	102
Tabela 28: Análise de variância comparativo da carga experimental x carga teórica.....	104
Tabela 29: Caracterização das vigas de MLC consideradas.....	105
Tabela 30: Momento crítico experimental das vigas de MLC.....	105
Tabela 31: Momentos Críticos experimentais e normativos.....	106
Tabela 32: Razão entre os momentos normativos e experimentais.....	106
Tabela 33: Análise de variância em relação aos Momentos Críticos experimentais e do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011).....	108
Tabela 34: Análise de variância dos Momentos Críticos experimentais e normativos.....	108
Tabela 35: Momentos Críticos experimentais e bibliográficos.....	109

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Problemática .....	13
1.2	Justificativa .....	14
1.3	Objetivo geral .....	14
1.4	Objetivos específicos .....	14
1.5	Estrutura da dissertação .....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1	Madeira como material estrutural .....	16
2.2	Caracterização e propriedades da madeira.....	20
2.3	Madeira lamelada colada (MLC) .....	23
2.3.1	Processo de fabricação e montagem da MLC .....	25
2.3.2	Tipos de madeira para produção de MLC .....	29
2.3.3	Classificação das madeiras para produção de MLC.....	30
2.3.4	Adesivos para MLC.....	31
2.3.5	Ensaio de caracterização para a madeira lamelada colada.....	33
2.3.6	Critérios de dimensionamento em vigas de MLC .....	38
2.4	A instabilidade lateral em vigas de madeira .....	43
2.5	Momento crítico para a instabilidade lateral em vigas .....	48
2.5.1	Momento crítico segundo Timoshenko e Gere (1963).....	48
2.5.2	Momentos críticos normatizados para a instabilidade lateral da madeira.....	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	53
3.1	Definição dos Materiais .....	53
3.1.1	Espécie de madeira .....	54
3.1.2	Adesivo Estrutural .....	55
3.1.3	Dimensões das vigas de MLC .....	56
3.2	Caracterização e ensaios .....	56
3.2.1	Determinação do teor de umidade do lote .....	57
3.2.2	Densidade básica da madeira.....	58
3.2.3	Resistência a compressão paralela às fibras .....	59
3.2.4	Resistência ao cisalhamento .....	60
3.2.5	Classificação e caracterização das lamelas.....	62
3.3	Processo de fabricação das vigas de MLC.....	65
3.4	Ensaio de flexão simples da viga teste.....	70
3.5	Ensaio experimental.....	71
3.5.1	Elementos de apoio à realização dos ensaios .....	71
3.5.2	Ensaio de instabilidade lateral .....	76
3.6	Formulações normativas e bibliográficas .....	78
4	RESULTADOS .....	79
4.1	Caracterização e ensaios .....	79
4.1.1	Ensaio de teor de umidade do lote.....	79
4.1.2	Ensaio de densidade básica .....	80
4.1.3	Ensaio de resistência a compressão paralela às fibras .....	80
4.1.4	Ensaio de resistência ao cisalhamento de acordo com a NBR 7190 (1997).....	81
4.1.5	Ensaio de resistência ao cisalhamento simétrico proposto.....	84
4.1.6	Classificação e caracterização das lamelas.....	87
4.2	Fabricação da viga teste e ensaio de flexão simples .....	91
4.3	Fabricação das vigas de MLC.....	94
4.4	Ensaio de instabilidade lateral .....	99

4.5	Comparativos para a instabilidade lateral .....	105
4.5.1	Comparativo dos resultados experimentais e normativos .....	106
4.5.2	Comparativo dos resultados experimentais e bibliográficos .....	109
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112
	APÊNDICE .....	119

# 1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados pela humanidade, acompanha a evolução do homem, em relação à utilização de recursos naturais, antes mesmo do desenvolvimento da idade da pedra. É provável que, há milhares de anos, troncos de árvores simplesmente apoiados em ambas as bordas de certo obstáculo, tenham dado origem aos primeiros mecanismos de transposição estrutural em madeira. A posterior manipulação de fibras vegetais, que permitiam conectar várias peças por meio de amarrações grosseiras, determinara o surgimento, propriamente dito, das primeiras passarelas conscientemente construídas (CALIL JÚNIOR et al., 2012).

Apesar da madeira passar por um período de desconfiança em relação a sua utilização, devido principalmente à herança da má aplicação, falta de critérios e cuidados técnicos em composições estruturais, cada vez mais estes elementos ganham destaque, principalmente por se tratar de um material sustentável. Sob o ponto de vista ambiental, isto pode ser explicado por este ser um recurso renovável e com baixo consumo energético para sua produção e processamento (STEINBERG et al., 2003; GUTKOWSKI et al., 2004). Para Stamato e Calil Junior (2003) a grande vantagem da madeira dá-se em função da economia da obra quando se tem este recurso próximo, em qualidade e quantidade. Como ressalta Ramage et al. (2017), tratando-se de um material natural com combinações de polímeros, os elementos estruturais em madeira, como a madeira serrada tradicional e os elementos projetados, como as madeiras lameladas e adesivadas, apresentam boas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e durabilidade, quando corretamente aplicados.

As limitações em dimensões transversais e longitudinais máximas devido aos tamanhos de troncos disponíveis e defeitos naturais das árvores, estão sendo superadas pelo relativamente recente desenvolvimento de produtos de madeira composta. Emendas e uniões aliadas a técnicas de laminação permitiram a fabricação de elementos de madeiras de alta qualidade em qualquer formato e tamanho, sendo limitado apenas pelos limites fabris e transporte (PORTEOUS et al., 2007). Dentre os diversos sistemas estruturais que podem ser aplicados com o uso da madeira, a madeira lamelada colada (MLC), processo de associação entre tábuas serradas através de um adesivo estrutural, se destaca, por ser capaz de vencer vãos e geometrias, até então impossíveis, as tradicionais técnicas de construção.

Hassan e Johansson (2018) comparou vigas de madeira lamelada colada e vigas de aço em relação a custos de projeto, fabricação, montagem e quantidade de emissões de gases de efeito estufa. Seu estudo mostrou que as vigas em MLC, apesar de possuírem seções maiores e

maior tendência à instabilidade lateral do que as vigas de aço, são elementos mais baratos e a opção mais ecologicamente correta, principalmente se utilizada madeira de áreas reflorestadas. A leveza, resistência e beleza de elementos de MLC faz com que este sistema ganhe cada vez mais admiradores, e que seu uso, até então popular apenas em regiões da Europa e América do Norte, se dissemine também em países como o Brasil.

## 1.1 Problemática

Por conta da flexibilização em se produzir vigas de MLC de vãos cada vez maiores, a flexão torsional lateral, ou os efeitos da instabilidade lateral, acabam por se tornar um modo de falha chave em estruturas deste tipo, onde seu desempenho normalmente regula a capacidade de longo alcance das vigas sem restrições ou travamentos laterais. A intensidade do carregamento que uma viga de madeira pode resistir sem se desestabilizar lateralmente depende basicamente das propriedades constitutivas da espécie utilizada, da geometria da seção transversal, do vão a se vencer, da distribuição do carregamento, das restrições impostas aos apoios, das distâncias dos contraventamentos, da altura de carga relativa ao centroide da seção, além das imperfeições dos elementos (SAHRAEI et al., 2018).

Estudos e parâmetros bibliográficos e normativos estabelecem critérios de falhas e formulações matemáticas a fim de se prever o momento máximo que pode fazer com que vigas de madeira se desestabilizem lateralmente. Porém, para a obtenção destas soluções analíticas, os números de parâmetros influenciadores acabam sendo reduzidos e uma série de hipóteses simplificadoras são aplicadas. O resultado destas equações, embora simples, acabam por restringir o número de variáveis envolvidas e provocar um certo questionamento sobre a aplicabilidade destas soluções para diferentes cenários envolvidos, questionando projetistas quanto a acuracidade destas informações quando aplicadas situações reais de projeto.

Dentro deste contexto, aliando-se o potencial da madeira lamelada colada, com a necessidade crescente da utilização de produtos sustentáveis na construção civil e as incertezas sobre as simplificações das equações matemáticas propostas aos efeitos da instabilidade lateral, chega-se ao seguinte problema de pesquisa:

O quão calibradas estão as formulações analíticas referentes a estabilidade de vigas de madeira lamelada colada?

## **1.2 Justificativa**

Por conta do crescente aumento da necessidade de se construir de forma sustentável e sem desperdício, onde a racionalização de todo o processo envolvido não impacte negativamente na extração de matéria-prima para a construção de obras de engenharia. A madeira lamelada colada utilizando-se de árvores de reflorestamentos apresenta-se como um material capaz de suprir esta necessidade, uma vez que não se limita dimensionalmente, é um material durável e possui características mecânicas favoráveis.

As incertezas e simplificações normativas específicas para tratar da instabilidade lateral em vigas de MLC faz com que estudos numéricos e experimentais sejam necessários para a correta interpretação deste fenômeno, assegurando a economicidade e segurança para projetistas e construtores, além de fazer com que a técnica de fabricação destes elementos se popularize com maior facilidade.

## **1.3 Objetivo geral**

Como objetivo principal deste trabalho pretende-se realizar a análise experimental e numérica da estabilidade lateral de vigas de madeira lamelada colada da espécie Pinus, explorando a aplicabilidade das teorias existentes.

## **1.4 Objetivos específicos**

Para os objetivos específicos, pretende-se:

- i. Caracterizar a espécie de madeira a ser utilizada;
- ii. Determinar o momento crítico experimental de vigas de madeira lamelada colada da espécie Pinus;
- iii. Verificar a acuracidade das formulações analíticas normatizadas e referenciadas bibliograficamente sobre a estabilidade lateral em vigas.

## **1.5 Estrutura da dissertação**

Este trabalho divide-se em um total de 5 capítulos. No capítulo inicial apresenta-se condições introdutórias, a problemática de pesquisa, a justificativa e os objetivos gerais e específicos propostos.

O capítulo 2 formata-se com uma revisão bibliográfica do tema proposto, seguida no capítulo 3 por uma discussão a respeito dos materiais e métodos adotados para realização do estudo, onde são definidos os principais critérios estabelecidos para a realização da pesquisa.

No capítulo 4 expõem-se os resultados dos ensaios e caracterizações dos processos envolventes à fabricação das vigas de MLC com a utilização da espécie *Pinus*.

Por fim, no capítulo 5 são realizadas discussões conclusivas a respeito do conteúdo apresentado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Madeira como material estrutural

Tanto a madeira inteira e maciça, fornecida diretamente pelo tronco das árvores, quanto seus artefatos derivados, tratam-se do material mais antigo a ser empregado no setor da construção civil (PFEIL, 2011). Vilela (2013) afirma que os vestígios mais antigos da utilização da madeira em construções datam de cerca de 5000 a.C., construções subterrâneas denominadas *pit-houses*, frequentes na América do Norte, América do Sul e algumas regiões da Europa dominadas pelos povos anglo-saxônicos.

Por muitos séculos, a madeira tem sido um material de construção para casas, edifícios, pontes, estruturas à beira-mar, postes para linhas elétricas e telefônicas, e muitos outros. Uma série de fatores, como a simplicidade na fabricação, leveza, reutilização e compatibilidade ambiental, fizeram deste material um dos mais populares em construções leves (ISSA e KMEID, 2005). Porém, muitas vezes a madeira fora utilizada de forma empírica, sem o devido cuidado quanto ao dimensionamento, tratamento e proteção de seus elementos. Hoje, o preconceito originado da má utilização da madeira no passado, ainda é uma das causas de seu lento crescimento na aplicação para fins estruturais no Brasil. Vale acrescentar que, quando corretamente empregada, a madeira é competitiva com qualquer outro material, como o aço e o concreto, por exemplo. Quando comparados com a madeira, os projetos de aço e concreto consomem respectivamente 26% e 57% mais energia, emitem 34% e 81% mais gases de efeito estufa, libertam 24% e 47% mais poluentes no ar, descarregam aproximadamente 400% e 350% mais poluentes na água, produzem 8% e 23% mais resíduos sólidos, além de usar 11% e 81% mais recursos (CWC, 2004).

Para Fusco (1989) dentre as principais vantagens da utilização da madeira como peça estrutural pode-se citar ser o único material estrutural de fonte renovável e que necessita pouco consumo para sua industrialização, ainda, possui peso próprio reduzido (aproximadamente 1/3 do peso do concreto e 1/8 do peso do aço) e boa resistência mecânica, é excepcionalmente resistente a choques e esforços dinâmicos, com baixa condutividade térmica e acústica, além de possuir alta resistência na presença do fogo.

A madeira utilizada para fins estruturais pode ser dividida em dois grupos: as coníferas, conhecidas internacionalmente como madeiras moles (*softwood*) com folhas em formato de agulha, visíveis ao longo do ano em suas espécies; e as dicotiledôneas ou folhosas, usualmente

designadas como madeiras duras (*hardwoods*) com folhas largas presentes na estação de crescimento, perdendo suas folhas no inverno. Vale ressaltar que essa classificação não necessariamente reflete as propriedades mecânicas da madeira de suas espécies, por exemplo a madeira balsa, apesar de ser uma dicotiledônea ou madeira dura, possui propriedades pouco resistivas quando comparada com as coníferas (RAMAGE et al., 2017).

Na natureza, árvores mais velhas podem ser cortadas e substituídas por exemplares jovens, transformando dióxido de carbono, água e pequenas quantidades de nutrientes da terra em um material estrutural. A produção da madeira pela fotossíntese é um processo natural, necessário para toda a vida na Terra. É, de fato, o único material estrutural que tem um efeito positivo sobre o aquecimento global causado por gases de efeito estufa (MALO, 2016).

Talvez o principal benefício da madeira, esteja realmente no processo de obtenção sustentável de sua matéria prima. Porém, o histórico de desmatamentos ilegais, a evolução de leis mais restritas quanto a retirada de madeira nativa visando a não degradação da flora e fauna locais, e o incentivo fiscal federal ao plantio de espécies de crescimento rápido, possibilitou o avanço no uso da madeira de reflorestamento como alternativa a ser aplicada para os mais variados fins. Em pesquisa ao Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul (SADS, 2017), o qual mostra e qualifica a situação da cobertura florestal do Estado, analisando especificamente a região fisiográfica do Alto Uruguai, verifica-se que as florestas de Pinus e de Eucaliptos se destacam em termos de áreas reflorestadas e manejadas, devido principalmente à sua vasta utilização na construção civil.

A revista REMADE (2006) afirma que no Rio Grande do Sul, por volta de 1880, aconteceram as primeiras introduções do pinus, espécie *pinus canariensis*, proveniente das Ilhas Canárias. A partir de então, outras espécies, que incluem *pinus palustres*, *pinus caribea*, *pinus elliotti*, *pinus oocarpa* e *pinus taeda*, passaram a ser testadas e ensaiadas, principalmente por conta da preocupação à adaptação ao clima brasileiro. Quanto ao eucalipto, Calil Neto (2011) descreve que essas espécies possuem origem na Austrália e ilhas da Oceania, introduzidas, no Brasil, no início do século XX por Edmundo Navarro de Andrade. Dentre as espécies para fins comerciais mais utilizadas se destacam o *eucalyptus grandis*, *eucalyptus saligna*, *eucalyptus alba*, *eucalyptus citriodora* e *eucalyptus dunnii*.

A ABRAF (2013) estima que em 2012, a área ocupada pelo plantio florestal de eucaliptos e pinus no Brasil foi de 6.664.812 hectares, com 23,4% para o pinus e 76,6% para o eucalipto, representando, no período de 2006-2012, um crescimento médio anual de 2,8% de área plantada. Na distribuição em relação a área de plantios por estado, o Rio Grande do Sul aparece na sétima posição individual com 6,7% de área, ficando atrás apenas de Minas Gerais

(22,3%), São Paulo (17,8%), Paraná (12,3%), Santa Catarina (9,7%), Bahia (9,3%) e Mato Grosso do Sul (9,0%). A porcentagem de gênero de cada estado pode ser conferida na Figura 1, onde no Rio Grande do Sul, 36,7% das áreas correspondem a florestas de pinus e 63,3% de eucaliptos.

Figura 1: Distribuição da área de plantios de eucaliptos e pinus por estado, 2012.



Fonte: ABRAF, 2013.

Há de se entender, entretanto, que por ser composta de fibras naturais, a madeira pode sofrer com as ações do meio em que está inserida. Jankowsky et al. (2002) afirma que pela madeira ser de origem orgânica, em função das condições ambientais as quais possa estar submetida, esta pode sofrer deterioração por agentes biológicos. Ainda, quando o material é exposto às intempéries, fatores de ordem física, química e mecânica contribuem para a

ocorrência de um outro fenômeno conhecido como intemperismo. A madeira exposta ao intemperismo, sofre a incidência direta dos raios solares, entre os quais os ultravioletas, que facilitam a degradação fotoquímica e acarretam a formação de fendas longitudinais nas peças, o que acaba por influenciar negativamente suas propriedades mecânicas e reduzir sua durabilidade (FIORELLI et al., 2008).

Para Ross (2010), devido a madeira ser de natureza higroscópica, a qual tem alto poder de absorção, a relação da umidade absorvida no meio circundante pelo material tem grande influência nas propriedades e desempenho do mesmo. Aliado a isso, variáveis ambientais como presença de oxigênio, temperatura, umidade relativa do ar, suprimentos insuficientes e acidez do meio, aceleram o processo de decomposição do material e o tornam mais suscetível às alterações dos seus estados de deformação e tensão (CAMPOS, 2002; FRAGIACOMO, 2006). Muitas das dificuldades e desafios do emprego da madeira como material de engenharia são devidas as alterações do teor de umidade do material, o qual segundo Brazolin et al. (2004) deveria apresentar menor porcentagem possível, em torno de menos de 20%, a fim de reduzir os riscos de biodeterioração. Para Fiorelli et al. (2008), a certa recusa e uso inadequado da madeira para fins estruturais é justamente devido aos problemas e complicações no processo de secagem e tratamento da mesma, o que faz-se entender, para se tornar um bem durável, a madeira necessita de um processo correto de controle de umidade e tratamento preservativo.

Como a madeira é um material orgânico, sua integridade é afetada diretamente pelas condições de seu ambiente circundante, de modo que tratamentos conservantes devem ser aplicados visando o prolongamento da vida útil de serviço destas estruturas (MAGALHÃES et al., 2012). É imprescindível o tratamento de qualquer madeira utilizada para fins estruturais. Propriedades como a durabilidade, resistência à degradação biológica, resistência ao ataque de raios ultravioleta, resistência ao fogo, estabilidade térmica e propriedades mecânicas, podem ser aprimoradas através de tratamentos industriais adicionais, os quais empregam produtos químicos preservativos, desde que, regulamentados por órgãos competentes e normatizações vigentes (RAMAGE et al., 2017).

No território brasileiro, o emprego de madeiras processadas teve seu início entre os anos de 1880 e 1884, com a aplicação de madeiras tratadas com creosoto, composto químico derivado do carvão mineral, em dormentes de ferrovias, visto que existia escassez de madeiras naturais de altas durabilidades aos ataques de xilófagos. Assim, a partir deste período, demarcado pelo desenvolvimento industrial brasileiro, as demandas de madeiras com baixas resistências naturais, porém tratadas para resistir aos agentes biológicos de degradação, foram impulsionadas, destinadas principalmente a empreendimentos de redes de eletrificação,

telefonias, redes ferroviárias e telégrafos. (VIDAL et al., 2015). Nos dias atuais, dentre os principais tratamentos básicos de preservação da madeira, no Brasil destaca-se o processo de impregnação realizado em autoclave, o qual fora desenvolvido e patenteado por John Bethell em 1838, na Inglaterra (SILVA, 2008).

Entende-se assim, que para a utilização correta da madeira para fins estruturais deve ser levado em conta o tipo da madeira, com suas características individuais, o ambiente que a estrutura será exposta, a umidade a qual suas fibras estarão submetidas, as cargas e desempenho esperado quanto a durabilidade do conjunto, e o melhor método de tratamento preservativo dos elementos que compõem o sistema proposto.

## 2.2 Caracterização e propriedades da madeira

A madeira difere-se de outros materiais estruturais, principalmente pelo fato de possuir um comportamento ortotrópico, onde para descrever suas propriedades, doze constantes precisam ser definidas, ou seja, três módulos de elasticidade (E), três módulos de cisalhamento (G) e seis relações de Poisson ( $\nu$ ) (FPL, 2010). Por conta da alta variabilidade de parâmetros físicos e mecânicos encontrados na madeira, e a fim de se conhecer características mínimas de desempenho do material visando um dimensionamento seguro e econômico, deve-se buscar a caracterização da madeira que se deseja utilizar em elementos estruturais. Primeiramente deve-se admitir uma das classes de umidade especificadas na Tabela 1, a fim de se ajustar as propriedades da madeira em função das condições ambientais no meio onde permanecerão as estruturas:

Tabela 1: Classificação da madeira de acordo com a classe de umidade.

<b>Classes de umidade</b>	<b>Umidade relativa do ambiente (<math>U_{amb}</math>)</b>	<b>Umidade de equilíbrio da madeira (<math>U_{eq}</math>)</b>
1	$U_{amb} \leq 65\%$	12%
2	$65\% < U_{amb} \leq 75\%$	15%
3	$75\% < U_{amb} \leq 85\%$	18%
4	$U_{amb} > 85\%$ durante longos períodos	$\geq 25\%$

Fonte: Adaptado do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011.

O Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) adverte que para a caracterização completa da madeira para projetos de estruturas devem-se realizar os ensaios

como se segue (valores referidos à condição padrão de umidade da madeira de 12% com a umidade relativa do ambiente inferior a 65%):

- i. Densidade básica, determinada como sendo a massa específica obtida do quociente da massa seca, com corpos de prova em estufa a 103 °C, pelo volume saturado dos corpos de prova submersos em água;
- ii. Resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c,0}$ ), que deve ser determinada através de ensaio de compressão com corpos de prova de 5 cm de lado e 15 cm de comprimento, com duração de 3 a 8 minutos;
- iii. Resistência à compressão normal às fibras ( $f_{c,90}$ ), determinada através de ensaio de compressão com corpos de prova de 5 cm de lado e 10 cm de comprimento, com duração de 3 a 8 minutos;
- iv. A rigidez, medida através do valor médio do módulo de elasticidade, onde o módulo de elasticidade paralelo às fibras ( $E_{w0}$ ) é obtido através do ensaio de compressão paralelo às fibras, e o módulo de elasticidade normal às fibras ( $E_{w90}$ ) é obtido através do ensaio de compressão normal às fibras. Ambos determinados com pelo menos 2 ensaios;
- v. Resistência à tração paralela às fibras ( $f_{t0}$ ), que deve ser determinada através de ensaio de tração com corpos de prova de área A e comprimento superior ou igual a  $8\sqrt{A}$ , com extremidades mais resistentes que o trecho central e com duração de 3 a 8 minutos;
- vi. Resistência à tração normal às fibras ( $f_{t90}$ ), que deve ser determinado através de ensaio padronizado;
- vii. Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ( $f_{v0}$ ) a ser determinado pelo ensaio de cisalhamento paralelo às fibras;
- viii. Resistência de embutimento paralelo às fibras ( $f_{e0}$ ) e resistência de embutimento normal às fibras ( $f_{e90}$ ) a ser determinado por ensaio padronizado.

Vale ressaltar que para o caso de ensaios realizados com diferentes teores de umidade da madeira, o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) indica a correção dos parâmetros de resistência e rigidez para umidade padrão de 12%, através das Equações 1 e 2, respectivamente:

$$f_{12} = f_U \left[ 1 + \frac{3(U - 12)}{100} \right] \quad \text{Equação (1)}$$

$$E_{12} = E_U \left[ 1 + \frac{2(U - 12)}{100} \right] \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$f_{12}$  é a resistência para a umidade padrão de 12% da madeira;

$f_U$  é a resistência para a umidade encontrada da madeira;

$E_{12}$  é o módulo de elasticidade para a umidade padrão de 12% da madeira;

$E_U$  é o módulo de elasticidade para a umidade encontrada da madeira;

$U$  é a umidade encontrada da madeira.

Ainda, objetivando-se a padronização, pode-se dimensionar elementos em madeira sem a escolha específica da espécie, admitindo-se uma classe de resistência geral, onde se possa flexibilizar a escolha futura, desde que os requisitos da classe sejam atendidos. A Tabela 2 apresenta os critérios para o caso de dicotiledôneas e a Tabela 3 para o caso de coníferas.

Tabela 2: Classificação da madeira de acordo com a classe de resistência das dicotiledôneas para classe de umidade  $U=12\%$ .

<b>Classes</b>	<b><math>f_{c0,k}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{v0,k}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0,m}</math> (MPa)</b>	<b><math>\rho_{\text{parente}}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
D20	20	4	9500	650
D30	30	5	14500	800
D40	40	6	19500	950
D50	50	7	22000	970
D60	60	8	24500	1000

Fonte: Adaptado do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011.

Tabela 3: Classificação da madeira de acordo com a classe de resistência das coníferas para classe de umidade  $U=12\%$ .

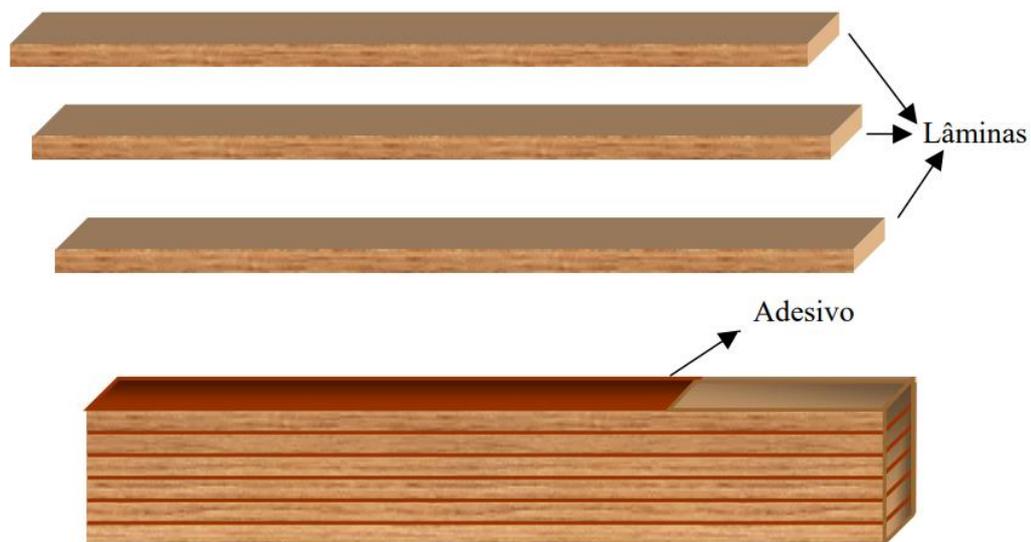
<b>Classes</b>	<b><math>f_{c0,k}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{v0,k}</math> (MPa)</b>	<b><math>E_{c0,m}</math> (MPa)</b>	<b><math>\rho_{\text{parente}}</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
C20	20	4	3500	500
C25	25	5	8500	550
C30	30	6	14500	600

Fonte: Adaptado do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011.

### 2.3 Madeira lamelada colada (MLC)

Szücs (1992) define a madeira lamelada colada (MLC) como a união de lamelas de madeira (tábuas) de dimensões reduzidas quando comparadas às dimensões finais da peça constituída. Onde, as fibras das lminas unidas através do processo de colagem, se dispõem de forma paralelas entre si. Pfeil et al. (2011) acrescenta que essa associação de peças de madeira selecionadas, deve ser realizada sob pressão com a função de unir o mais próximo possível as fibras do material. A Figura 2 apresenta um esquema de montagem de uma viga em MLC.

Figura 2: Esquema de uma viga de madeira lamelada colada.



Fonte: Zangiácomo, 2003.

Pelo que se tem conhecimento, a técnica de colagem de peças de madeira vem sendo empregada a milhares de anos pelo homem. Baús em madeira, colados através de adesivos orgânicos encontrados em pirâmides do Egito, despertam o interesse a respeito da eficiência e durabilidade desses elementos, até então com simples configurações. Após o desenvolvimento de patentes de madeira lamelada colada pelo carpinteiro alemão K. F. O. Hetzer (1846–1911) tornou-se possível a construção de grandes elementos estruturais a partir de pedaços muito pequenos, que poderiam facilmente ser produzidos com formatos retos ou curvados. Frequentemente, a literatura cita a construção de um auditório na cidade de Basel, em 1893 na Suíça, como a primeira edificação a utilizar a MLC. Porém a técnica limitava-se a ser utilizada em ambientes protegidos da incidência de umidade (MIOTTO, 2009). Com o surgimento das colas sintéticas, durante a 2ª Guerra Mundial, a técnica expandiu-se rapidamente pela Europa,

com destaque para países como a Alemanha, França e Holanda. Nos Estados Unidos da América (EUA), Duwadi e Ritter (1997) destacam o início do uso da MLC para ambientes internos em 1935 e para ambientes externos, a partir de 1940. Neiva (1992) destaca que a primeira obra nos EUA em MLC ocorreu em 1934, na construção de um edifício para o Forest Products Laboratory (FPL) em Madison, Wisconsin. Ainda, Kong et al. (2015) sinaliza que o uso da madeira lamelada colada aumentou dramaticamente após o compromisso da União Europeia para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa.

No Brasil, Zangiácomo (2003) cita a empresa Esmara Estruturas de Madeira Ltda, de Viamão-RS, como a primeira indústria de MLC do país, com tecnologia trazida por alemães. De acordo com Rocco Lahr (1991), a MLC iniciou seus estudos através de Callia no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT-SP) e trabalhos desenvolvidos por Simioni na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Dentre as vantagens do sistema em MLC pode-se citar:

- i. Flexibilidade em assumir diferentes formas e comprimentos, inclusive superfícies curvadas, independente das limitações dos trocos de árvores;
- ii. Baixa relação peso/resistência, o que a torna ideal para utilização em grandes vãos, uma vez que facilita os processos de montagem e garante a economia nos elementos de fundação;
- iii. Exigência de menor número de ligações comparadas a madeiras maciças;
- iv. Por conta da espessura das lamelas, o processo de secagem e controle da umidade na madeira se torna mais eficiente;
- v. Lamelas de menor qualidade podem ser utilizadas em zonas de menores esforços, tendo-se um melhor aproveitamento do material;
- vi. Acréscimo de resistência ao fogo;
- vii. Efeito estético agradável e de boa qualidade, sem a necessidade de acabamentos extras ou preenchimentos;
- viii. Racionalização do processo construtivo, por se tratar de elementos pré-fabricados.

Kinjo et al. (2018) ensaiou o desempenho de uma viga de MLC em situação de incêndio baseado em sua deflexão, observando que a resistência diminuiu consideravelmente em relação aos valores da temperatura ambiente durante o período de aquecimento de uma hora. No entanto, o período de resistência ao fogo do espécime estudado, excedeu 1 hora.

### 2.3.1 Processo de fabricação e montagem da MLC

A colagem de madeira com sucesso depende de quão bem se entende e se controla a complexidade dos fatores que constituem essas ligações. O desenvolvimento de novos tipos de adesivos estruturais e compósitos, aliados a grande diversidade nas formas e espécies de elementos de madeira sendo colados, se combinam para produzir uma fonte contínua de desafios e problemas (POCIUS, 2002). A fabricação da madeira lamelada colada, geralmente exige espaço de porte industrial, embora peças menores e simples possam facilmente ser fabricadas em canteiros de obras.

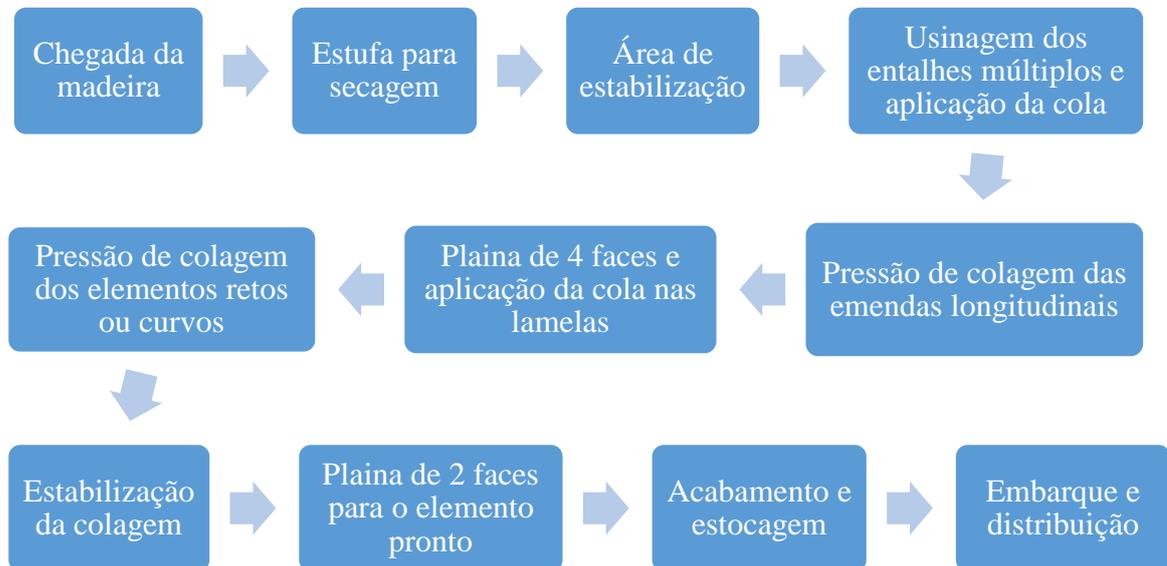
O projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), no entanto, alerta que a qualidade do produto final da produção da madeira lamelada colada depende de várias etapas do processo de fabricação, devendo possuir características de resistência e rigidez garantidas pelos fabricantes através do controle de qualidade de cada componente do processo. Logo, independentemente do local, a produção da MLC deve ser rigidamente conduzida sobre um forte controle de qualidade das peças.

Pode-se produzir estruturas em MLC através de certas especificações, ou ainda em tamanhos comerciais internacionais a fim de se manter em estoque peças comumente utilizadas, embora, geralmente sejam fabricadas peças de acordo com as especificidades de cada projeto (AWC, 2012). Quanto às etapas de produção de peças de MLC, Callia (1958) afirma que as mesmas envolvem a secagem e o preparo das lamelas, seguida da execução das juntas e emendas para a posterior colagem das peças e por fim o acabamento e tratamento preservativo do conjunto. Szücs (1992) divide o processo de fabricação em 3 grandes etapas:

- i. Recepção e preparação da madeira: que inclui a classificação visual das peças com a eliminação de lamelas com defeitos, a estocagem, secagem e união longitudinal das pranchas (*finger joints*). A classificação inicial deve ser feita em observância às normas específicas de cada país, preferencialmente com as lamelas submetidas ao mesmo teor de umidade;
- ii. Montagem da peça estrutural: onde a cola é aplicada ao longo das tábuas e através da conformação dos elementos sobre um gabarito, acontece o processo de colagem aplicando-se uma certa pressão transversal ao conjunto;
- iii. Acabamento: onde os detalhes finais são proferidos, como o aplainamento lateral, recorte das extremidades, execução de furos e encaixes e por fim a peça passa pela aplicação de preservativo.

O fluxograma da Figura 3, apresenta as etapas do processo de fabricação da MLC:

Figura 3: Esquema do processo de fabricação da MLC.



Fonte: Adaptado de Szücs, 1992.

De forma generalizada assume-se que para vigas de MLC, as espessuras das lamelas possam variar de 15 mm a 50 mm. Peças de espessuras maiores podem apresentar problemas de secagem, com possível aparecimento de trincas ou rachaduras. Vale ressaltar que as normativas de cada país devem ser checadas antes da produção das lamelas, pois além de limites de espessuras diferentes, algumas normas, como a francesa e a brasileira, podem limitar também a área da seção transversal da lamela. No caso do projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), a mesma estabelece que a área da seção transversal máxima da lamela não ultrapasse 60 cm<sup>2</sup> para madeiras de densidade igual ou inferior a 0,50 g/cm<sup>3</sup> ou 40 cm<sup>2</sup> para madeiras de densidade superior, porém, para os dois casos, a largura final não pode ser superior a 20 cm. Para o caso de elementos curvos, a espessura de cada prancha vai depender diretamente do raio de curvatura da peça, sendo que quanto maior for o raio, mais espessas poderão ser as lamelas. Outro fator de fundamental importância é o correto preparo, aplainamento e limpeza das lamelas antes da colagem, a fim de se garantir a melhor aderência entre a tábua e a cola.

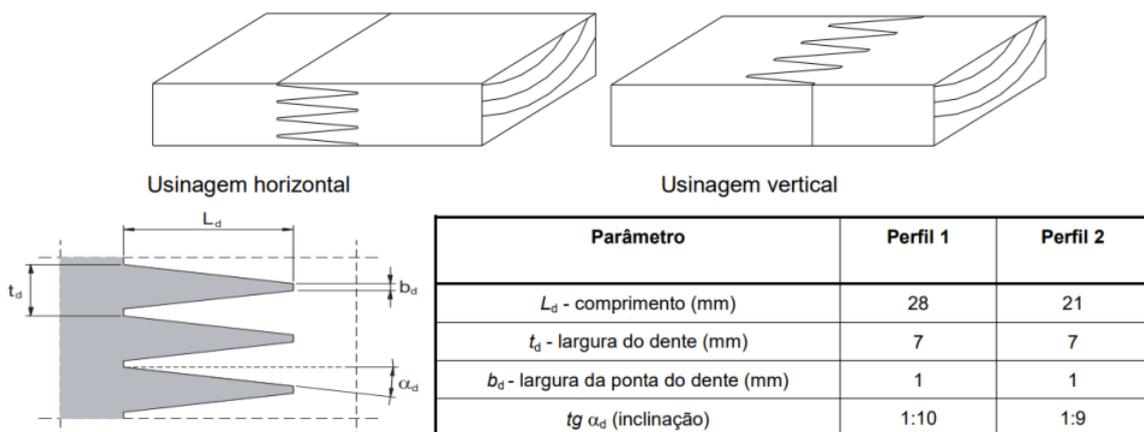
Quanto a umidade, recomenda-se que a madeira possua parâmetros máximos, após secagem em estufa, de 15% e que a variação do grau de umidade entre peças seja inferior a 5%, garantindo o controle das tensões internas devidas à retração diferencial (PFEIL et al., 2012). Se possível, aconselha-se deixar as tábuas empilhadas e aeradas após a saída da estufa, a fim de

que haja a estabilização da umidade da madeira no próprio ambiente onde será realizada a colagem. O Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) estabelece que no momento da colagem, as tábuas estejam secas e com teor de umidade máximo de 18%.

Para peças de comprimentos elevados, a continuidade de cada lamela deve ser assegurada através de juntas longitudinais. De acordo com Macedo et al. (1999), estas podem ser de diversos tipos, entre elas, as emendas de topo (*butt joints*), emendas biseladas (*scarf joints*) ou emendas dentadas (*finger joints*). Porém, o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) não permite mais o emprego das juntas de topo no processo de fabricação, e adverte que as juntas biseladas só podem ser utilizadas se tiverem sua eficiência comprovada. Assim, estabelece-se as emendas dentadas com os parâmetros estabelecidos através da Figura 4, como as mais usuais para este tipo de união.

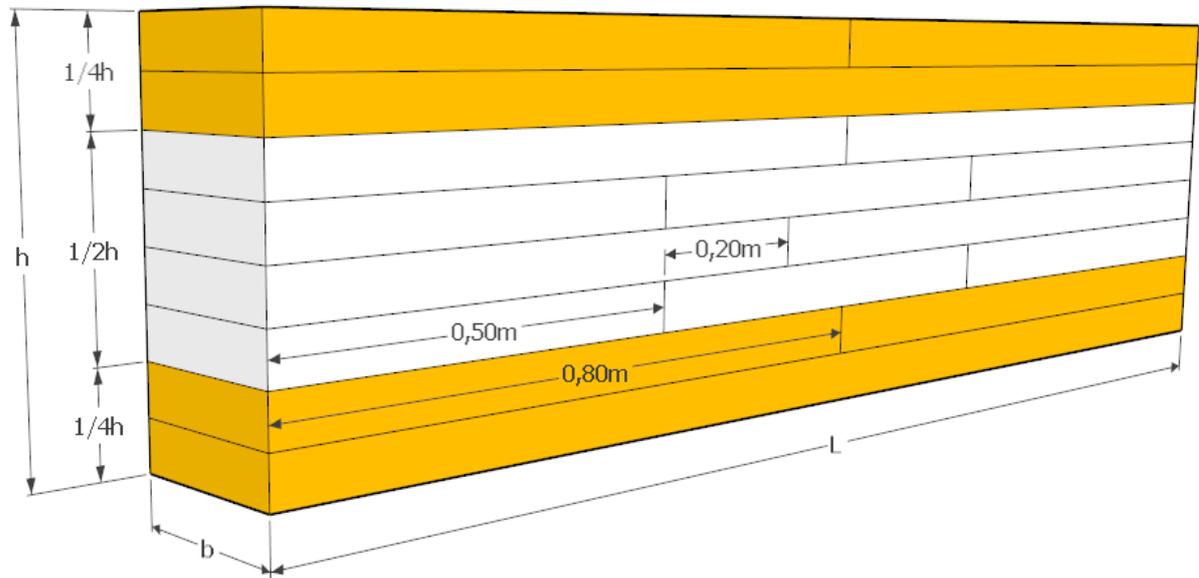
Para Khelifa et al. (2016) mesmo em excelentes condições de fabricação, a força de uma emenda será menor do que a da madeira maciça, assim a fim de se evitar perdas desnecessárias de força, deve-se tomar todos os cuidados aos fatores controláveis relacionados ao processo de produção. Assim, a fim de se evitar superfícies de falha pelo excesso de juntas longitudinais próximas, a distância mínima entre emendas posicionadas nas quartas partes mais afastadas transversalmente da linha neutra, deve ser de 80 cm, enquanto que na metade central da seção transversal, pode-se utilizar distancias de no mínimo 50 cm. Porém, a distância mínima entre lamelas adjacentes não deve ser inferior a 20 cm (Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011). A Figura 5, exemplifica essas limitações.

Figura 4: Emenda dentada vertical e emenda dentada horizontal.



Fonte: Adaptado do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011.

Figura 5: Espaços mínimos para as emendas em vigas de MLC.



É fato que emendas são os locais mais suscetíveis a falhas na estrutura, pois, além de fraquezas induzidas durante a montagem ou por conta dos entalhes, os carregamentos estáticos, dinâmicos e a deformação dos fixadores ou a secagem da madeira, também influenciam estes locais (LESKO, 2015). Em vigas de MLC, as uniões ou conexões ocorrem entre componentes constituintes, uma vez que nem sempre se consegue fabricar e transportar elementos nas dimensões necessárias, e entre as vigas e elementos de apoio ou fundações. O Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) estabelece que as ligações mecânicas das peças de madeira podem ser realizadas através de pinos metálicos (pregos ou parafusos), cavilhas (pinos de madeira torneados) ou conectores (anéis ou chapas metálicas). Ligações coladas, só podem ser empregadas em juntas da própria MLC. A Tabela 4, apresenta as principais vantagens das uniões e desvantagens de acordo com cada tipologia.

Deve-se notar que qualquer parte metálica complementar utilizada em elementos estruturais de MLC devem ter proteção adequada contra a corrosão. Cavilhas de aço inoxidável são amplamente utilizadas para pontes não cobertas, mas revestimentos de proteção zincados (imersão a quente) também são bastante comuns (MALO, 2016). Calil Júnior et al. (2012), recomenda que todas as peças metálicas utilizadas para fins estruturais, devam receber galvanização a fogo, de forma a evitar problemas decorrentes de corrosão.

Tabela 4: Pressão de colagem das ligações de continuidade das lamelas.

<b>Tipo de união para a MLC</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Vantagens</b>
Colada	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Uso de maquinário específico (prensa);</li> <li>✓ Uso de adesivo de custo elevado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Minimização dos defeitos pelas dimensões reduzidas e pela solidarização entre peças de madeira;</li> <li>✓ Obtenção de grandes estruturas a partir de peças de madeira de dimensões reduzidas;</li> <li>✓ Possibilidade de utilizar madeira de qualidade inferior;</li> <li>✓ Permite pré-fabricação dos componentes.</li> </ul>
Pregada	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alto custo do prego;</li> <li>✓ Corrosão pelo contato do prego com preservativos.</li> </ul>	
Aparafusada	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alto custo do parafuso;</li> <li>✓ Corrosão pelo contato do parafuso com preservativos.</li> </ul>	
Cavilhada	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Uso de maquinário específico para a confecção das cavilhas.</li> </ul>	

Fonte: Adaptado de Amaya, 2013.

### 2.3.2 Tipos de madeira para produção de MLC

Praticamente toda a espécie de madeira pode ser utilizada para a fabricação de elementos em MLC (MOODY et al. 1999), porém, deve-se alertar para as características físicas e químicas de algumas espécies em particular, pois podem exigir o emprego de colas especiais ou modificações de componentes adesivos comerciais. Coníferas com densidade aparente (para um teor de umidade de 12 %) entre 0,40 g/cm<sup>3</sup> e 0,75 g/cm<sup>3</sup>, normalmente, estão entre as espécies mais recomendadas, porém, Szücs (1992) indica que dicotiledôneas com baixa densidade também podem ser empregadas pois são facilmente coláveis. É fato, que espécies diferentes de árvores produzem diferentes tipos de madeira, com comportamentos diferentes, assim, a não ser que o comportamento mecânico de diferentes espécies seja comprovado, o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) instrui que deva ser evitada a composição de peças com espécies diferentes, a fim de se evitar problemas de retração diferencial e provável surgimento de tensões de cisalhamento.

Áreas de mata nativa, historicamente, sofreram com os constantes desmatamentos provocados pelas mãos do homem, que, na medida do possível, tenta preservar as áreas ainda remanescentes. Como alternativa sustentável à conservação destas florestas e o incentivo à

utilização de material renovável, as madeiras de reflorestamentos ganham cada vez mais destaque, o que impulsiona também, estudos para a utilização deste tipo de matéria-prima. Na fabricação de MLC não poderia ser diferente, no Brasil, as espécies de eucaliptos e de pinus, são as favoritas ao plantio em áreas de reflorestamento e, conseqüentemente, para a utilização em elementos de MLC, principalmente pela viabilidade econômica e facilidade física em se obter essas espécies.

É fato, que quanto à garantia da durabilidade da madeira empregada na produção da MLC, é crucial que todos os elementos sejam tratados com produtos que garantam a durabilidade do conjunto sem prejuízo à aderência da cola. Este tratamento preservativo também pode ser realizado após a fabricação das peças de MLC, desde que não provoque alterações nas juntas coladas. Calil Júnior et al. (2012), adverte que todas as peças de madeira de reflorestamento devem receber tratamento preservativo em autoclave, sistema vácuo e pressão, fundamental para garantir a durabilidade da estrutura e vida útil superior a 20 anos.

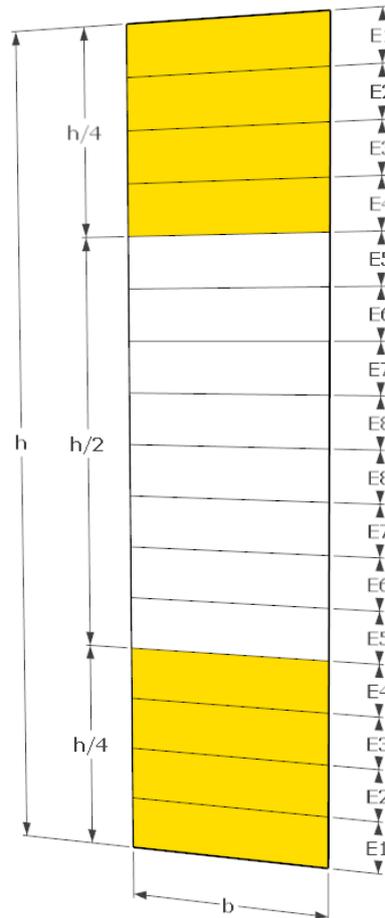
### **2.3.3 Classificação das madeiras para produção de MLC**

De acordo com o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), os lotes das tábuas que comporão as lamelas dos elementos de madeira lamelada colada, devem necessariamente passar por classificação visual, seguida de uma classificação estrutural, através do módulo de elasticidade. A classificação visual, geralmente realizada a olho nu, verifica a existência de nós, grãos e imperfeições na madeira. Assim, se identificado, um nó deve ocupar, necessariamente, menos de um quarto da seção transversal da peça, enquanto medulas, menos de um sexto da largura final da tábua. Quanto a inclinação das fibras da madeira, estas devem ficar abaixo de 6°. Rachaduras só poderão ser aceitas quando inferiores longitudinalmente a 30 cm. Ainda, para o caso de espécies de crescimento rápido, as tábuas devem apresentar no mínimo 3 anéis de crescimento de 2,5 cm cada.

Para a classificação estrutural da madeira, a única maneira real de conhecer o valor de sua resistência é romper cada peça que compõe o sistema, o que não é prático ou viável (CALIL JÚNIOR et al., 2006). Portanto, o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) estabelece que este critério seja verificado através da classificação das lamelas através de seu módulo de elasticidade na flexão. Um ensaio preliminar de 12 tábuas escolhidas ao acaso, resultará em um módulo de elasticidade médio ( $E_M$ ), que servirá como parâmetro aos sub-lotes posteriormente ensaiados, onde as tábuas do sub-lote com módulo de elasticidade superior ao  $E_M$  deverão compor as áreas mais solicitadas da seção transversal da viga de MLC, ou seja, as

quartas partes mais afastadas da linha neutra da peça. Já as peças com módulo de elasticidade inferior ao  $E_M$  poderão ser localizadas na metade central da seção transversal da peça, de acordo com a Figura 6.

Figura 6: Disposição das lamelas de acordo com o módulo de elasticidade.



$$E1 > E2 > E3 > E4 > E_M > E5 > E6 > E7 > E8$$

#### 2.3.4 Adesivos para MLC

Para unir longitudinalmente as lamelas da MLC faz-se o uso de adesivos estruturais, ou colas, capazes de desenvolver aderência entre as mesmas e resistir a esforços de cisalhamento. A escolha da cola deve levar em conta o tipo de uso previsto para a estrutura e o tipo de madeira utilizada, além de fatores como temperatura, teor de umidade e durabilidade. Szücs (1992) afirma que entre as colas mais empregadas, destacam-se as a base de caseína, uréia-formol, resorcina-formol e resorcina-fenol-formol. Para Broughton e Hutchinson (2001), os adesivos do tipo epóxis têm várias vantagens sobre outros para uso em estruturas de madeira, podendo

ser formulados em uma ampla gama de formas, características de aplicação e propriedades mecânicas quando bem curado. Já Calil Neto (2011) indica como principais adesivos utilizados na confecção da MLC, os compostos de fenolformaldeído, wonderbond, poliuretano de óleo de mamona e purbond, dando destaque aos poliuretanos e aos à base de resorcinol, por apresentarem alta resistência à umidade, tornando-os ideais para uso externo. Outros grupos genéricos de adesivos incluem acrílicos, uretanos e várias combinações de resinas de fenol e formaldeídos.

A escolha do adesivo correto deve ser feita com cautela, uma vez que tanto a escolha da espécie de madeira como o tipo de tratamento preservativo da mesma influem diretamente nas capacidades de adesão da cola. Segundinho et al. (2017) avaliou a eficiência da colagem de tábuas da espécie *Eucalyptus cloeziana* preservadas quimicamente com Arseniato de Cobre Cromatado (CCA). Em seu estudo foram utilizados seis adesivos: a melamina-ureia-formaldeído (MUF); o poliacetato de polivinila (PVA); o resorcinol-formaldeído (RF); o tanino-formaldeído (TF); a ureia-formaldeído (UF); e o poliuretano à base de mamona (PUR). Uma vez realizadas as análises, conclui-se que o CCA contribuiu de forma negativa nas propriedades físicas e mecânicas da madeira. Dentre os adesivos estudados, o MUF apresentou os melhores resultados, representados por maiores penetrações do adesivo no material e conseqüentemente, maiores valores de resistência ao cisalhamento.

Vale ressaltar, que deve-se seguir atentamente as instruções dos fabricantes dos adesivos quanto a quantidade e pressão que deve ser empregada. Quando da ausência de recomendações do fabricante, o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) recomenda entre as lamelas longitudinais uma pressão mínima de 0,7 MPa para madeiras de densidade inferior a 0,5 g/cm<sup>3</sup> e de 1,2 MPa para densidades superiores a 0,5 g/cm<sup>3</sup>. Ainda, a pressão deve ser mantida por no mínimo 6 horas, tomando-se por base a temperatura de 20 °C e o teor de umidade relativa do ar de 65%, após, deve-se realizar a retirada da pressão de forma gradativa em pontos alternados ao longo da peça. Ao final, a resistência da junta colada deve ser no mínimo igual à resistência ao cisalhamento longitudinal da madeira.

Segundinho et al. (2013) analisou vigas de MLC da espécie nativa Cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm) utilizando adesivos à base de resorcina-fenol-formaldeído (RFF) e poliuretano (PUR). Para tal aplicou respectivamente intensidades de pressão de 0,8 MPa e 1,2 MPa. Em outro estudo, Segundinho et al. (2015) produziu para fins de ensaio vigas de MLC, utilizando as espécies *Tectona grandis*, *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus sp.* O adesivo escolhido, aplicado em ambas as faces das lamelas com gramaturas de 200 a 250 g/m<sup>2</sup> (linha dupla de cola), foi um bicomponente de aplicação estrutural à base de melamina-ureia-formaldeído com

pressão de colagem mínima de 1,0 MPa. Petruski et al. (2016) avaliou o comportamento estrutural de pórticos confeccionados a partir de elementos de MLC de tábuas de eucalipto e adesivo de resorcinol-formaldeído (RF) utilizando como quantidade de adesivo na construção dos pórticos 250 g/m<sup>2</sup> e pressão de colagem de 1,3 MPa.

Para entalhes múltiplos, as pressões exercidas, devem seguir o que indica a Tabela 5, em função do comprimento do dente ( $L_d$ ), desde que a pressão não provoque fissura longitudinal superior a 5 mm na região do fundo dos dentes e que seja exercida por no mínimo 2 segundos (Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011).

Tabela 5: Pressão de colagem das ligações de continuidade das lamelas.

$L_d$ (mm)	Pressão de colagem (MPa)	
	densidade $\leq 0,5$ g/cm <sup>3</sup>	densidade $> 0,5$ g/cm <sup>3</sup>
10	12	14
20	8	10
30	6	8
40	4,5	6,5
50	3	5
60	2	4

Fonte: Adaptado do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011.

### 2.3.5 Ensaios de caracterização para a madeira lamelada colada

Para a aplicação da MLC em projetos de estruturas, o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) recomenda que os ensaios sejam realizados a partir de corpos de prova extraídos das peças fabricadas devendo-se realizar, através de norma específica, os seguintes ensaios:

- i. Caracterização da rigidez das lamelas;
- ii. Resistência ao cisalhamento das lamelas;
- iii. Resistência à tração na lâmina de cola;
- iv. Resistência das emendas dentadas.

Após encontrados os parâmetros de resistência, os valores característicos para os ensaios de resistência ao cisalhamento, resistência à tração da lâmina de cola e resistência das emendas dentadas devem ser obtidos através da Equação 3, com os resultados orientados em ordem

crescente ( $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ ), desprezando-se o valor mais alto, uma vez que seja ímpar, o número de corpos de prova, não se tomando para  $x_{wk}$  valor inferior a  $x_1$ , nem a 0,7 do valor médio  $x_m$ .

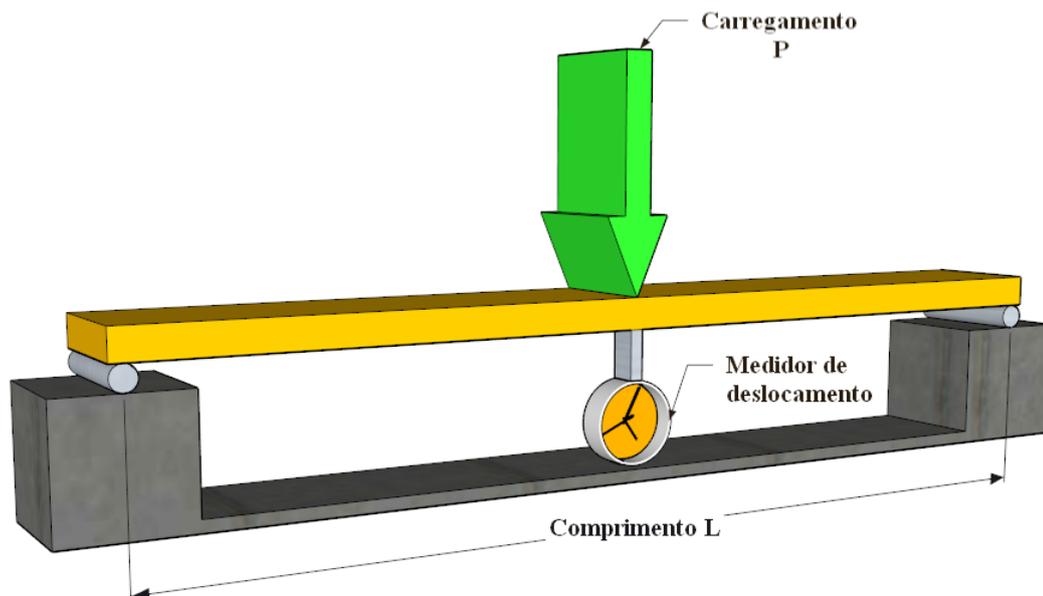
$$x_{wk} = \left( 2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{n/2 - 1} - x_{\frac{n}{2}} \right) 1,1 \quad \text{Equação (3)}$$

### 2.3.5.1 Caracterização da rigidez das lamelas

Para a caracterização da rigidez das lamelas de madeira, as peças podem ser submetidas ao ensaio não destrutivo de flexão estática, onde se aplica uma força ( $P$ ) conhecida no centro do vão ( $L$ ) de uma viga bi-apoiada em relação ao seu eixo de menor inércia ( $I$ ), medindo-se seu deslocamento vertical ( $\delta$ ), de acordo com a Figura 7. Determinando assim, o módulo de elasticidade ( $E$ ) obtido através da Equação 4.

$$E = \frac{(P \times L^3)}{(48 \times I \times \delta)} \quad \text{Equação (4)}$$

Figura 7: Ensaio não destrutivo de flexão estática.



A fim de se determinar de forma mais precisa o módulo de elasticidade, recomenda-se uma relação vão livre sobre altura maior ou igual a 20, assim reduz-se a influência do esforço cortante no deslocamento vertical (CHEUNG, 2003).

Ainda, há a possibilidade de se realizar a avaliação não-destrutiva por meio da técnica de vibração transversal, onde se relaciona a rigidez de cada lamela ensaiada à frequência natural de vibração da peça. De acordo com Calil Neto (2011), a técnica consiste em se aplicar um golpe em uma peça de madeira bi-apoiada tendo uma célula de carga em uma das pontas. A vibração captada pela célula de carga por conta do golpe proferido, é transferida a um circuito condicionador que a amplifica, filtra e digitaliza seus resultados até um computador, que determina a frequência do sinal oscilante. O módulo de elasticidade é então determinado em função da frequência de vibração da madeira, da densidade (ou massa) da viga, das características geométricas da peça e da aceleração da gravidade (geralmente  $9,8 \text{ m/s}^2$ ). Segundinho et al. (2013) relacionou o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{Mvt}$ ), obtido através da técnica de vibração transversal, com o módulo de elasticidade estático ( $E_M$ ), obtido do ensaio de flexão estático, da espécie nativa Cedrinho para a construção de vigas de MLC verificando que o  $E_{Mvt}$  apresentou de fato um coeficiente de correlação com o  $E_M$ , concluindo que o  $E_{Mvt}$  é um bom estimador do  $E_M$ .

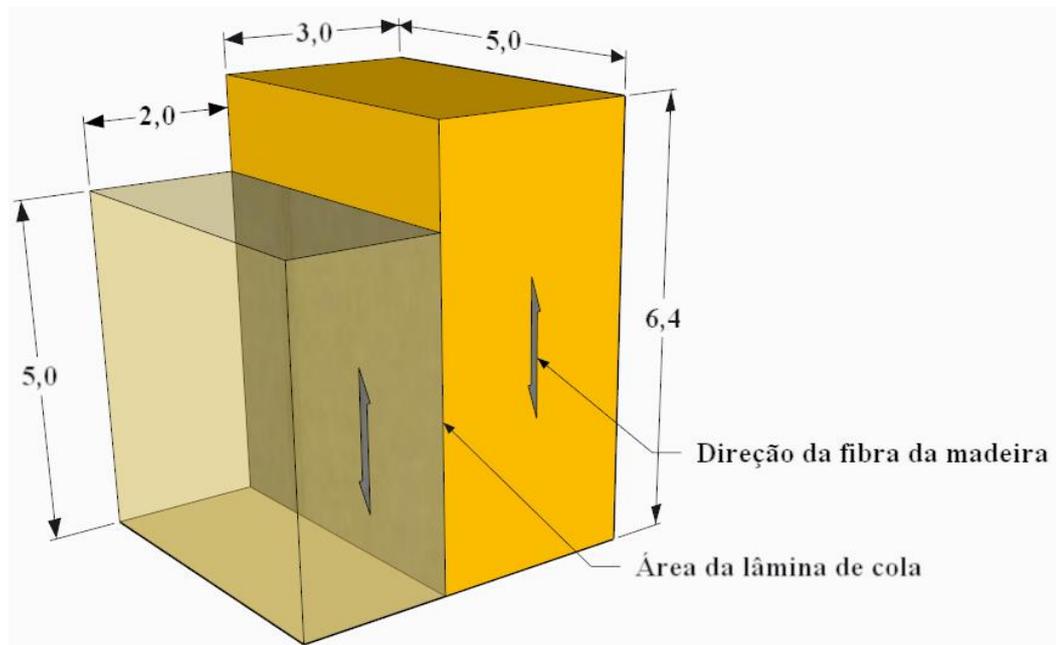
Existem também outras formas e diferentes ensaios para se estimar o módulo de elasticidade das lamelas, como por exemplo, os testes realizados por Klapálek et al. (2016), que comparou o módulo de elasticidade de vigas de MLC por dois métodos diferentes. Medições em micro nível foram realizadas através de nanoidentificação, onde pequenas pontas diamantadas são forçadas na madeira e dois parâmetros básicos são medidos: força de carga e deformação do material, a partir dos quais se obtém o módulo de elasticidade. Já em nível macro o mesmo autor utilizou o método de penetração, onde a medição é feita com o uso de um dispositivo mecânico chamado Pilodyn 6J, que impulsiona um elemento de ponta no material testado e a profundidade do furo é medida, onde, a partir desses valores é possível, com uso de equações deduzidas experimentalmente, calcular valores de módulo de elasticidade. Neste estudo concluiu-se que as caracterizações pelos dois métodos eram válidas, uma vez que apresentavam resultados dentro da margem de erro esperada.

### **2.3.5.2 Resistência ao cisalhamento das lamelas**

No ensaio de resistência ao cisalhamento das lamelas, as medidas dos corpos-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm, seguindo as proporções e a área de ruptura ( $A_V$ ) apresentadas na Figura 8. Onde o carregamento ( $P$ ) deve ser crescente, a uma taxa de 2,5 MPa/min, assim, a resistência máxima da cola na lamela ( $f_v$ ) dá-se na ruptura causada pela força máxima ( $P_{V,máx}$ ) através da Equação 5:

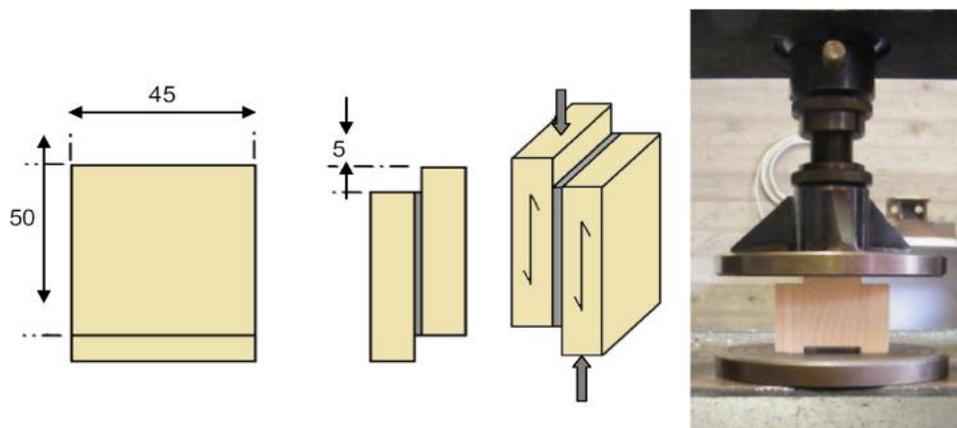
$$f_V = \frac{P_{V,m\acute{a}x}}{A_V} \quad \text{Equa\c{c}\~{a}o (5)}$$

Figura 8: Corpo de prova para ensaio de cisalhamento na lamela.



Frangi et al. (2004), De Almeida et al. (2011), Calil Neto et al. (2014) e Segundinho et al. (2015) realizaram o ensaio de cisalhamento contemplando também corpos de prova retirados da seção transversal de suas peças estruturais de MLC. Vale ressaltar ainda que este tipo de ensaio pode variar de acordo com especificidades do país em que é realizado ou da bibliografia que é seguida, como é o caso do estudo realizado por Khelifa et al. (2016), onde o mesmo utilizou proporções apresentadas de acordo com a Figura 9.

Figura 9: Corpo de prova e ensaio de cisalhamento na lamela.



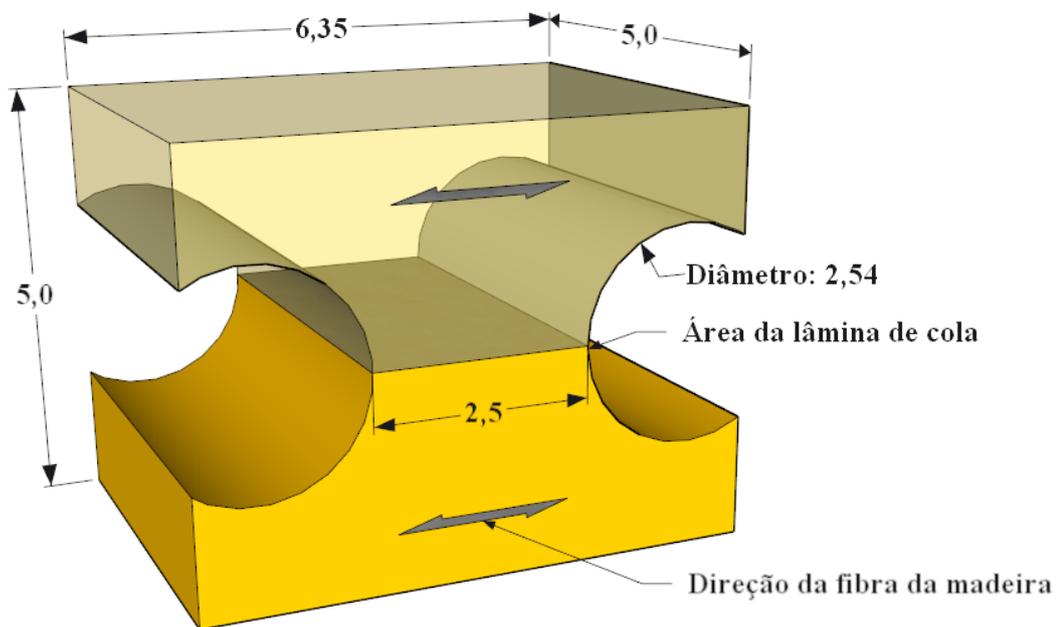
Fonte: Khelifa et al., 2016.

### 2.3.5.3 Resistência à tração na lâmina de cola

O ensaio de resistência à tração normal da madeira lamelada colada ( $f_{t90}$ ) é caracterizado pela obtenção da máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo-de-prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme de certa área ( $A$ ) e comprimento não menor que  $2,5\sqrt{A}$ . As medidas dos corpos-de-prova devem ser feitas com exatidão de 0,1 mm, de acordo com a Figura 10 e o carregamento tracional ( $P$ ) a que o elemento estará submetido deve ser crescente, a uma taxa de 2,5 MPa/min (ABNT NBR 7190, 1997). A Equação 6 descreve a obtenção do parâmetro  $f_{t90}$ , em função do carregamento máximo ( $P_{t90,máx}$ ) que leva o corpo de prova à ruptura.

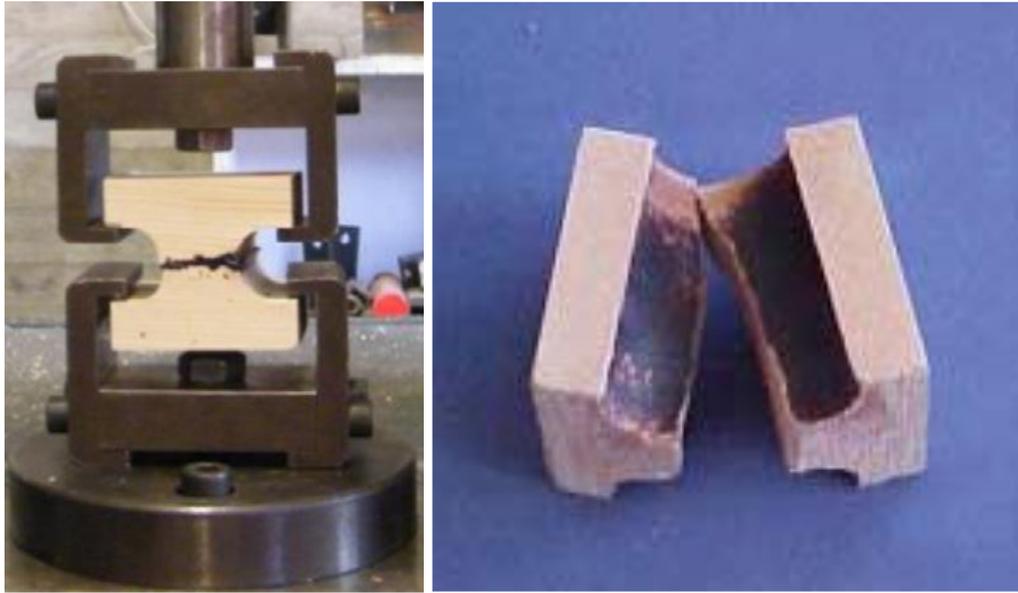
$$f_{t90} = \frac{P_{t90,máx}}{A} \quad \text{Equação (6)}$$

Figura 10: Corpo de prova para ensaio de tração da lâmina de cola.



Experimentalmente as dimensões da peça remetem a falha na linha adesiva, ou seja, na superfície da cola, porém pode acontecer a falha também devida a coesão da própria madeira, quando a fratura permite que uma camada de adesivo permaneça em ambas as partes dos elementos ensaiados. A figura 11 exemplifica o ensaio de tração normal da madeira lamelada colada realizado (a) e o corpo de prova rompido após o ensaio (b).

Figura 11: Ensaio de tração da lâmina de cola.



Fonte: (a) Khelifa et al., 2016; (b) Zangiácomo, 2003.

### 2.3.6 Critérios de dimensionamento em vigas de MLC

As estruturas devem absorver e transferir cargas externas para a terra e também lidar com esforços internos correspondentes, seja tração, compressão, flexão ou cisalhamento, levando a tensões e deformações na estrutura que não devem exceder os limites projetados (FRANKE et al., 2015). Visando a economia e a segurança na construção, o dimensionamento de elementos estruturais de madeira devem sempre obedecer a critérios de falha previstos em normativas e bibliografias específicas, de acordo com os esforços à que são submetidos.

Como etapas gerais para o dimensionamento de elementos em madeira lamelada colada, inicialmente, o projetista deve definir, a madeira que possivelmente queira utilizar, um processo para escolha com base na estimativa de suas propriedades mecânicas. Permite-se, ainda, valer-se de recomendações de classes de resistência para o dimensionamento, garantindo assim, a posterior escolha da espécie específica que se enquadre na classe previamente utilizada, ampliando-se o número de espécies à disposição. Na sequência, estimam-se os carregamentos e ações (permanentes e variáveis) a que o elemento é submetido, juntamente com os esforços de flexão e cisalhamento provocados. Com os valores obtidos, inicia-se a etapa de dimensionamento das peças, através dos estados limites últimos e de serviço, incluindo o dimensionamento das ligações. Por fim, efetua-se a revisão do peso próprio inicialmente estimado, e geram-se os detalhamentos e especificações do projeto. Vale ressaltar ainda, que

durante a fase de dimensionamento, alguns ensaios se fazem necessários à fim da correta caracterização dos elementos de MLC.

### 2.3.6.1 Tensão de flexão reta simples

Para vigas submetidas ao esforço de flexão reta simples, a segurança do sistema, de acordo com o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), é garantida quando as Equações 7 e 8 são atendidas:

$$\sigma_{c1,d} \leq f_{c,d} \quad \text{Equação (7)}$$

$$\sigma_{t2,d} \leq f_{t,d} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

$\sigma_{c1,d}$  é a tensão atuante de cálculo na borda mais comprimida da seção transversal;

$\sigma_{t2,d}$  é a tensão atuante de cálculo na borda mais tracionada da seção transversal;

$f_{c,d}$  é a resistência à compressão do elemento;

$f_{t,d}$  é a resistência à tração do elemento.

As resistências a compressão e a tração das vigas de MLC podem ser definidas pelas Equações 9 e 10:

$$\sigma_{c1,d} = \frac{M_d y_{c1}}{I} \quad \text{Equação (9)}$$

$$\sigma_{t2,d} = \frac{M_d y_{t2}}{I} \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$M_d$  é o momento de flexão de cálculo;

$y_{c1}$  é a distância do eixo horizontal entre o centro geométrico e a borda mais comprimida;

$y_{t2}$  é a distância do eixo horizontal entre o centro geométrico e a borda mais tracionada;

I é o momento de inércia em relação ao eixo horizontal que cruza o centro geométrico.

### 2.3.6.2 Tensão de cisalhamento

Para vigas de seções retangulares submetidas ao esforço de cisalhamento, a tensão máxima de cisalhamento atuante pode ser definida e sua segurança verificada pela Equação 11 (Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011).

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{A} \leq f_{v,d} \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

$\tau_d$  é a máxima tensão cisalhante atuando no ponto mais solicitado da peça;

$V_d$  é a força cortante na seção em estudo;

$A$  é a área da seção transversal da viga;

$f_{v,d}$  é o a resistência ao cisalhamento do elemento.

### 2.3.6.3 Flecha máxima admitida

A verificação das deformações máximas admitidas ou flecha máxima, visa evitar deslocamentos verticais excessivos que possam comprometer a utilização ou o aspecto estético do conjunto. Assim, o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) considera que para vigas bi-apoiadas, a flecha efetiva não pode superar o valor do vão/300.

### 2.3.6.4 Rigidez à flexão das vigas de MLC

Para a caracterização da rigidez à flexão das vigas de MLC, pode-se utilizar do mesmo procedimento demonstrado na seção 2.3.5.1, calculado através da equação 4. Porém, uma vez que as vigas de madeira lamelada coladas são constituídas da combinação de diversas lamelas com diferentes módulos de elasticidade à flexão, a rigidez à flexão do conjunto pode também ser calculado pela consideração da seção transformada (Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011), através da Equação 12, como se segue:

$$EI = [2 \times E_{M,s} \times I_{(1/4)} + E_{M,i} \times I_{(1/2)}] \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

$EI$  é a rigidez à flexão do elemento estrutural;

$E_{M,s}$  é o valor médio dos módulos de elasticidade do lote de valores superiores;

$E_{M,i}$  é o valor médio dos módulos de elasticidade do lote de valores inferiores;

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

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

Ainda, segundo o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), se o número de lamelas para compor as camadas menos solicitadas, representadas pelo trecho central e possuindo 1/4 da altura da seção transversal da viga não for um valor inteiro, deve-se arredondar para o valor inteiro superior se a parcela decimal for igual ou superior a 0,5, caso contrário, despreza-se a parcela decimal, considerando-se apenas o valor inteiro.

### 2.3.6.5 Ações e valores representativos em vigas de MLC

A ABNT NBR 8681 (2003) caracteriza ações como sendo causas que provocam esforços ou deformações nas estruturas. Estas, nas estruturas podem ser divididas em ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais.

Ações permanentes são ações com valores constantes durante praticamente toda a vida da construção, como o peso próprio de todos os elementos, estruturais ou não, geralmente acrescido de 3% por conta da consideração dos elementos de ligação metálicos. Admite-se uma variação máxima de 5% entre o peso real e o estimado inicialmente dos constituintes para fins de dimensionamento. Ainda, ações permanentes decorrentes da variação térmica costumam não ser considerados, uma vez que não são significativos para a madeira (CALIL JÚNIOR et al., 2012). Por sua vez, ações variáveis são as que possuem variações significativas em torno de sua média ao longo da vida da estrutura e por fim, ações excepcionais compreendem situações anormais ou pouco frequentes.

O valor de cálculo de uma propriedade da madeira ( $X_d$ ) deve ser obtido através do valor característico respectivo ( $X_k$ ) com o uso da Equação 13:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_w} \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

$k_{mod}$  é o coeficiente de modificação;

$\gamma_w$  é o coeficiente de minoração das propriedades da madeira, que para os estados limites últimos estabelece o valor de 1,4 para tensões de compressão paralela às fibras e 1,8 para tensões de tração e cisalhamento paralelas às fibras. Já para os estados limites de serviço o coeficiente adota o valor de 1,0.

Em verificações de segurança que dependem da rigidez da madeira, o módulo de elasticidade efetivo e o módulo de elasticidade transversal efetivo podem ser obtidos através das Equações 14 e 15, respectivamente:

$$E_{c0,ef} = k_{mod} \times E_{c0,m} \quad \text{Equação (14)}$$

$$G_{ef} = E_{c0,ef}/15 \quad \text{Equação (15)}$$

Onde:

$E_{c0,ef}$  é o módulo de elasticidade paralelo as fibras efetivo da madeira;

$E_{c0,m}$  é o módulo de elasticidade médio paralelo as fibras da madeira;

$G_{ef}$  é o módulo de elasticidade transversal efetivo da madeira;

O coeficiente de modificação é calculado através da Equação 16:

$$k_{mod} = k_{mod1} \times k_{mod2} \times k_{mod3} \quad \text{Equação (16)}$$

O coeficiente de modificação  $k_{mod1}$  leva em conta a classe de carregamento e o tipo de material empregado, que para a madeira lamelada colada segue os valores apresentados da Tabela 6. Por sua vez, o coeficiente de modificação  $k_{mod2}$  leva em conta a classe de umidade e o tipo de material empregado, de acordo com a Tabela 7.

Tabela 6: Definição de classes de carregamento e valores de  $k_{mod1}$ .

Classes de carregamento	Ação variável principal da combinação		MLC
	Duração acumulada	Ordem de grandeza	$k_{mod1}$
Permanente	Permanente	Vida útil da construção	0,60
Longa duração	Longa duração	Mais de seis meses	0,70
Média duração	Média duração	Uma semana a seis meses	0,80
Curta duração	Curta duração	Menos de uma semana	0,90
Instantânea	Instantânea	Muito curta	1,10

Fonte: Adaptado do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011.

Tabela 7: Valores de  $k_{mod2}$ .

Classes de umidade	$k_{mod2}$
1	1,00
2	0,90
3	0,80
4	0,70

Fonte: Adaptado do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011.

Por fim, o coeficiente de modificação  $k_{mod3}$  considera a qualidade da madeira. Como a madeira lamelada colada deve sempre passar por um processo de classificação mecânica e visual, o  $k_{mod3}$  leva em consideração para este caso a curvatura da peça, valendo  $k_{mod3} = 1,0$  para peças retas.

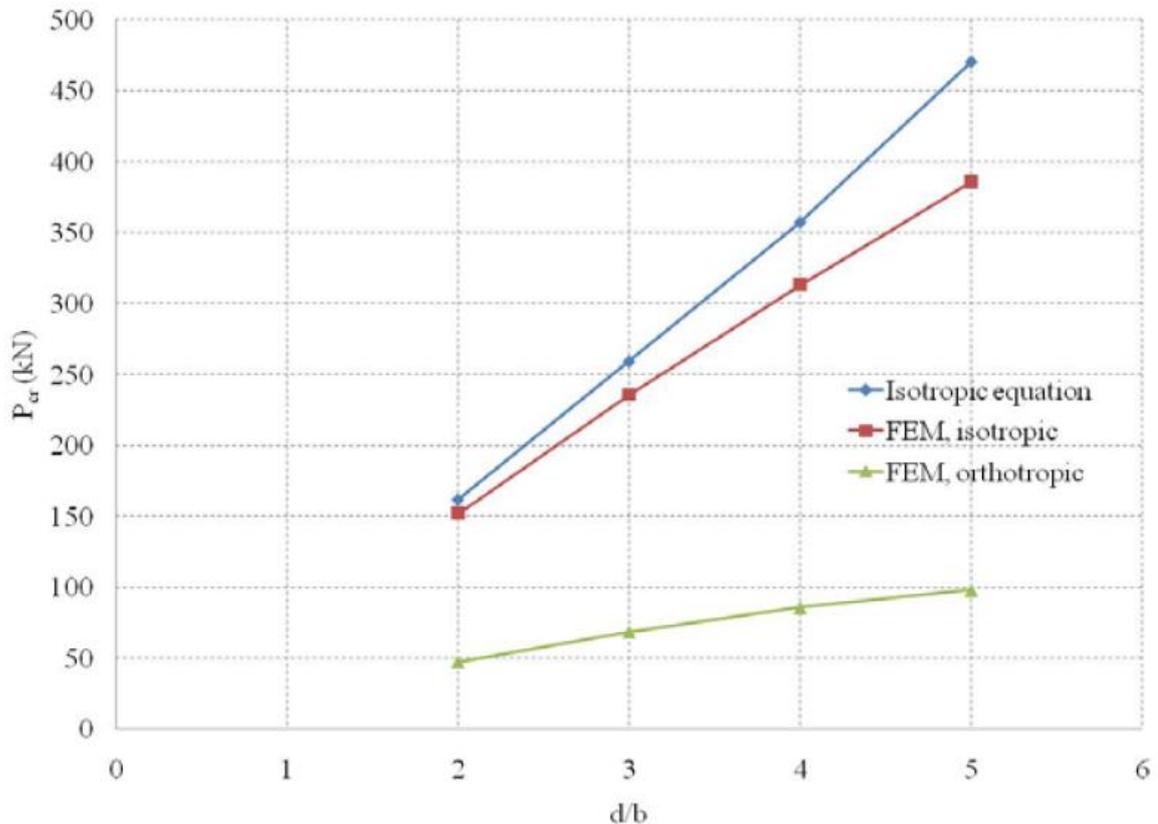
## 2.4 A instabilidade lateral em vigas de madeira

A instabilidade lateral, cujo conceito foi trazido ao mundo por Euler (1744) e Lagrange et al. (1867) nos séculos XVIII e XIX e mais à frente, discutida por Timoshenko e Gere (1961), é uma problemática da mecânica clássica e uma das propriedades mais importantes da engenharia de estruturas (SU, et al., 2019). É fato que diferentes fatores influem diretamente na capacidade de suporte de uma viga para que não ocorra a instabilidade lateral torcional do elemento, mas de uma forma geral, elementos de vigas submetidas a flexão com grande relação altura/largura estão mais propensos a sofrer estes efeitos.

Em vigas de madeira o processo não é diferente, variados estudos conduzidos ao longo do tempo visaram justamente, a análise e o melhor entendimento deste fenômeno tão importante a estabilidade estrutural de um sistema. Pelletier e Doudak (2019) citam como referência a estes estudos, os trabalhos de Hooley e Madsen (1964) que concluíram experimentalmente e teoricamente que a relação de comprimento da viga e esbelteza da seção transversal rege diretamente a estabilidade lateral de vigas de madeira; de Zahn (1973) que formulou as condições de equilíbrio que governam a instabilidade lateral de vigas retangulares de madeira com decks apoiados sobre ela continuamente; de Bell e Eggen (2001) que investigaram as capacidades de vigas e colunas retangulares de madeira submetidas a instabilidade lateral, através de modelos lineares e não-lineares onde uma redução de 10% para a carga axial crítica e momento crítico de flexão por conta da instabilidade lateral foram observadas experimentalmente em relação a formulação normatizada; ainda, de Hindman et al. (2005) que estudaram o comportamento que a instabilidade lateral de vigas retangulares de diferentes compostos de madeira provocam; e de Baláz (2005) que investigou a instabilidade lateral torcional de vigas de madeira e propôs uma expressão para calcular os momentos críticos elásticos.

St-Amour e Doudak (2018), de forma complementar, apontam ainda como referência, o trabalho de Suryoatmono e Tjondro (2008), que investigaram a estabilidade lateral torcional elástica de vigas de seção retangular feitas de madeira sob várias condições de carregamento. Modelos tridimensionais de Elementos Finitos considerando o comportamento ortotrópico e isotrópico da madeira foram utilizados para prever a carga crítica elástica que provoca a instabilidade lateral dos elementos. Os efeitos das relações altura/largura da seção transversal e a orientação das fibras da madeira também foram estudadas. Ao final de seus experimentos, chegou-se à conclusão de que para todos os casos considerados, as cargas críticas previstas usando modelos de elementos finitos assumindo madeira como material ortotrópico foram muito menores do que aquelas assumindo a madeira como material isotrópico. As cargas críticas previstas de vigas com as fibras a 45° resultaram em aproximadamente um terço das cargas críticas previstas de vigas com as fibras paralelas. Ainda, concluíram que os resultados de elementos finitos concordaram muito bem com os testes experimentais. A Figura 12 exemplifica as cargas críticas encontradas pelos autores considerando através da modelagem numérica a madeira como material ortotrópico (verde), material isotrópico (vermelho) e através das equações isotrópicas da literatura considerada (azul).

Figura 12: Carga crítica ( $P_{cr}$ ) de vigas retangulares de madeira para diferentes relações altura/largura ( $d/b$ ).



Fonte: St-Amour e Doudak, 2008.

Xiao et al. (2014) conduziram uma análise de sensibilidade sobre o efeito das propriedades dos materiais ortotrópicos no comportamento da instabilidade torcional lateral de vigas de madeira retangulares através de uma análise numérica. O estudo mostrou que o modelo desenvolvido foi mais afetado pela variação no módulo de elasticidade longitudinal e no módulo de cisalhamento transversal da madeira, demonstrando a importância destes fatores em uma análise futura. Mais tarde, o mesmo grupo de pesquisadores realizaram uma investigação numérica e experimental em escala real visando estabelecer a capacidade máxima de momento para que não ocorra a instabilidade torcional lateral elástica de vigas retangulares de madeira e compará-las com as normativas e recomendações europeias (EN-EUROCODE 5, 2004), realizando ainda considerações e comparações analíticas com as normativas americanas (AFPA, 2003) e canadenses (CAN-CSA, 2015). A Figura 13 demonstra o dispositivo experimental de aplicação de carga proposto. Após a validação do modelo numérico com o experimental predizendo com segurança o perfil elástico e a capacidade de encurvamento torcional das vigas de madeira ensaiadas, conclui-se que para carregamentos considerados no

centro geométrico da seção transversal da peça, as normativas europeias e americanas mostraram-se ligeiramente conservadoras em relação ao modelo numérico, porém quando o carregamento encontrava-se na face inferior da seção transversal, as formulações mostraram-se muito conservadoras e quando o carregamento era aplicado no topo da seção transversal, as equações analíticas mostram-se não conservadoras. Ao final os autores propuseram um ajuste na formulação analítica europeia, mais realista com o encontrado numericamente e experimentalmente (XIAO et al., 2017).

Figura 13: Dispositivo de aplicação de carregamento.



Fonte: Xiao et al., 2017.

Du (2016) investigou a contribuição de decks apoiados sobre duas vigas de madeira na análise da estabilidade lateral destes elementos, concluindo que de forma geral, os efeitos restritivos das tábuas de deck apoiando-se na parte comprimida das vigas possuem uma influência significativa sobre a torção lateral e a capacidade de curvatura dos conjuntos duplos de vigas. Já Hu et al. (2017) investigaram os efeitos da altura de contraventamento em vigas de madeira submetidas a instabilidade lateral torcional, gerando um grande banco de dados usado para desenvolver expressões simples para determinar a rigidez de contraventamento necessária para maximizar a resistência elástica da instabilidade lateral das vigas.

No mesmo ano, um estudo realizado por Jiao et al. (2017), promoveu a investigação do efeito da geometria na capacidade de suporte da carga crítica para a instabilidade lateral em

vigas I com elementos em madeira compensada e alma com formato senoidal. Como resultado, obteve-se um aumento significativo da carga que provoca a instabilidade (mínimo 17,17%) obtido entre os modelos considerando-se a alma plana em comparação com a sinusoidal.

Ainda, Pelletier e Doudak (2019) investigaram a instabilidade lateral torcional de vigas de seção I de madeira utilizando como apoio conectores metálicos comerciais tipo pendurais, a fim de simular o mais realístico possível as condições de contorno das peças. Um modelo 3D numérico também foi desenvolvido usando programa de elementos finitos *Abaqus* para determinar as cargas de instabilidade. Ao final de seu estudo concluíram pela recomendação na redução de 20% da capacidade do momento crítico a ser considerado levando em conta as condições de contorno mais realistas. A análise linear por elementos finitos da instabilidade lateral foi demonstrada como razoável com os resultados experimentais encontrados.

Vale ressaltar que visando o correto travamento de possíveis solicitações laterais, elementos de contraventamento podem ser posicionados transversalmente às vigas principais, gerando estabilidade e rigidez ao conjunto, além da melhora na distribuição das ações do vento na estrutura. Para o dimensionamento do contraventamento, imperfeições geométricas, excentricidades dos carregamentos e efeitos de segunda ordem decorrentes das deformações das peças fletidas devem ser levadas em consideração (Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190, 2011). Para estes elementos pode-se fazer o uso de peças de madeira serrada, MLC ou ainda estruturas metálicas (perfis, treliças ou cabos atirantados) conectadas às vigas principais do conjunto. Quanto ao espaçamento recomendado para a utilização de contraventamentos, além das prescrições normativas, Ritter (1990) recomenda a utilização de limitadores transversais no máximo a cada 6 metros lineares de vigas.

As Figuras 14 e 15 exemplificam estes elementos de enrijecimento.

Figura 14: (a) Contraventamento metálico; (b) Contraventamento atirantado.



Fonte: (a) Federal Highway Administration, 2012; (b) Bridge Engineering, 2008.

Figura 15: (a) Contraventamento em madeira serrada; (b) Contraventamento em MLC.



Fonte: (a) Federal Highway Administration, 2012; (b) LRFD, <http://laminatedconcepts.com/timber-vehicular-bridges/mjp2g76u2vtnc06ok9jq4vjutl78it/5/2/20152015/2/5/mjp2g76u2vtnc06ok9jq4vjutl78it>, acessado em 03/11/2018.

## 2.5 Momento crítico para a instabilidade lateral em vigas

Para a consideração de critérios de cálculo, a fim de se verificar a segurança sobre a estabilidade lateral de uma viga em madeira lamelada colada, deve-se utilizar de critérios normativos e referenciais bibliográficas visando a total compreensão da temática.

### 2.5.1 Momento crítico segundo Timoshenko e Gere (1963)

Considerado o pai da resistência dos materiais, Stephen P. Timoshenko é o pioneiro no estudo da estabilidade lateral de elementos de barra. É pertencente a ele, o desenvolvimento da formulação sobre instabilidade lateral-torcional de vigas maciças, homogêneas e de comportamento isotrópico (TIMOSHENKO e GERE, 1963).

Considerando-se uma viga bi-apoiada, com as extremidades impedidas de rotacionar em torno de seu eixo longitudinal e livres para a rotação em torno do eixo principal de maior inércia, submetida a um carregamento concentrado (P) no centro do vão, normal ao plano de sua maior rigidez transversal, de acordo com a Figura 16, a instabilidade lateral, começa a ser significativa a partir do ponto onde o momento fletor excede o valor do momento crítico ( $M_{cr}$ ), correspondente a Equação 17, sendo EI a parcela da rigidez à flexão e GJ a parcela da rigidez torcional da viga.

$$M_{cr} = \frac{4,235\sqrt{EI_y GJ}}{L} \quad \text{Equação (17)}$$

Onde:

$E$  é o módulo de elasticidade longitudinal do material;

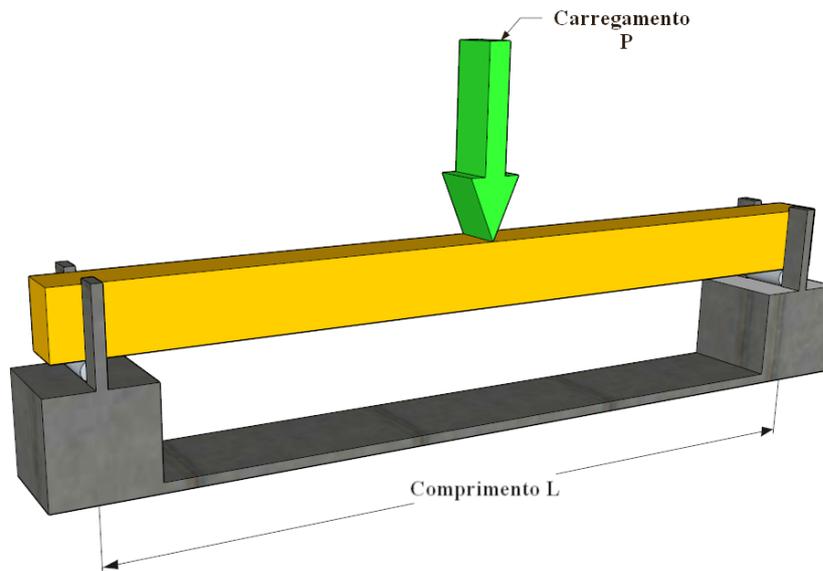
$I_y$  é o momento de inércia referente a menor dimensão da seção transversal da peça;

$G$  é o módulo de elasticidade transversal do material;

$J$  é o momento de inércia torcional da viga;

$L$  é o comprimento da viga entre apoios.

Figura 16: Viga bi-apoiada submetida a um carregamento  $P$ .

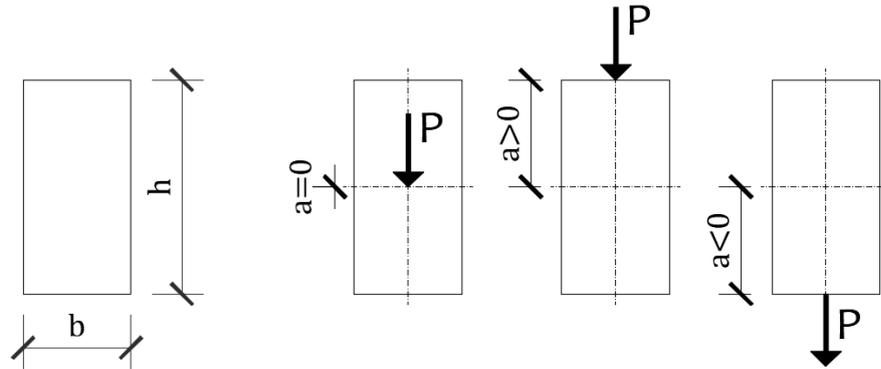


Assim, contanto que o carregamento permaneça abaixo da carga crítica que gera o momento crítico ( $M_{cr}$ ), o elemento de viga permanecerá estável lateralmente. Há de se notar que a carga crítica está intimamente ligada aos fatores geométricos da seção transversal da viga, onde conforme a esbeltez transversal aumenta, decresce o valor resistido pela mesma antes de ocasionar a instabilidade lateral teórica do elemento. Uma vez que elementos adicionais impeçam o giro da viga ao longo de seu comprimento, a formulação da equação 18 pode ser adaptada de acordo com o número e posição desses travamentos.

É fato que a Equação 17 foi desenvolvida com o conceito de que a carga  $P$  seja aplicada no centro geométrico da seção transversal da viga, contudo em grande parte dos casos práticos, como o caso de vigas de MLC, este efeito não ocorre. Sendo assim, Timoshenko e Gere. (1963), desenvolveram um fator de correção ( $a$ ) para a formulação original, que levou em consideração a posição do carregamento ao longo da altura da seção transversal da peça, como exemplificado na Figura 17, onde a formulação corrigida se apresenta na Equação 18 a seguir:

$$M_{cr} = \frac{4,235\sqrt{EI_y GJ}}{L} \left( 1 - \frac{1,74a}{L} \sqrt{\frac{EI}{GJ}} \right) \quad \text{Equação (18)}$$

Figura 17: Aplicação da carga ao longo da altura da seção transversal.



Fonte: Scapinello et al., 2018.

### 2.5.2 Momentos críticos normalizados para a instabilidade lateral da madeira

Para o caso de vigas de madeira de seção retangular de certa largura ( $b$ ) e altura ( $h$ ), o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) estabelece critérios para a dispensa de verificação da segurança em relação ao estado limite último de instabilidade lateral, desde que os apoios de extremidade impeçam a rotação da viga ao longo do seu eixo longitudinal e que exista um conjunto de elementos de travamento, os chamados contraventamentos a uma distância não superior a  $L_1$ , sendo:

$$\frac{L_1}{b} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\beta_M f_{c0,d}} \quad \text{Equação (19)}$$

$$\beta_M = \frac{4}{\pi} \frac{\beta_E}{\gamma_f} \frac{\left(\frac{h}{b}\right)^{3/2}}{\left(\frac{h}{b} - 0,63\right)^{1/2}} \quad \text{Equação (20)}$$

Onde:

$f_{c0,d}$  é a resistência à compressão paralela às fibras de cálculo;

$\gamma_f$  é o coeficiente majorador/minorador com valor de 1,4;

$\beta_E$  é o fator de correção com valor igual a 4.

Para os casos onde a relação da Equação 19 não seja satisfeita, o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) permite a dispensa da verificação da segurança em relação ao estado limite último de instabilidade lateral, desde que a segurança seja garantida através da Equação 21:

$$\sigma_{c1,d} \leq \frac{E_{c0,ef}}{\left(\frac{L_1}{b}\right) \beta_M} \quad \text{Equação (21)}$$

Onde as tensões atuantes de cálculo ( $\sigma_{c1,d}$ ), calculadas através da equação 21 devem obedecer a relação estabelecida das equações 7 e 9 apresentadas na seção 2.3.6.1. Assim, quando combinadas e reorganizadas, de forma a se isolar o momento fletor de um lado da igualdade, gera-se a equação que caracteriza o momento crítico limite ( $M_{cr,d}$ ) para que uma viga de madeira de seção retangular não sofra a instabilidade lateral. A formulação em questão é demonstrada pela Equação 22:

$$M_{cr} = \frac{E_{c0,ef} I_x}{\left(\frac{L_1}{b}\right) \beta_M \gamma_{c1}} \quad \text{Equação (22)}$$

A normativa europeia, através do EN-Eurocode 5 (2014) apresenta a formulação do momento crítico através da Equação 23:

$$M_{cr} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_y G_{0,05} J}}{l_{ef}} \quad \text{Equação (23)}$$

Onde:

$E_{0,05}$  representa o quinto valor percentil do módulo de elasticidade paralelo as fibras, sendo considerado  $2/3$  do valor do módulo de elasticidade longitudinal médio (SATO e MASCIA, 2019);

$G_{0,05}$  representa o quinto valor percentil do módulo de elasticidade transversal da viga;

$l_{ef}$  é o vão livre da viga entre apoios, que para vigas bi-apoiadas e cargas concentradas deve-se adotar o valor resultante de  $l_{ef}/0,8$ .

Já a normativa americana, a AFPA (2003) avalia a instabilidade com a aplicabilidade de alguns coeficientes dentro da formulação, tal qual apresentado na Equação 24:

$$M_{cr} = \frac{\pi C_b C_e}{C_{fix} L} \sqrt{\frac{E_{0,05} I_y G_{0,05} J}{\gamma}} \quad \text{Equação (24)}$$

Onde:

$C_b$  é o coeficiente de momento equivalente;

$C_e$  é o coeficiente de excentricidade do carregamento para vigas com a carga no topo da seção transversal;

$C_{fix}$  é o coeficiente fixo de ajuste, usado com o valor de 1,15;

$\gamma$  é o fator de esbeltez da seção transversal, valendo  $1 - I_y/I_x$ ;

A Equação 25 apresenta a formulação relativa ao cálculo do coeficiente de momento equivalente:

$$C_b = \frac{12,5M_{max}}{3M_A + 4M_B + 3M_C + 2,5M_{max}} \quad \text{Equação (25)}$$

Onde:

$M_{max}$  é o valor do momento máximo;

$M_A$  é o valor do momento no ponto 1/4;

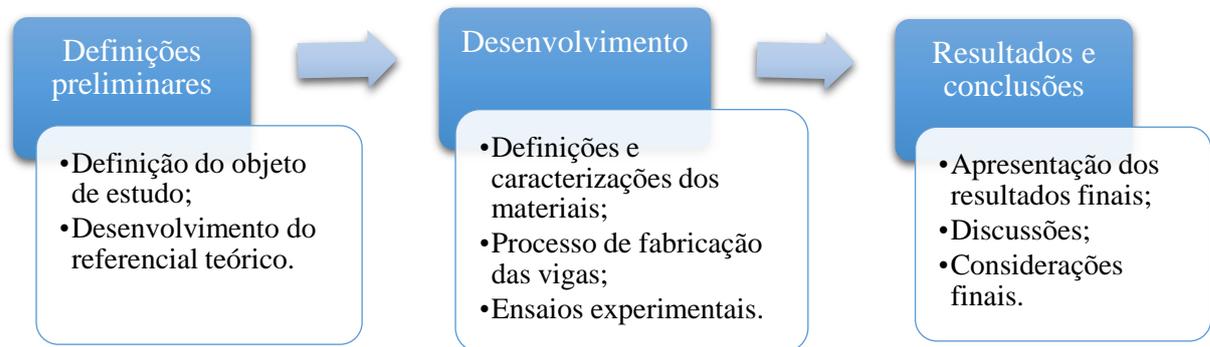
$M_B$  é o valor do momento no ponto 1/2;

$M_C$  é o valor do momento no ponto 3/4.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando-se atingir os objetivos propostos, as etapas da pesquisa foram divididas como demonstradas no fluxograma da Figura 18, que apresenta os passos metodológicos seguidos para a conclusão deste estudo.

Figura 18: Etapas metodológicas



Assim, em um primeiro passo definiu-se preliminarmente as limitações e o contexto do objeto de estudo, partindo-se para a leitura, estudo e estruturação do referencial teórico. Na segunda etapa, categorizada como desenvolvimento, os materiais foram definidos, seguida pela sua caracterização física e mecânica em laboratório. Onde, uma vez conhecidas as propriedades dos materiais, procedeu-se com a fabricação das vigas e os ensaios experimentais. Por fim, obtiveram-se os resultados, posteriormente apresentados e discutidos em formato conclusivo do proposto.

#### 3.1 Definição dos Materiais

Nesta etapa, estão apresentadas as características dos materiais estudados para a fabricação das vigas em MLC, com as definições e escolhas dos seguintes itens:

- i. Espécie de madeira a ser utilizada;
- ii. Tipo de adesivo estrutural;
- iii. Dimensão das vigas de madeira lamelada colada propostas.

### 3.1.1 Espécie de madeira

Para a escolha da madeira a se utilizar neste estudo, realizou-se uma pesquisa às madeiras locais, buscando-se informações sobre a disponibilidade de obtenção de espécies certificadas provenientes de áreas de reflorestamento. Ainda, apesar de não ser proposta deste estudo investigar madeiras tratadas, empresas que realizam o tratamento em fornos autoclave também foram consultadas a respeito das espécies em que o material preservante utilizado impregna com maior facilidade nas fibras da madeira, visando-se englobar casos em que o tratamento em autoclave possa ser utilizado na madeira para fins estruturais. Assim, optou-se pela utilização do gênero *Pinus*, proveniente de florestas da cidade de União de Serra, Rio Grande do Sul, Brasil.

Caracterizada como uma madeira da família das coníferas, de crescimento rápido, o *Pinus* teve sua origem provável no norte da Eurásia ou no norte da América, há cerca de duzentos e cinquenta milhões de anos. No Brasil, data-se da década de 40 e início dos anos cinquenta a introdução destas espécies, visando-se inicialmente a utilização da árvore para fins ornamentais e mais adiante para a silviculturas (BORTOLETTO JR., 1993). A Figura 19 ilustra uma floresta típica da espécie *Pinus*.

Figura 19: Floresta de *Pinus*.



Fonte: The forest time, em <https://www.the-forest-time.com/pt/guia-de-espccies/pinus-taeda-5ac5d7c05>, acessado em 15/06/2019.

### 3.1.2 Adesivo Estrutural

Uma vez que se objetiva efetuar o processo de colagem de lamelas para a confecção de vigas em madeira lamelada colada, marcenarias e bibliografias foram consultadas buscando-se realizar a escolha do adesivo que fará esta união por critérios como eficiência do processo fabril e facilidade em obtenção e trabalhabilidade da cola. Assim, optou-se pela utilização da resina a base de ureia-formol (UF), onde o processo de ativação da cola dá-se com a mistura da base líquida à farinha de trigo e à cristais catalizadores, demonstrados na Figura 20. Para a proporcionalidade da mistura utilizou-se as indicações do fabricante, assim a cada 100 partes de peso de resina acrescentou-se 20 partes de farinha de trigo e 3 partes de cristais catalizadores. Os três elementos, que após a mistura e homogeneização, formam o adesivo estrutural estão apresentados na Figura 21).

Figura 20: Componentes para a fabricação do adesivo a base de UF.



Figura 21: Mistura pronta do adesivo a base de UF.



### 3.1.3 Dimensões das vigas de MLC

A fim de se encontrar geometrias de vigas favoráveis a ocorrência da instabilidade lateral antes que qualquer outra ação possa levar o elemento ao seu limite estrutural, uma planilha matemática foi desenvolvida com o intuito de testar diferentes relações de largura e altura de seções transversais e vãos teóricos totais, relacionando estes valores a resistência encontrada na NBR 9170 (1997) para a espécie de madeira Pinus. A planilha foi estabelecida a partir de um modelo teórico de viga isostática, bi-apoiada com o carregamento concentrado na metade de seu comprimento (centro do vão). Assim, obteve-se de forma analítica, os carregamentos últimos a compressão na flexão, tração na flexão, ao cisalhamento e ao carregamento que leva à instabilidade lateral.

Após análise dos resultados e consultas bibliográficas, optou-se pela fabricação de vigas de vão teórico fixo em 400 centímetros e de três diferentes relações aproximadas entre largura (b) e altura (h), sendo elas:  $h/b = 4$ ;  $h/b = 5$ ; e  $h/b = 6$ .

Uma vez que madeireiras locais consultadas possuíam a pronta entrega lamelas de 5 centímetros de largura, 2,5 centímetros de altura e comprimento de 550 centímetros, 96 peças com estas dimensões foram adquiridas. Após submetidas a plaina nas quatro faces da seção transversal, tiveram suas dimensões reduzidas a média de 4,4 centímetros de largura e 2,0 centímetros de altura. Ainda, 15 barrotes já plainados de 5,0 centímetros de largura, 5,0 centímetros de altura e 100,0 centímetros de comprimento e 3 barrotes de 5,0 centímetros de largura, 7,0 centímetros de altura e 100,0 centímetros de comprimento do mesmo lote foram adquiridos, a fim de se proceder com os ensaios de caracterização. Logo, ao total, obteve-se aproximadamente, um lote com 0,7 m<sup>3</sup> da espécie Pinus.

Com as dimensões e quantidades das lamelas definidas, propôs-se inicialmente a fabricação de uma viga de madeira lamelada colada teste, composta de 6 lamelas, a fim de se corrigir possíveis inconsistências no processo fabril ocasionadas pela inexperiência construtiva, seguida então, da fabricação e análise quanto a instabilidade lateral de 3 vigas de MLC compostas de 8 lamelas, 3 vigas compostas por 10 lamelas e 3 vigas de 12 lamelas, mantendo a relação escolhida aproximada entre a altura e largura da seção transversal.

## 3.2 Caracterização e ensaios

Descreve-se neste item, o processo realizado para a definição da classificação e ensaios dos corpos de prova de madeira, apresentados como segue:

- i. Determinação do teor de umidade do lote;
- ii. Densidade básica da madeira;
- iii. Resistência a compressão paralela às fibras;
- iv. Resistência ao cisalhamento;
- v. Classificação e caracterização das lamelas.

### 3.2.1 Determinação do teor de umidade do lote

Para o ensaio de umidade do lote adquirido, seguiram-se as instruções do anexo B da NBR 7190 (1997), com a confecção de 12 corpos de prova (Figura 22) de dimensões de acordo com a Figura 23. Após a determinação da massa inicial de cada corpo de prova com exatidão de 0,01g, os mesmos foram submetidos a secagem em estufa com temperatura média de 103°C (Figura 24) até que, em pesagens de 6 em 6 horas, a variação de duas medidas consecutivas não ultrapassasse 0,5%, considerando assim, a última medida como a massa seca do corpo de prova.

Figura 22: Corpos de prova para a determinação da umidade da madeira.



Figura 23: Dimensão do corpo de prova para a determinação da umidade da madeira.

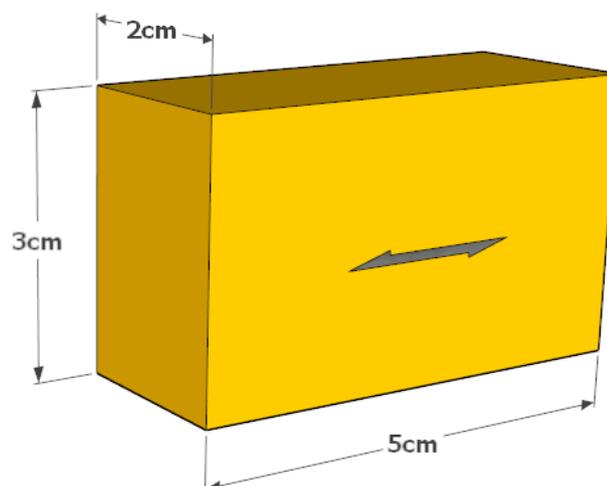


Figura 24: Temperatura da estufa para secagem dos corpos de prova.



Assim, o teor de umidade, em porcentagem, (U) foi calculado através da Equação 26:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Equação (26)}$$

Onde:

$m_i$  é a massa inicial da madeira, em gramas;

$m_s$  é a massa seca da madeira, em gramas.

### 3.2.2 Densidade básica da madeira

Convencionalmente, a NBR 7190 (1997) define a densidade básica ( $\rho_{bas}$ ) como sendo a razão entre a massa seca do corpo de prova, com dimensão igual ao apresentado na Figura 23 do item anterior, e o volume saturado, determinado a partir das dimensões finais dos corpos de prova submersos em água até que atinjam massa constante com variação máxima de 0,5% em relação à medida anterior. Assim, com a utilização de 12 corpos de prova de dimensões especificadas, procedeu-se o ensaio, como demonstrado nas Figuras 25 e 26, com a densidade básica definida através da equação 27:

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad \text{Equação (27)}$$

Onde:

$m_s$  é a massa seca da madeira, em gramas;

$V_{sat}$  é o volume saturado, em metros cúbicos.

Figura 25: Corpos de prova submersos em água.



Figura 26: Medição dos corpos de prova saturados.



### 3.2.3 Resistência a compressão paralela às fibras

Para a caracterização da resistência a compressão nas fibras da madeira do lote de Pinus, 12 corpos de prova de 5,0 centímetros de largura, por 5,0 centímetros de altura e 15,0 centímetros de comprimento foram fabricados e ensaiados de acordo com as prescrições normativas da NBR 7190 (1997). A Figura 27 exemplifica o momento de ruptura de um dos corpos de prova ensaiados. Todos os corpos de prova tiveram suas dimensões medidas em dois pontos com o auxílio de um paquímetro, sendo sua seção final definida pela média destes dois valores.

Figura 27: Ruptura de corpo de prova por compressão paralela às fibras.



### 3.2.4 Resistência ao cisalhamento

Inicialmente buscou-se seguir as prescrições da NBR 7190 (1997) para o ensaio de cisalhamento em corpos de prova maciços e colados de madeira, assim 12 elementos foram ensaiados através da prensa, como apresentados na Figura 28. Posteriormente, outros 12 corpos de prova de mesmas dimensões, porém unidos através do adesivo preparado a base de UF também foram ensaiados a fim de se verificar a resistência ao cisalhamento na linha de cola. Para garantia do processo de colagem, utilizou-se de ambiente controlado por ar-condicionado em temperatura de 23°C, e ainda, a pressão de colagem deu-se através de sargentos, que permaneceram nos corpos de prova por no mínimo 24 horas, como exemplificado pela Figura 29.

Figura 28: Ensaio de cisalhamento em corpo de prova assimétrico maciço.



Figura 29: Preparação dos corpos de prova assimétricos para ensaio de cisalhamento.



Porém, por conta de os corpos de prova não possuírem simetria dimensional, uma certa particularidade foi percebida durante os ensaios em prensa hidráulica. Alguns destes elementos acabavam tombando antes de atingirem o limite do cisalhamento, o que acabava por dificultar os ensaios e muitas vezes mascaravam os reais valores do cisalhamento puro. Logo, a fim de garantir os valores encontrados, e buscar uma solução à questão do tombamento, propôs-se realizar os ensaios de cisalhamento com corpos de prova de dimensões simétricas, de acordo com a Figura 30, baseadas nas dimensões assimétricas normatizadas. Assim, outros 24 corpos de prova foram confeccionados, sendo 12 deles maciços, de acordo com a Figura 31, e outros 12 com duas linhas de cola, tomando-se os mesmos cuidados exigidos pela NBR 7190 (1997) no processo de colagem. Por fim, esses corpos de prova também foram submetidos ao ensaio de cisalhamento.

Comparativamente, propôs-se ainda a realização de uma análise estatística do tipo t de Student com nível de significância de 5% do modelo simétrico em relação ao modelo assimétrico, a fim de se verificar a significância das médias apresentadas nos resultados entre as duas metodologias.

Figura 30: Dimensões do corpo de prova simétrico proposto ao ensaio de cisalhamento.

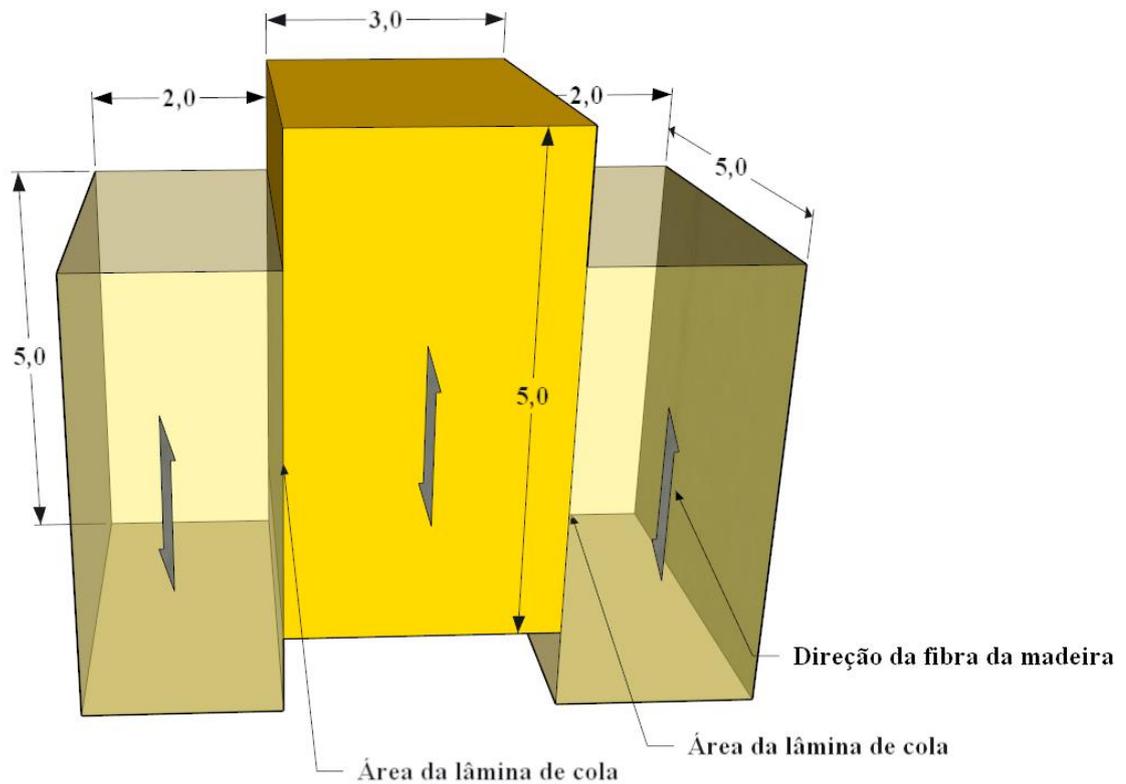


Figura 31: Corpos de prova maciços simétricos propostos ao ensaio de cisalhamento.



### 3.2.5 Classificação e caracterização das lamelas

Após recebimento das 96 lamelas da espécie Pinus, procedeu-se com a identificação e classificação visual do lote, considerando-se para tal a presença de nós, fendas ou imperfeições passíveis de detecção. Assim, o lote inicial foi dividido em três grupos, o primeiro considerando lamelas sem imperfeições ou nós, o segundo considerando a presença de apenas um nó ou um ponto de imperfeição, e o terceiro considerando que as lamelas possuíam mais de um nó ou imperfeição. A Figura 32 mostra o processo de identificação das lamelas. Ainda, todas as

lamelas tiveram sua seção transversal medida com o auxílio de um paquímetro em três pontos, no centro da peça e nos primeiros terços de seu comprimento, definindo a seção transversal como a média entre os três valores.

Figura 32: Identificação das lamelas.



A fim de se conhecer a rigidez individual de cada lamela, e garantir o melhor posicionamento das mesmas na fabricação das vigas de MLC, os grupos de lamelas também foram caracterizados individualmente através do ensaio não destrutivo de flexão estática. A partir de um vão livre de 450 centímetros, um peso conhecido e um manômetro foram posicionados no centro do vão, considerando um ciclo de carga e alívio de 1 minuto, 3 leituras de deslocamento foram realizadas adotando-se a média entre elas como parâmetro para a classificação. Sendo assim, 1 minuto após a lamela ser posicionada em cima dos apoios, aplicou-se o carregamento conhecido, fazendo-se a leitura do deslocamento do manômetro após 1 minuto do carregamento posicionado, a carga então foi removida, onde a lamela manteve-se em repouso por mais 1 minuto até receber novamente o carregamento e ser realizada, após outro minuto, a nova leitura e assim, sucessivamente. As Figuras 33 e 34 exemplificam o processo.

Figura 33: Ensaio de flexão estática nas lamelas.



Figura 34: Posicionamento do manômetro e da carga no ensaio de flexão estática.



Após a realização do ensaio não destrutivo das lamelas, os respectivos módulos de elasticidade foram calculados através da Equação 4, apresentada no item 2.3.5.1 e corrigidos através da Equação 2, apresentada no item 2.2, por conta da umidade caracterizada do lote.

### **3.3 Processo de fabricação das vigas de MLC**

Com as 96 lamelas classificadas de acordo com suas rigidezes através do processo de flexão estática não destrutivo, foram escolhidas e retiradas as 6 lamelas com os mais baixos módulos de elasticidade do conjunto para a fabricação de uma viga teste, a fim de se identificar prováveis dificuldades que pudessem surgir durante o processo de colagem e fabricação das vigas definitivas de madeira lamelada colada que seriam submetidas ao ensaio de instabilidade lateral.

Dentre as 6 lamelas escolhidas para a confecção da viga teste, as 4 que apresentaram o maior módulo de elasticidade foram posicionadas nas regiões mais solicitadas da viga, as 2 restantes, com menores rigidezes foram posicionadas na região central do elemento. A fim de se controlar o ambiente fabril das vigas, uma sala com temperatura controlada foi utilizada, onde o ar-condicionado permaneceu durante todo o momento do processo de colagem e cura do adesivo em temperatura de 24°C, com variações máximas de 2° C para mais ou para menos. As lamelas foram levadas até a sala de colagem com 4 horas de antecedência, para que suas umidades entrassem em equilíbrio com o meio.

Para o processo de colagem das lamelas, produziu-se cerca de 1.230,0 gramas de adesivo, o qual foi espalhado nas superfícies da madeira com o auxílio de uma espátula plástica até a total cobertura dos elementos. O consumo total de cola utilizado no processo foi de aproximadamente 0,062 g/cm<sup>2</sup>, sendo que após a aplicação da pressão de colagem, o excesso de cola foi expulso e removido da face lateral da viga. Este consumo foi posteriormente replicado para a fabricação das outras vigas de MLC.

Como forma de garantir a pressão mínima estabelecida pelo Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) para a colagem das lamelas, 15 sargentos espaçados a cada 30 centímetros foram utilizados, sendo que as capacidades de pressão de todos os modelos de sargento foram previamente aferidas em célula de carga, como apresentado na Figura 35, levando-se em consideração inclusive perdas de pressão que pudessem ocorrer após a aplicação da carga inicial. Ainda, a fim de se garantir a distribuição da pressão em toda a área de colagem e se evitar o possível esmagamento da madeira pela pressão exercida localmente pelos sargentos, utilizou-se dois perfis de aço cantoneira de 2 polegadas (2x1/8Astm-a36) nas duas

extremidades de aplicação da pressão na viga. Todas as 6 lamelas da viga teste foram unidas de uma só vez. Após realizado o processo de colagem, a viga manteve-se em pressão e temperatura controladas por 24 horas antes do processo de alívio. As Figuras de 36 a 39 exemplificam as etapas do processo de colagem da viga em MLC.

Figura 35: Aferição dos sargentos com célula de carga.

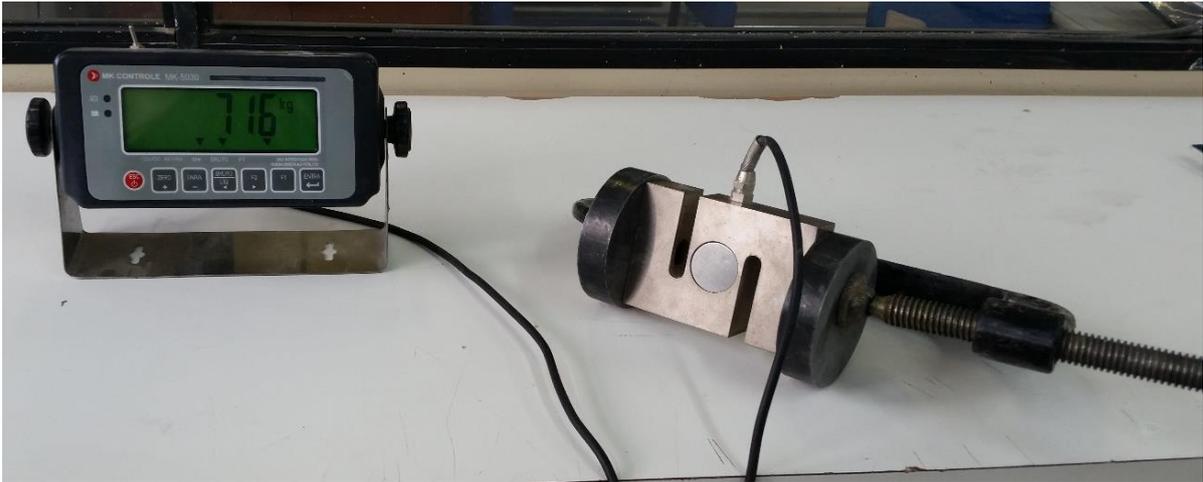


Figura 36: Posicionamento das lamelas sobre a bancada.



Figura 37: Lamelas após o recebimento do adesivo a base de UF.



Figura 38: Viga teste montada com a pressão dos sargentos aplicada.



Figura 39: Viga pronta após 24 horas de cura do adesivo.



Sendo bem-sucedido o processo de fabricação da viga teste de madeira lamelada colada, as 90 lamelas restantes foram divididas nas nove vigas propostas ao estudo de instabilidade lateral, de forma a manter o equilíbrio e a eficiência de todos os elementos de acordo com os módulos de elasticidade de cada lamela. Assim sendo, as vigas fabricadas que receberam as lamelas com os maiores módulos de elasticidade posicionados nas regiões mais solicitadas, também receberam as lamelas com os menores módulos de elasticidade posicionados nas regiões centrais das vigas, e assim sucessivamente.

Após a fabricação de todas as vigas, reparou-se em um excesso de cola nas regiões laterais dos elementos, expulsos por conta da pressão aplicada pelos sargentos. Estes excessos, aliados a uma variação na largura das lamelas (Figura 40) poderiam interferir diretamente na etapa de medição da seção transversal dos elementos, mascarando a real seção transversal das vigas prontas. Assim sendo, todas as vigas foram plainadas em suas laterais com o auxílio de plaina elétrica, resultando em elementos de seção transversal mais uniformes, como apresentado na Figura 41. Após este procedimento, todos os elementos tiveram sua seção transversal medida com o auxílio de um paquímetro em três pontos, no centro da peça e nos primeiros terços de seu comprimento, definindo a seção transversal como a média entre os três valores.

Figura 40: Viga de MLC antes de ser plainada.

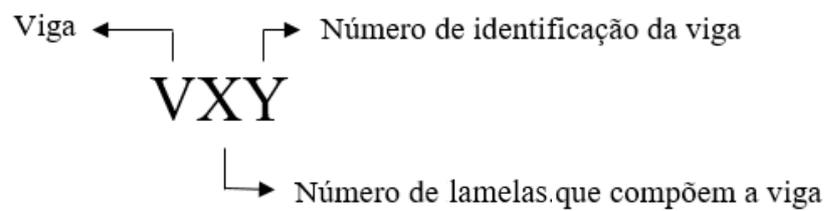


Figura 41: Viga de MLC após ser plainada.



Com as seções transversais definidas, as vigas foram classificadas de acordo com o número de lamelas e identificadas de acordo com a Figura 42. Sendo elas apresentadas como V81, V82 e V83 para as vigas com 8 lamelas, V101, V102 e V103 para as vigas com 10 lamelas e V121, V122 e V123 para as vigas com 12 lamelas.

Figura 42: Identificação das vigas de MLC.

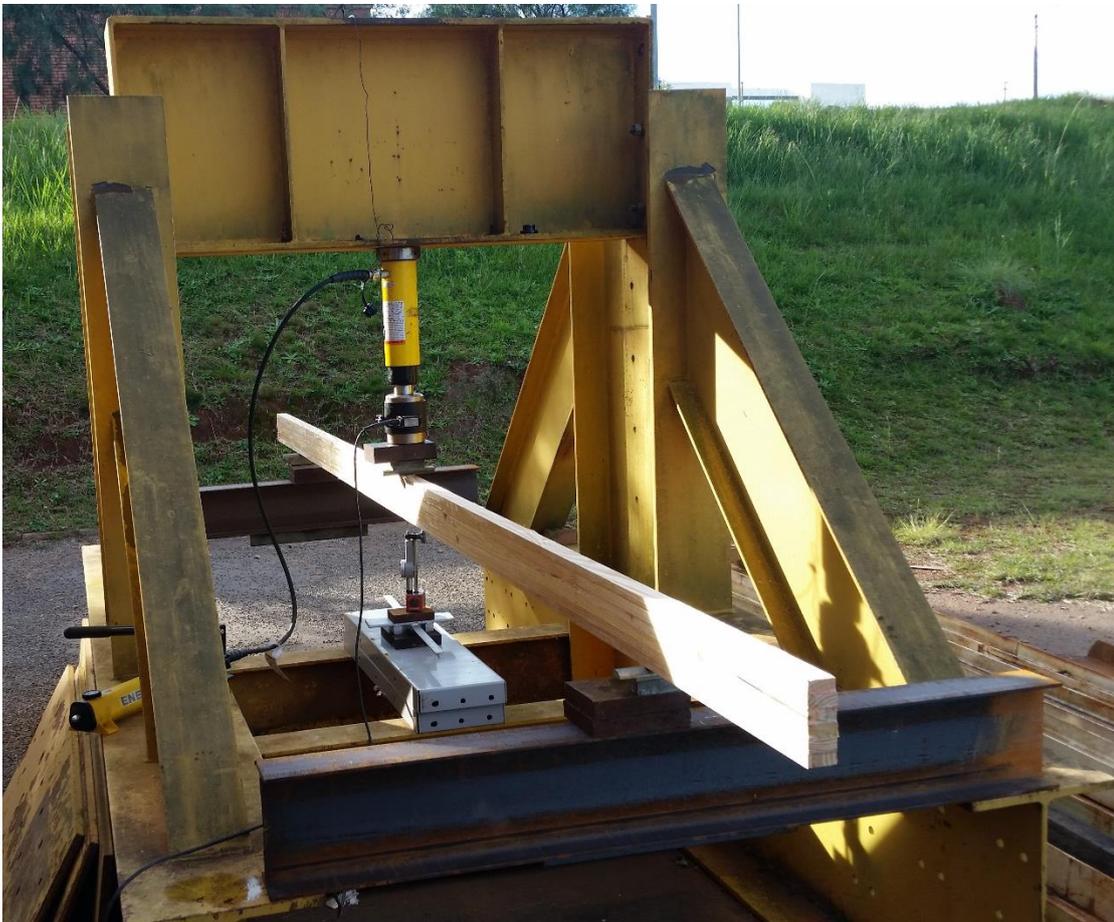


### 3.4 Ensaio de flexão simples da viga teste

Após a confecção da viga teste, um ensaio de flexão simples foi preparado a fim de se verificar o funcionamento do conjunto, principalmente no que tange ao cisalhamento nas lamelas coladas. Assim, o elemento foi posicionado em um vão de 344,0 centímetros e seu módulo de elasticidade medido através de procedimento similar à caracterização das lamelas, com seu valor corrigido de acordo com a umidade encontrada da média de três medições realizadas ao longo do comprimento da viga.

Com os parâmetros iniciais definidos, obteve-se de forma analítica, seguindo os preceitos da NBR 7190 (1997), os valores de Momentos Últimos a compressão da flexão, tração na flexão, ao cisalhamento e estabilidade lateral da viga teste. Uma vez que os limites foram estabelecidos, um macaco hidráulico acoplado a uma célula de carga e um manômetro foram posicionados no centro do vão da viga. Nos apoios roletes permitiram a rotação ao longo do eixo longitudinal da peça. O esquema da realização do ensaio de flexão simples para a viga teste pode ser observado na Figura 43.

Figura 43: Esquema do ensaio de flexão simples da viga teste.



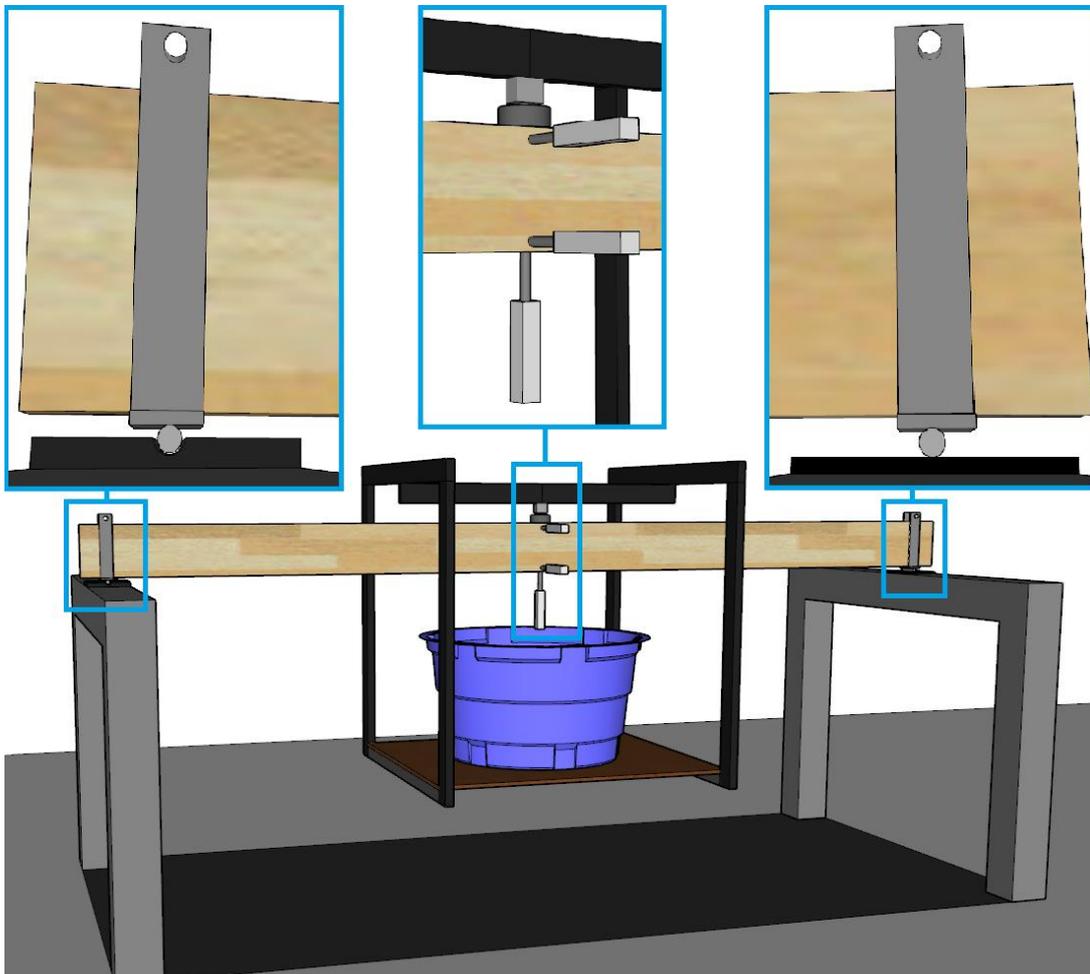
### 3.5 Ensaio experimental

Com o intuito de testar as análises teóricas quanto ao efeito da instabilidade lateral em vigas de madeira lamelada colada, um ensaio experimental foi idealizado a fim de gerar resultados mais reais possíveis em comparação com as formulações normativas e bibliográficas. Assim planejaram-se elementos de apoio visando a aplicação de um carregamento concentrado e progressivo no centro do vão de uma viga bi-apoiada, realizando-se as medições de deslocamentos verticais e horizontais dos elementos ensaiados.

#### 3.5.1 Elementos de apoio à realização dos ensaios

Para a realização do ensaio proposto, uma esquemática inicial foi planejada e está apresentada na Figura 44. Pode-se reparar em destaque as vinculações laterais e o ponto de aplicação do carregamento, juntamente aos elementos de medição ao centro.

Figura 44: Esquemática planejada para o ensaio de instabilidade lateral.



A fim de se cumprir ao planejado, um dispositivo específico para o suporte das extremidades das peças foi fabricado, visto que a seção transversal das mesmas deve ser totalmente impedida de se mover ao longo das direções laterais e verticais e de rotacionar ao longo da direção longitudinal. Ainda, a fim de simular o efeito teórico dos apoios, roletes foram posicionados em ambos os lados dos apoios, sendo que em um dos lados, o rolete permaneceu apenas apoiado sobre uma chapa metálica (apoio 1), já no outro lado, uma chapa mais grossa foi cavilhada no formato do rolete para que o mesmo pudesse rotacionar, mas não se mover longitudinalmente em relação a viga (apoio 2). Ambos os apoios foram posicionados sobre pórticos estáveis e nivelados e estão apresentados nas Figuras 45 e 46.

Figura 45: Dispositivo de apoio 1 do ensaio de instabilidade lateral.



Figura 46: Dispositivo de apoio 2 do ensaio de instabilidade lateral.



Além dos dispositivos de apoio, um dispositivo para aplicação da carga também foi fabricado, de modo a funcionar como um pêndulo e manter a aplicação do carregamento sempre vertical no centro do vão. Para tal, este dispositivo conta com um apoio em formato semiesférico que é recebido por uma chapa metálica cavilhada no mesmo formato, permitindo assim que o apoio fique livre para encontrar seu ponto de equilíbrio e não se desloque lateralmente. Ainda, visando o incremento de carga progressiva, este dispositivo recebe uma caixa d'água de 500 litros, posicionada sobre uma plataforma onde uma mangueira de vazão conhecida encherá a caixa com água até que se verifique o ponto em que as vigas se instabilizam lateralmente.

Por fim, visando-se realizar medições de deslocamentos horizontais e verticais em função do carregamento, para todos os ensaios de instabilidade lateral foram posicionadas 3 réguas potenciométricas, que são transdutores para medição de deslocamento linear, no meio

do vão da viga. Sendo que um destes medidores foi posicionado na parte inferior, centralizada na viga, a fim de garantir a medição do deslocamento vertical e os outros dois foram posicionados lateralmente nas primeiras e últimas lamelas das vigas de MLC, a fim de se verificar os deslocamentos laterais e torcionais das mesmas. A fixação destes medidores deu-se através de um outro dispositivo, também fabricado. Ainda, para a realização da medição do carregamento, uma célula de carga acoplada a duas chapas metálicas foi posicionada entre o dispositivo de aplicação de carga e as vigas, garantido assim a total transmissão dos esforços. As Figuras 47 e 48 exemplificam os dispositivos de apoio à realização dos ensaios.

Figura 47: Detalhe do aplicador de carga no centro do vão da viga.



Figura 48: Detalhe dos elementos de medição instalados.



A fim de se realizar a leitura dos pulsos enviados pelas réguas potenciométricas e a célula de carga, estes dispositivos foram conectados a uma central de aquisição de dados (ADS 2000), que aliada a um computador registrou e gravou os dados relativos a todos os ensaios. As leituras aconteceram a cada 0,01 segundos, e posteriormente foram convertidos em dados tabelados e exportados ao *software* Excel através de um procedimento numérico realizado no *software* Matlab. A Figura 49 apresenta um detalhe do sistema de aquisição de dados utilizada.

Figura 49: Detalhe da aquisição de dados.



### 3.5.2 Ensaio de instabilidade lateral

A fim de se ajustar os dispositivos para a realização dos ensaios de instabilidade lateral nas 9 vigas propostas ou encontrar falhas metodológicas do planejado, utilizou-se inicialmente a viga teste para um ensaio preliminar. Assim, a viga teste foi posicionada, os elementos de apoio instalados e o suporte para o incremento de carga colocado sobre a viga. Na sequência procedeu-se com o incremento de carga adicionando-se água na caixa d'água do suporte. As medições das réguas potenciométricas foram aferidas à medida em que a célula de carga identificava o acréscimo do carregamento. Com o deslocamento lateral superior ultrapassando a marca dos 3,0 milímetros, descontado o deslocamento inicial ocasionado pela colocação do suporte de carga, sem aviso prévio, a viga teste começou a se deslocar lateralmente rapidamente até atingir o colapso. Todos os elementos de apoio foram lançados e derrubados com a caixa d'água derramando todo seu conteúdo.

Com o resultado do ensaio da viga teste notou-se que a instabilidade lateral ocorreria de forma brusca e destrutiva, assim sendo, com receio de danificar os aparelhos de medição, o laboratório em si, ou colocar em risco a seguridade das pessoas envolvidas, estabeleceu-se um critério de parada para o restante dos ensaios, além de pequenos ajustes nos procedimentos executivos, apresentados como se segue.

As vigas ensaiadas à instabilidade lateral foram posicionadas nos equipamentos de apoio e os elementos de medição ajustados a elas. A partir deste ajuste, iniciou-se as gravações dos registros através da aquisição de dados. Na sequência o equipamento de suporte de carga foi posicionado sobre o vão central das vigas e os deslocamentos iniciais registrados. Após a estabilização do equipamento, a água foi adicionada gradualmente através de uma mangueira de 15,0 mm de diâmetro, monitorando-se os deslocamentos laterais das vigas até que atingissem o máximo de 3,0 mm (critério de parada do ensaio), descontados os deslocamentos iniciais ocasionados pela colocação do suporte de carga. Após este limite, o incremento de carga foi cessado aguardando-se por um minuto apenas com a carga estática até então aplicada, após este tempo, iniciou-se o descarregamento da água e posterior remoção do suporte, com o encerramento da gravação pela aquisição de dados e o ensaio chegando a seu fim. Este procedimento foi repetido 3 vezes com cada uma das 9 vigas ensaiadas, gerando ao total 27 arquivos de dados ensaiados. Cada ensaio teve a duração de aproximadamente 20 minutos. A Figura 50 mostra o momento de um dos ensaios em andamento.

Figura 50: Sistema posicionado para o ensaio de instabilidade lateral.



Após a análise dos arquivos gerados pela aquisição de dados, os mesmos foram retificados e refinados, obtendo-se os deslocamentos máximos verticais, horizontais superiores, horizontais inferiores e o carregamento máximo acusado pela célula de carga para cada um dos ensaios realizados. Por fim, foram adicionados aos carregamentos máximos da célula de carga, o peso dos equipamentos não considerados pela sua medição, caracterizando esta carga como

carga final concentrada no centro do vão, que aliada ao carregamento uniformemente distribuído do peso próprio das vigas, serviram de base para o cálculo do momento fletor crítico experimental que gera a instabilidade lateral das vigas ensaiadas.

### **3.6 Formulações normativas e bibliográficas**

A fim de se comparar os valores de momento fletor crítico que leva à instabilidade lateral encontrados experimentalmente, utilizou-se das formulações teóricas apresentadas no item 2.5, sem a utilização de coeficientes de majoração dos carregamentos ou minoração das resistências. Ainda, considerou-se para todos os casos, o carregamento concentrado aplicado no centro do vão de uma viga bi-apoiada.

Com todos os resultados apresentados, propôs-se ainda a realização de análises estatísticas com nível de significância de 5% de modo a comparar os diferentes valores apresentados verificando a significância das médias resultantes com o ensaio experimental.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, todos os resultados são apresentados e discutidos, como etapa final ao processo da análise proposta de estudo para a instabilidade lateral em vigas de madeira lamelada colada.

### 4.1 Caracterização e ensaios

#### 4.1.1 Ensaio de teor de umidade do lote

Uma vez calculados, os teores de umidade dos 12 corpos de prova, podem ser verificados na Tabela 8.

Tabela 8: Teor de umidade dos corpos de prova.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>
CP 01	13,98
CP 02	13,59
CP 03	14,53
CP 04	14,63
CP 05	14,71
CP 06	14,57
CP 07	14,29
CP 08	14,45
CP 09	14,24
CP 10	14,44
CP 11	15,25
CP 12	14,02
Média	14,39
Desvio Padrão	0,42

Utilizando-se da Equação 3 nos valores ensaiados, obtém-se o valor da umidade característica média do lote de 14,97%.

#### 4.1.2 Ensaio de densidade básica

A Tabela 9 apresenta os valores das densidades básicas encontradas em ensaio específico.

Tabela 9: Densidade básica dos corpos de prova.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Densidade básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
CP 01	0,3988
CP 02	0,4019
CP 03	0,4326
CP 04	0,4203
CP 05	0,4391
CP 06	0,4366
CP 07	0,4810
CP 08	0,4902
CP 09	0,4559
CP 10	0,4570
CP 11	0,4334
CP 12	0,4502
Média	0,4378
Desvio Padrão	0,0278

Com a aplicação da Equação 3, a densidade básica característica do lote vale 0,43802 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.3 Ensaio de resistência a compressão paralela às fibras

Os dados referentes ao ensaio de compressão paralela às fibras foram compilados e estão apresentados na Tabela 10. Com a aplicação da Equação 3 nos valores ensaiados, obtém-se o valor característico da resistência a compressão paralela às fibras, sendo ele  $f_{c0,k} = 28,61$  MPa. Ainda, considerando-se também a Equação 1 como forma de correção da umidade ao valor característico se considerada a madeira a uma umidade de 12%, a resistência a compressão paralela às fibras da madeira (para uma umidade de 12%) passa a ser  $f_{c0,k} = 31,16$  MPa.

Tabela 10: Ensaio de compressão paralela às fibras.

<b>Corpos de prova</b>	<b>Área média (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga de Ruptura (kN)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>
CP 01	2586,93	78,9425	30,52
CP 02	2579,37	79,8273	30,95
CP 03	2565,17	66,3589	25,87
CP 04	2565,93	79,3358	30,92
CP 05	2583,18	81,6952	31,63
CP 06	2557,82	70,6846	27,63
CP 07	2577,34	81,8918	31,77
CP 08	2556,31	86,4141	33,80
CP 09	2568,46	74,0271	28,82
CP 10	2571,76	77,6645	30,20
CP 11	2560,36	73,7321	28,80
CP 12	2561,37	81,0071	31,63
Média	2569,50	77,6318	30,21
Desvio Padrão	10,21	5,5282	2,13

#### 4.1.4 Ensaio de resistência ao cisalhamento de acordo com a NBR 7190 (1997)

A apresentação dos dados referentes aos ensaios de cisalhamento de acordo com as prescrições da NBR 7190 (1997) estão compilados na Tabela 11, considerando-se os corpos de prova maciços e na Tabela 12 para os corpos de prova colados com a resina a base de UF.

Tabela 11: Ensaio de cisalhamento maciço de acordo com a NBR 7190 (1997).

<b>Corpos de prova</b>	<b>Área média (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga de Ruptura (kN)</b>	<b>Resistência ao cisalhamento (MPa)</b>
CP 01	2500,00	14,90	5,96
CP 02	2500,00	10,00	4,00
CP 03	2500,00	15,40	6,16
CP 04	2500,00	21,20	8,48
CP 05	2500,00	17,80	7,12

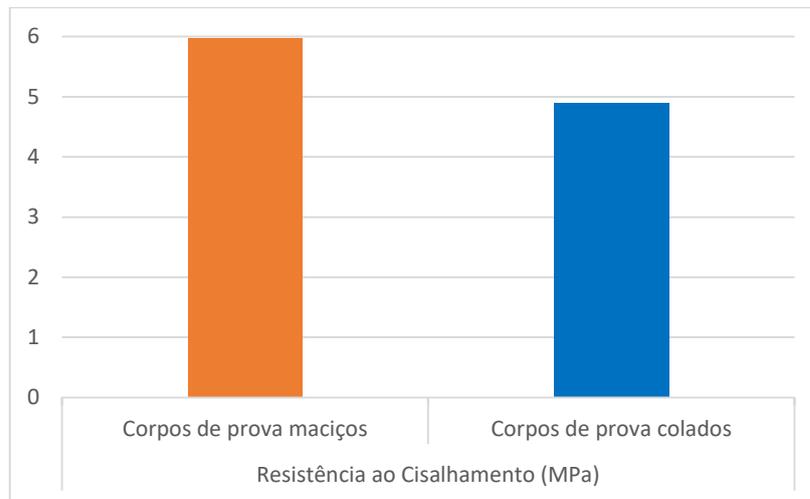
CP 06	2500,00	13,20	5,28
CP 07	2500,00	10,70	4,28
CP 08	2500,00	11,90	4,76
CP 09	2500,00	11,60	4,64
CP 10	2500,00	17,70	7,08
CP 11	2500,00	14,10	5,64
CP 12	2500,00	20,80	8,32
Média	2500,00	14,94	5,98
Desvio Padrão	-	3,77	1,51

Tabela 12: Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola de acordo com a NBR 7190 (1997).

<b>Corpos de prova</b>	<b>Área média (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga de Ruptura (kN)</b>	<b>Resistência ao cisalhamento (MPa)</b>
CP 01	2500,00	19,70	7,88
CP 02	2500,00	12,80	5,12
CP 03	2500,00	10,30	4,12
CP 04	2500,00	9,00	3,60
CP 05	2500,00	16,60	6,64
CP 06	2500,00	12,00	4,80
CP 07	2500,00	11,70	4,68
CP 08	2500,00	10,70	4,28
CP 09	2500,00	9,60	3,84
CP 10	2500,00	12,70	5,08
CP 11	2500,00	12,00	4,80
CP 12	2500,00	10,00	4,00
Média	2500,00	12,26	4,90
Desvio Padrão	-	3,08	1,23

Utilizando-se dos valores médios de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova assimétricos, montou-se um gráfico, apresentado na Figura 51, onde se pode verificar uma diferença de mais de 18% entre o resultado encontrado com os corpos de prova maciços e os colados.

Figura 51: Comparativo da resistência ao cisalhamento média em corpos de prova assimétricos.



Ainda, a fim de se verificar estatisticamente a diferença entre essas médias, com o auxílio do *software* Excel, realizou-se uma análise de variância do tipo t de Student com nível de significância de 5% para as amostras, sendo inicialmente realizado um teste-F para se verificar a suposta igualdade da variância entre os dois grupos. Assim, a análise, apresentada de forma completa na Tabela 13, rejeitou a hipótese nula inicialmente assumida, concluindo que não há evidências de que as variâncias são iguais, ou seja, assume-se que há diferença significativa nas médias entre os corpos de prova maciços e os colados ensaiados.

Tabela 13: Análise de variância em relação aos ensaios de cisalhamento assimétricos.

<b>Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</b>		
	<b>Corpos de prova maciços</b>	<b>Corpos de prova colados</b>
Média	5,977	4,903
Variância	2,270	1,516
Observações	12,000	12,000
Variância agrupada	1,893	
Hipótese da diferença de média	0,000	
gl	22,000	
Stat t	1,911	
P(T<=t) uni-caudal	0,035	
t crítico uni-caudal	1,717	
P(T<=t) bi-caudal	0,069	
t crítico bi-caudal	2,074	

Quanto aos valores característicos das resistências ao cisalhamento, os corpos de prova maciços apresentaram o valor já corrigido pela umidade (Equação 1) de  $f_{v0,k} = 4,42$  MPa, e os corpos de prova colados, o valor também corrigido de  $f_{v0,k} = 3,90$  MPa. Sendo assim, como o teste estatístico realizado acusou diferenças significativas entre os dois grupos, adotou-se o menor dos valores como fator decisivo para o critério de dimensionamento, ou seja, o valor de  $f_{v0,k} = 3,90$  MPa.

#### 4.1.5 Ensaio de resistência ao cisalhamento simétrico proposto

Apresenta-se, através das Tabelas 14 e 15, os dados referentes aos ensaios de cisalhamento com corpos de prova simétricos propostos, considerando-se os corpos de prova maciços e colados, respectivamente.

Tabela 14: Ensaio de cisalhamento simétrico maciço proposto.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Área média (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga de Ruptura (kN)</b>	<b>Resistência ao cisalhamento (MPa)</b>
CP 01	5000,00	30,38	6,08
CP 02	5000,00	30,18	6,04
CP 03	5000,00	29,59	5,92
CP 04	5000,00	31,75	6,35
CP 05	5000,00	28,41	5,68
CP 06	5000,00	33,03	6,61
CP 07	5000,00	29,89	5,98
CP 08	5000,00	29,59	5,92
CP 09	5000,00	33,43	6,69
CP 10	5000,00	23,20	4,64
CP 11	5000,00	29,59	5,92
CP 12	5000,00	25,46	5,09
Média	5000,00	29,54	5,91
Desvio Padrão	-	2,88	0,58

Tabela 15: Ensaio de cisalhamento simétricos na lâmina de cola proposto.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Área média (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Carga de Ruptura (kN)</b>	<b>Resistência ao cisalhamento (MPa)</b>
CP 01	5000,00	39,52	7,90
CP 02	5000,00	38,54	7,71
CP 03	5000,00	26,54	5,31
CP 04	5000,00	45,52	9,10
CP 05	5000,00	38,54	7,71
CP 06	5000,00	36,37	7,27
CP 07	5000,00	35,59	7,12
CP 08	5000,00	47,98	9,60
CP 09	5000,00	37,26	7,45
CP 10	5000,00	29,98	6,00
CP 11	5000,00	36,57	7,31
CP 12	5000,00	39,82	7,96
Média	5000,00	37,69	7,54
Desvio Padrão	-	5,78	1,16

Da mesma forma, como comparado anteriormente com os corpos de prova assimétricos, apresenta-se na Figura 52, os valores médios de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova simétricos propostos, onde, o cisalhamento na lâmina de cola apresentou resistência de mais de 21% superior às peças maciças. Igualmente, quanto aos valores característicos das resistências ao cisalhamento, os corpos de prova maciços corrigidos pela umidade apresentaram o valor de  $f_{V0,k} = 5,97$  MPa, e os corpos de prova colados, o valor de  $f_{V0,k} = 6,89$  MPa.

Uma vez que os valores dos quatro conjuntos de corpos de prova ensaiados ao cisalhamento são comparados (gráfico da Figura 53), percebe-se um comportamento muito parecido nos corpos de prova maciços, já para os corpos de prova colados, as peças simétricas mostraram-se com resistência 35% superior em relação às peças assimétricas. A fim de se evidenciar o comportamento similar dos corpos de prova maciços simétricos e assimétricos, realizou-se uma análise de variância do tipo t de Student com nível de significância de 5% para apenas estes dois grupos. Assim, como esperado, a análise não rejeitou a hipótese nula inicialmente assumida, concluindo que há evidências de que as variâncias são iguais, ou seja,

assumimos que não há diferença significativa nas médias entre os corpos de prova maciços simétricos e assimétricos. Os dados referentes a análise estão apresentados na Tabela 16.

Figura 52: Comparativo da resistência ao cisalhamento média em corpos de prova simétricos.

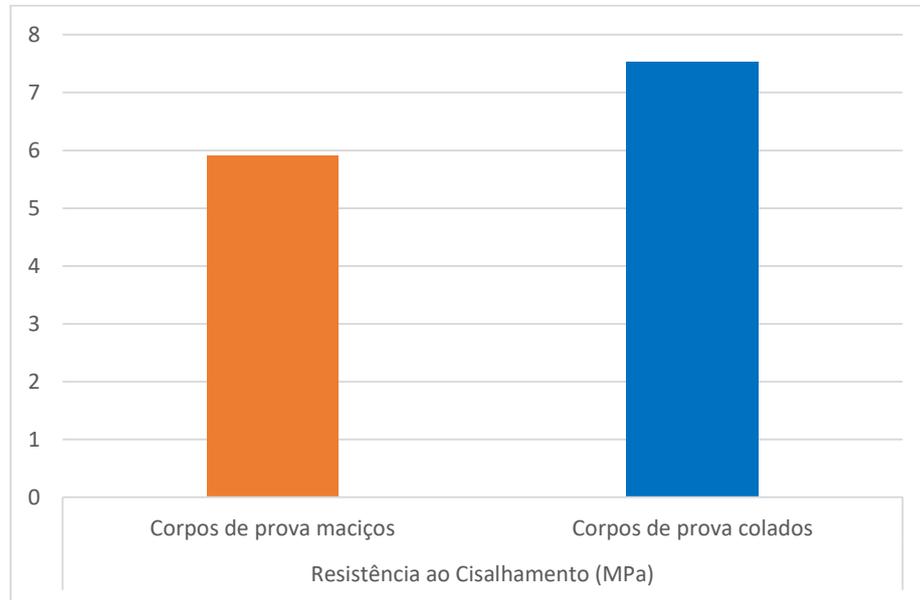


Figura 53: Comparativo da resistência ao cisalhamento médio em corpos de prova simétricos e assimétricos.

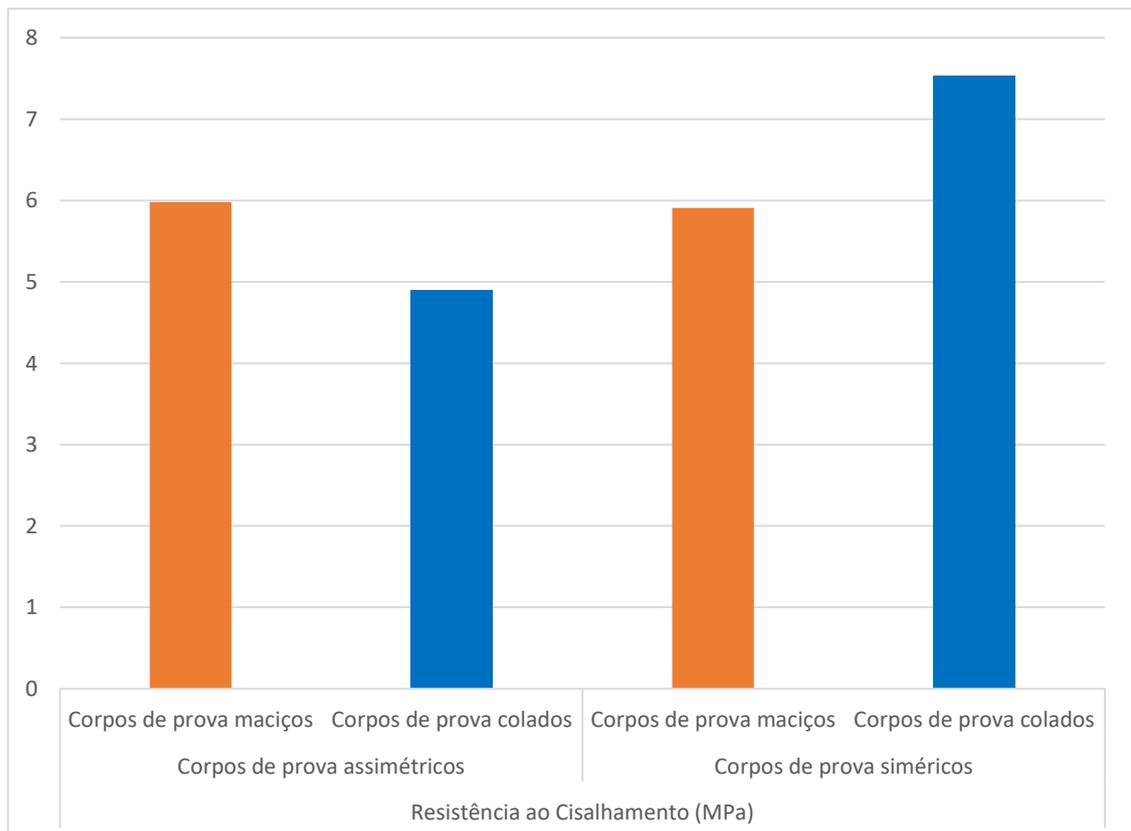


Tabela 16: Análise de variância em relação aos ensaios de cisalhamento maciços.

<b>Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</b>		
	<b>Corpos de prova maciços</b>	<b>Corpos de prova colados</b>
Média	5,977	5,908
Variância	2,270	0,333
Observações	12,000	12,000
Hipótese da diferença de média	0,000	
gl	14,000	
Stat t	0,147	
P(T<=t) uni-caudal	0,443	
t crítico uni-caudal	1,761	
P(T<=t) bi-caudal	0,886	
t crítico bi-caudal	2,145	

#### 4.1.6 Classificação e caracterização das lamelas

Inicialmente, as 96 lamelas do lote foram classificadas visualmente de acordo com a presença de nós, e agrupadas em três grupos distintos. A incidência do número de lamelas em cada um dos grupos está demonstrado no gráfico da Figura 54, onde nota-se que das 96 peças totais, 32 lamelas não possuem a presença de nós ou falhas ao longo do seu comprimento, 40 lamelas possuem apenas um nó ou falha e 24 lamelas possuem mais de um nó ou falha. A mesma legenda de cores foi utilizada para a visualização dos agrupamentos de acordo com os parâmetros de rigidezes catalogados a partir do ensaio não destrutivo de flexão estática e apresentados na Tabela 17, devidamente corrigidos pela umidade.

Figura 54: Classificação visual das lamelas.

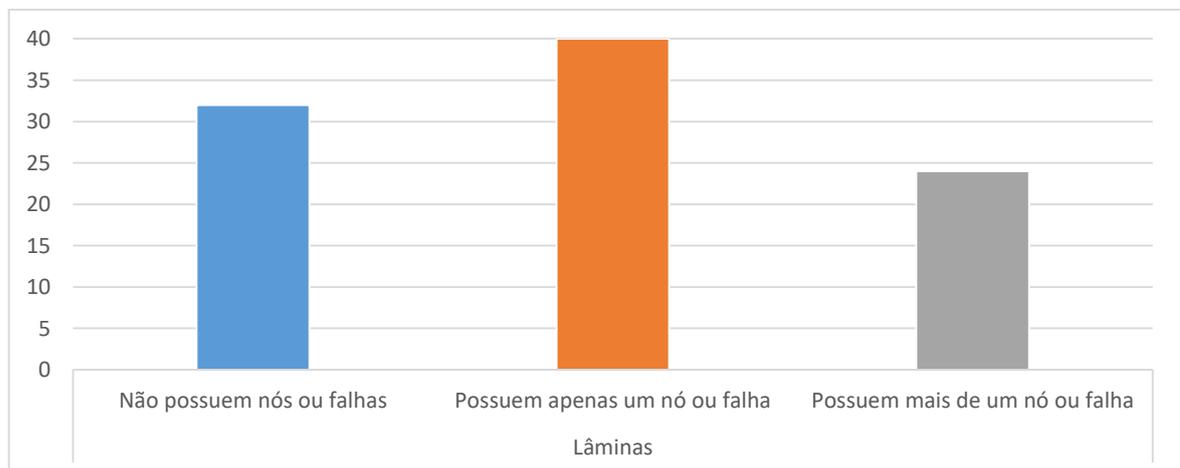


Tabela 17: Caracterização das lamelas.

Lamela	Largura média (mm)	Altura média (mm)	Inércia (mm <sup>4</sup> )	Vão (mm)	Carga (N)	Deslocamento médio (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Módulo de Elasticidade corrigido (MPa)
L1	43,64	20,81	32773,27	4500	5,225	23,23	13029,08	13805,61
L2	44,37	20,90	33753,16	4500	5,225	17,96	16359,92	17334,97
L3	44,52	20,77	33255,23	4500	5,225	19,30	15454,87	16375,98
L4	44,69	20,53	32243,33	4500	5,225	23,93	12855,83	13622,03
L5	44,59	20,90	33904,30	4500	5,225	17,90	16341,57	17315,53
L6	44,80	20,60	32654,39	4500	5,225	21,96	13830,66	14654,96
L7	44,51	21,07	34681,38	4500	5,225	16,42	17415,06	18453,00
L8	44,62	20,69	32946,34	4500	5,225	22,79	13212,79	14000,27
L9	43,98	20,49	31528,25	4500	5,225	22,78	13813,15	14636,41
L10	44,66	21,26	35742,96	4500	5,225	17,81	15582,18	16510,87
L11	45,05	21,18	35683,24	4500	5,225	18,80	14783,71	15664,82
L12	44,07	20,91	33589,13	4500	5,225	25,06	11784,27	12486,62
L13	44,70	20,59	32518,29	4500	5,225	19,62	15547,33	16473,95
L14	44,74	21,01	34560,99	4500	5,225	23,29	12325,06	13059,64
L15	44,31	20,92	33825,62	4500	5,225	22,12	13255,20	14045,21
L16	44,41	21,16	35062,79	4500	5,225	15,90	17788,85	18849,07
L17	44,63	21,02	34522,70	4500	5,225	19,50	14732,25	15610,29
L18	44,87	20,80	33650,93	4500	5,225	18,98	15530,64	16456,26
L19	44,50	21,11	34866,25	4500	5,225	21,54	13207,84	13995,02
L20	44,80	20,85	33822,57	4500	5,225	31,36	9351,90	9909,27
L21	44,24	20,70	32702,25	4500	5,225	21,52	14094,92	14934,98
L22	44,14	20,75	32865,34	4500	5,225	17,02	17736,58	18793,68
L23	44,25	20,75	32926,40	4500	5,225	17,52	17198,35	18223,37
L24	44,67	21,02	34570,08	4500	5,225	16,43	17464,04	18504,89
L25	44,88	20,86	33948,03	4500	5,225	13,60	21479,43	22759,60
L26	44,60	20,38	31475,98	4500	5,225	21,33	14772,18	15652,60
L27	44,85	20,89	34088,23	4500	5,225	21,42	13584,97	14394,64
L28	44,45	20,88	33705,95	4500	5,225	16,77	17545,13	18590,82
L29	44,50	20,41	31541,91	4500	5,225	23,93	13139,88	13923,02
L30	44,46	21,40	36290,59	4500	5,225	14,96	18266,71	19355,40
L31	44,83	20,60	32660,40	4500	5,225	18,95	16026,99	16982,20
L32	44,69	21,00	34492,08	4500	5,225	17,19	16732,91	17730,19
L33	44,76	20,87	33903,45	4500	5,225	20,02	14611,76	15482,62
L34	44,41	20,64	32543,27	4500	5,225	25,36	12020,69	12737,12
L35	44,54	20,72	33017,05	4500	5,225	25,45	11803,20	12506,67
L36	44,42	20,59	32298,92	4500	5,225	18,25	16827,97	17830,92
L37	44,36	20,59	32281,79	4500	5,225	19,68	15613,49	16544,05
L38	44,75	20,98	34418,26	4500	5,225	21,64	13315,87	14109,50
L39	44,47	20,60	32411,44	4500	5,225	22,69	13488,07	14291,96
L40	44,66	20,62	32615,59	4500	5,225	22,03	13803,12	14625,78

L41	44,82	20,83	33770,27	4500	5,225	19,07	15402,72	16320,72
L42	44,99	20,85	33998,61	4500	5,225	24,38	11968,70	12682,04
L43	44,75	21,09	34979,14	4500	5,225	17,91	15836,48	16780,33
L44	44,30	21,00	34172,25	4500	5,225	22,28	13028,48	13804,98
L45	44,86	20,81	33686,97	4500	5,225	16,16	18217,54	19303,30
L46	44,97	20,90	34195,79	4500	5,225	23,11	12553,73	13301,93
L47	44,73	21,02	34616,52	4500	5,225	15,57	18403,93	19500,80
L48	44,60	20,98	34305,44	4500	5,225	19,31	14971,40	15863,69
L49	44,45	20,67	32696,54	4500	5,225	25,22	12027,58	12744,42
L50	44,72	21,06	34792,80	4500	5,225	17,72	16092,04	17051,13
L51	44,58	20,94	34096,82	4500	5,225	18,95	15349,11	16263,91
L52	44,90	20,81	33717,01	4500	5,225	19,28	15261,65	16171,25
L53	43,73	20,93	33396,30	4500	5,225	19,56	15187,61	16092,79
L54	44,91	20,79	33629,88	4500	5,225	21,30	13849,87	14675,32
L55	44,64	20,88	33879,92	4500	5,225	15,87	18452,47	19552,24
L56	44,83	20,99	34562,04	4500	5,225	16,35	17557,15	18603,55
L57	44,76	20,96	34362,90	4500	5,225	17,87	16150,55	17113,12
L58	44,57	20,93	34037,81	4500	5,225	17,75	16418,09	17396,61
L59	44,78	20,44	31885,28	4500	5,225	25,13	12377,76	13115,48
L60	44,51	20,68	32822,41	4500	5,225	22,24	13588,68	14398,57
L61	44,63	20,84	33645,76	4500	5,225	22,12	13330,07	14124,55
L62	44,85	20,94	34333,54	4500	5,225	20,09	14383,22	15240,46
L63	44,90	20,72	33281,44	4500	5,225	17,91	16644,31	17636,31
L64	44,63	20,51	32101,25	4500	5,225	16,32	18930,05	20058,28
L65	44,62	20,81	33527,85	4500	5,225	19,44	15221,42	16128,62
L66	44,41	20,83	33466,35	4500	5,225	15,94	18598,45	19706,92
L67	44,96	20,81	33767,08	4500	5,225	26,13	11243,59	11913,71
L68	44,94	20,89	34126,48	4500	5,225	19,40	14982,68	15875,64
L69	44,85	20,67	33006,74	4500	5,225	15,44	19468,23	20628,54
L70	44,58	20,89	33880,48	4500	5,225	17,41	16813,23	17815,30
L71	44,49	20,62	32518,10	4500	5,225	14,62	20859,84	22103,09
L72	44,73	20,78	33446,78	4500	5,225	19,27	15387,62	16304,72
L73	44,61	21,10	34924,55	4500	5,225	19,77	14363,88	15219,97
L74	44,54	21,12	34947,21	4500	5,225	21,13	13435,04	14235,77
L75	44,45	20,72	32947,86	4500	5,225	23,88	12605,51	13356,80
L76	44,93	20,64	32937,80	4500	5,225	27,64	10896,88	11546,34
L77	44,83	20,69	33085,42	4500	5,225	18,11	16551,89	17538,38
L78	44,24	20,69	32652,42	4500	5,225	22,67	13400,34	14199,00
L79	44,04	20,83	33155,70	4500	5,225	15,48	19322,35	20473,96
L80	45,00	20,71	33323,38	4500	5,225	15,29	19468,21	20628,52
L81	44,55	20,75	33168,11	4500	5,225	23,08	12957,64	13729,92
L82	44,85	20,46	32010,92	4500	5,225	18,76	16520,72	17505,35
L83	44,97	20,86	34013,58	4500	5,225	19,39	15040,16	15936,55
L84	44,87	20,44	31915,75	4500	5,225	24,44	12716,76	13474,68
L85	44,68	20,99	34413,58	4500	5,225	17,71	16278,56	17248,76

L86	44,85	20,64	32863,23	4500	5,225	18,80	16055,15	17012,04
L87	44,85	20,95	34380,19	4500	5,225	24,42	11813,25	12517,32
L88	44,56	20,47	31863,77	4500	5,225	17,92	17375,14	18410,70
L89	44,49	20,48	31860,35	4500	5,225	27,89	11163,07	11828,39
L90	44,52	20,63	32589,83	4500	5,225	19,81	15367,00	16282,87
L91	44,54	20,93	34017,44	4500	5,225	20,25	14402,15	15260,52
L92	44,62	20,92	34029,71	4500	5,225	21,59	13501,18	14305,85
L93	44,57	20,83	33552,18	4500	5,225	18,47	16009,34	16963,50
L94	44,40	20,95	34018,97	4500	5,225	14,14	20616,25	21844,98
L95	44,56	20,71	32981,60	4500	5,225	16,22	18542,15	19647,26
L96	44,92	21,21	35717,46	4500	5,225	21,46	12941,14	13712,43
Média	44,61	20,82	33546,04	4500	5,225	20,04	15162,82	16066,52
Desv. P.	0,26	0,20	1008,78	0	0	3,40	2427,60	2572,28

Através dos padrões de cores comparados aos valores dos módulos de elasticidades da Tabela 17, percebe-se que a classificação visual das lamelas não necessariamente acompanha os maiores resultados de rigidezes das peças, ou seja, os valores mais elevados do módulo de elasticidade não estão apenas nas linhas destacadas em azul, onde não há a presença de nós ou falhas, e nem os menores valores estão apenas nas linhas destacadas em cinza.

A fim de se comparar de forma geral os resultados dos grupos classificados visualmente, as médias dos valores dos módulos de elasticidade obtidos de cada conjunto foi calculada e está apresentada na Tabela 18.

Tabela 18: Média dos módulos de elasticidade dos grupos classificados de forma visual.

<b>Não possuem nós ou falhas (MPa)</b>	<b>Possuem apenas um nó ou falha (MPa)</b>	<b>Possuem mais de um nó ou falha (MPa)</b>
16.777,49	15.733,24	15.674,03

A análise das Tabelas 17 e 18 evidenciam que apesar dos valores individuais dos módulos de elasticidade de cada lamela apresentarem valores muitas vezes em desacordo com o grupo classificado, quando anotadas as médias dos grupos, os mesmos se mostram consoantes à classificação visual do lote onde a maior média dá-se no grupo sem a presença de nós ou falhas e a menor no grupo de lamelas que possuem mais de um nó ou falha.

Apesar da classificação visual se mostrar importante ao se buscar o melhor aproveitamento do material, os resultados apresentados denotam que essa metodologia não substitui em hipótese alguma a classificação de acordo com o comportamento mecânico das peças, neste caso, utilizado do ensaio não destrutivo de flexão estática a fim de se encontrar o módulo de elasticidade de cada lamela.

## 4.2 Fabricação da viga teste e ensaio de flexão simples

A partir da classificação individual das peças, as 6 lamelas com piores módulos de elasticidade foram escolhidas para compor a viga teste. Assim, as lamelas escolhidas foram distribuídas de acordo com a Figura 55, onde a rigidez de cada lamela correspondente segue a relação:  $L20 < L76 < L89 < L67 < L12 < L35$ .

Uma vez fabricada a viga teste, a Tabela 19 apresenta os parâmetros dimensionais e de rigidez da viga realizados a partir do ensaio não destrutivo de flexão estática em processo semelhante ao de obtenção do módulo de elasticidade das lamelas, aplicando-se uma carga conhecida posicionada no centro do vão, onde a partir de ciclos de 1 minuto, 3 leituras de deformações foram realizadas. Ainda, a fim de se comparar valores referentes ao módulo de elasticidade da viga teste, aplicou-se a média dos valores dos módulos de elasticidade das lamelas constituintes da viga corrigidos pela umidade e utilizou-se da Equação 12, apresentada no item 2.3.6.4, presente no Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), apresentando seus resultados na Tabela 20, sendo graficado seu comparativo na Figura 56.

Figura 55: Posicionamento das lamelas na viga teste.

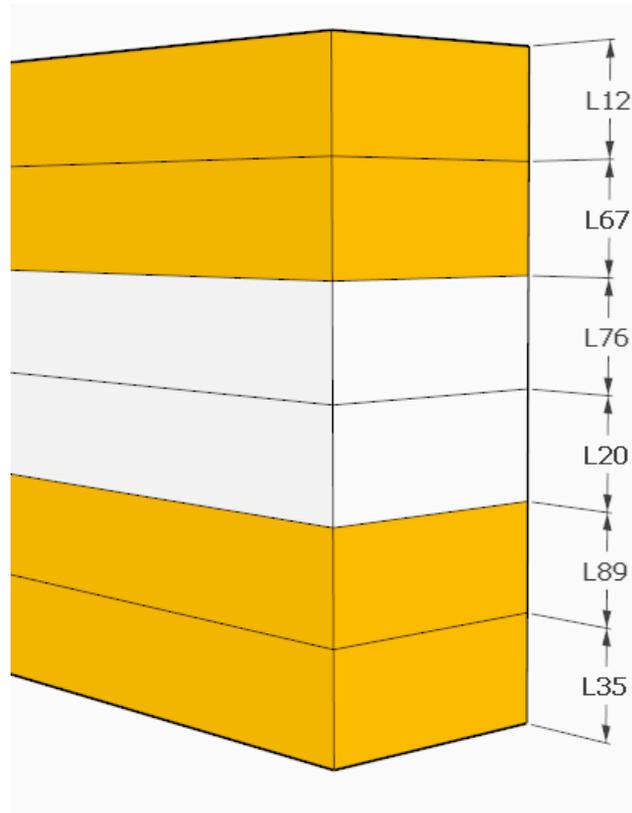


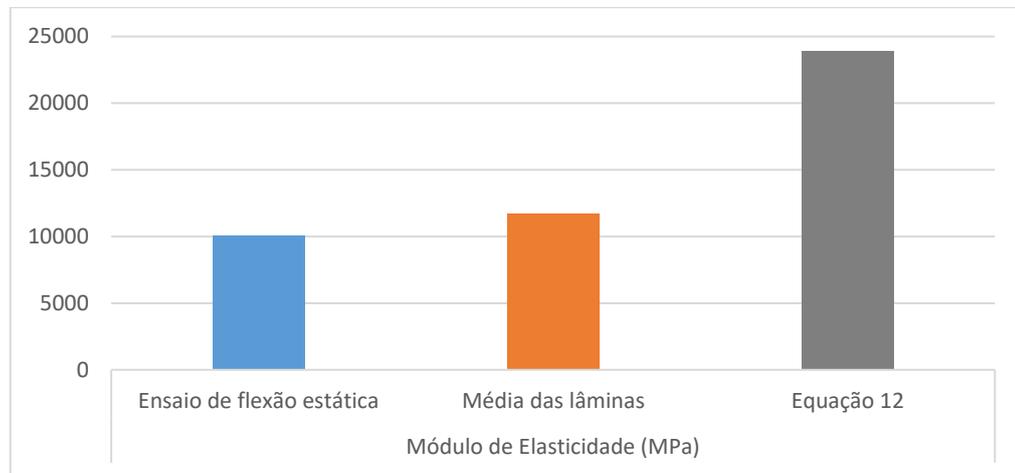
Tabela 19: Caracterização da viga teste através do ensaio de flexão estática.

Viga	Largura média (mm)	Altura média (mm)	Inércia (mm <sup>4</sup> )	Vão (mm)	Carga (N)	Deslocamento médio (mm)	Módulo de Elasticidade médio (MPa)
Teste	46,03	124,31	7.367.887,59	3440	74,35	0,90	9.508,88

Tabela 20: Comparativo dos módulos de elasticidade da viga teste.

Viga	Módulo de Elasticidade obtido pelo método de flexão estática corrigido (MPa)	Módulo de Elasticidade obtido pela média dos módulos das lamelas constituintes (MPa)	Módulo de Elasticidade obtido pela Equação 12 (MPa)
Teste	10.073,71	11.698,50	23.862,52

Figura 56: Comparativo dos módulos de elasticidade da viga teste.



Observa-se na avaliação comparativa dos módulos de elasticidade, que a Equação 12 demonstra um resultado bem superior aos outros dois métodos. Em relação à média dos módulos de elasticidade das lamelas, a diferença percentual é de cerca de 104%, já em relação ao resultado do ensaio de flexão estática chega a marca de 137%, comparativamente, a diferença percentual entre os dois métodos de menores valores do módulo de elasticidade é de aproximadamente 16%. Assim, para a sequência dos experimentos, adotou-se como parâmetro dimensional, o módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão estática, por este apresentar o menor coeficiente.

Logo, como preparação ao ensaio de flexão simples da viga teste, adotou-se como parâmetros de resistências, as definições encontradas nos ensaios de caracterização do lote adquirido, a partir de então, pôde-se proceder com o cálculo e desenvolvimento de cargas críticas para a viga teste de acordo com o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011). Estes valores estão apresentados na Tabela 21 considerando-se uma viga bi-apoiada

com um carregamento concentrado no centro do vão, sendo desconsiderados os coeficientes majoradores de carregamento e minoradores de resistência.

Tabela 21: Verificação da falha na viga teste.

<b>Carga crítica para a tensão de flexão (kN)</b>	<b>Carga crítica para a tensão de cisalhamento (kN)</b>	<b>Carga crítica para o deslocamento máximo vão/300 (kN)</b>	<b>Carga crítica para a ocorrência da instabilidade lateral (kN)</b>
8,59	14,88	1,00	4,73

Com a análise dos valores apresentados na Tabela 20, verifica-se que a falha na viga teste deva acontecer no Estado Limite de Serviço, através do deslocamento máximo no centro do vão com o provável carregamento de 1,00 kN. Vale ressaltar que como o carregamento aplicado acaba sendo um limitador de deslocamento lateral no centro do vão do conjunto, para o cálculo da carga crítica para a ocorrência da instabilidade lateral, levou-se em conta o comprimento de travamento como sendo metade do vão ensaiado. Sendo assim, para o estado limite último, a provável falha do sistema, ocorreria por conta da instabilidade lateral, com o carregamento de 4,73 kN.

Logo, com o sistema de ensaio montado, o manômetro central recebeu monitoramento até o limite de deformação estabelecido para a viga de 1,15 centímetros, deformação calculada para o carregamento de 1,00 kN, porém, tal deformação ocorreu experimentalmente com o carregamento de 0,8521 kN. Uma vez que a viga atingiu seu limite imposto, toda sua extensão foi inspecionada, constatando-se a integridade do conjunto sem sinais de aparente falha ou cisalhamento nas linhas de cola. Assim, continuou-se a realizar o incremento de carga até a marca limite de 5,1721 kN, com a viga atingindo um deslocamento vertical aproximado de 6,8 centímetros, como exemplificado através da Figura 57, sendo que um novo incremento só não foi possível, pois a viga começou a se inclinar lateralmente ao seu eixo de menor inércia.

Com o alívio da carga antes imposta, a viga teste retornou grande parte de seu deslocamento sofrido a condição original, como demonstra a Figura 58. Ainda, com nova inspeção realizada, percebeu-se apenas um notório esmagamento no ponto de aplicação da carga na fibra da madeira da viga, porém todo o restante do conjunto permaneceu intacto, o que imprimiu confiança a continuação dos experimentos e à metodologia de construção das vigas aplicada.

Figura 57: Deformação com o carregamento máximo da viga teste.



Figura 58: Deformação residual após o alívio do carregamento máximo da viga teste.



### 4.3 Fabricação das vigas de MLC

A partir da classificação das lamelas restantes de madeira de acordo com suas rigidezes, as mesmas foram separadas de forma às lamelas com piores módulos de elasticidade estarem empregadas na região central (menos solicitadas) das vigas ao passo que, às mais resistentes

estarem no mesmo conjunto de vigas nas regiões mais solicitadas. Desta forma, das 90 lamelas empregadas, as com maiores módulos de elasticidade foram utilizadas nas quartas partes da mesma viga com as de menor módulo de elasticidade, estas empregadas na região central, e assim sucessivamente, garantindo o equilíbrio do conjunto de vigas. Logo, as lamelas escolhidas foram distribuídas nos conjuntos de vigas de acordo com as Figuras 59, 60 e 61 onde as vigas de 8 lamelas (V8) foram nomeadas como V81, V82 e V83, as de 10 lamelas (V10) como V101, V102 e V103, e por fim as vigas de 12 lamelas (V12) como V121, V122 e V123.

Uma vez fabricadas as nove vigas de MLC para o estudo de instabilidade lateral, a Tabela 22 apresenta os parâmetros dimensionais e de rigidez das vigas realizados a partir do ensaio não destrutivo de flexão estática em processo semelhante ao da viga teste. Ainda, a fim de se comparar valores, aplicou-se a média dos valores dos módulos de elasticidade das lamelas constituintes das vigas corrigidos pela umidade e utilizou-se da Equação 12, presente no Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), apresentando seus resultados na Tabela 23, sendo graficado seu comparativo na Figura 62.

Figura 59: Posicionamento das lamelas nas vigas V8.

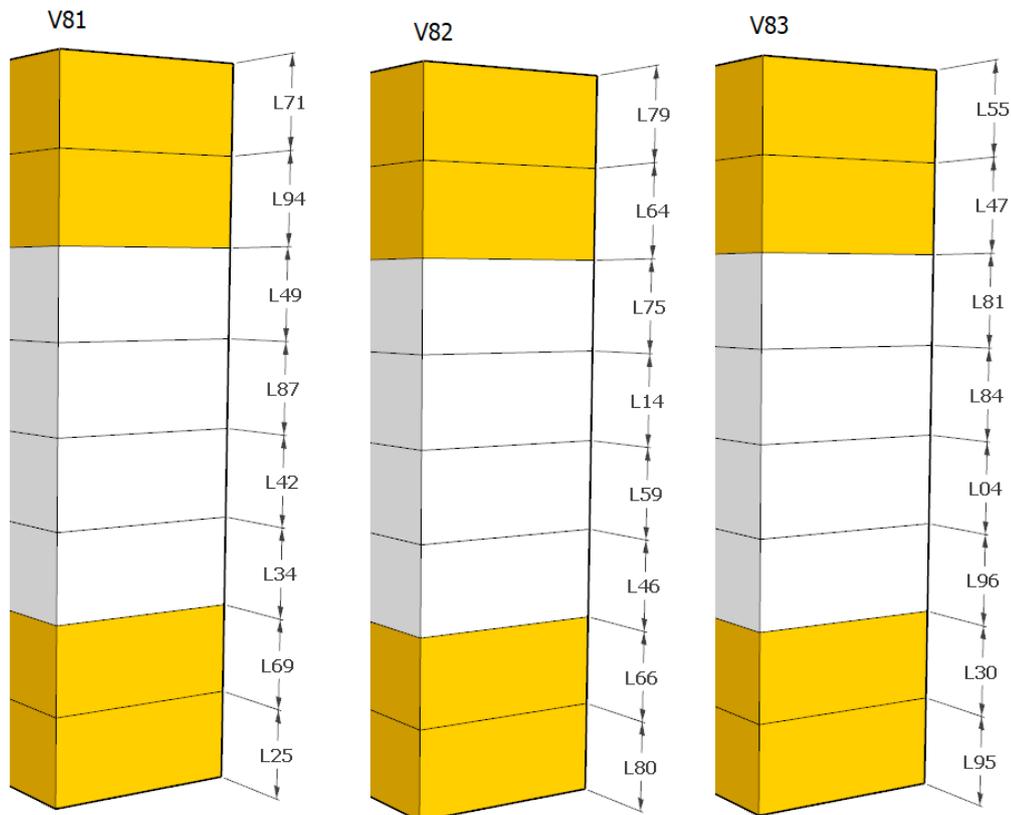


Figura 60: Posicionamento das lamelas nas vigas V10.

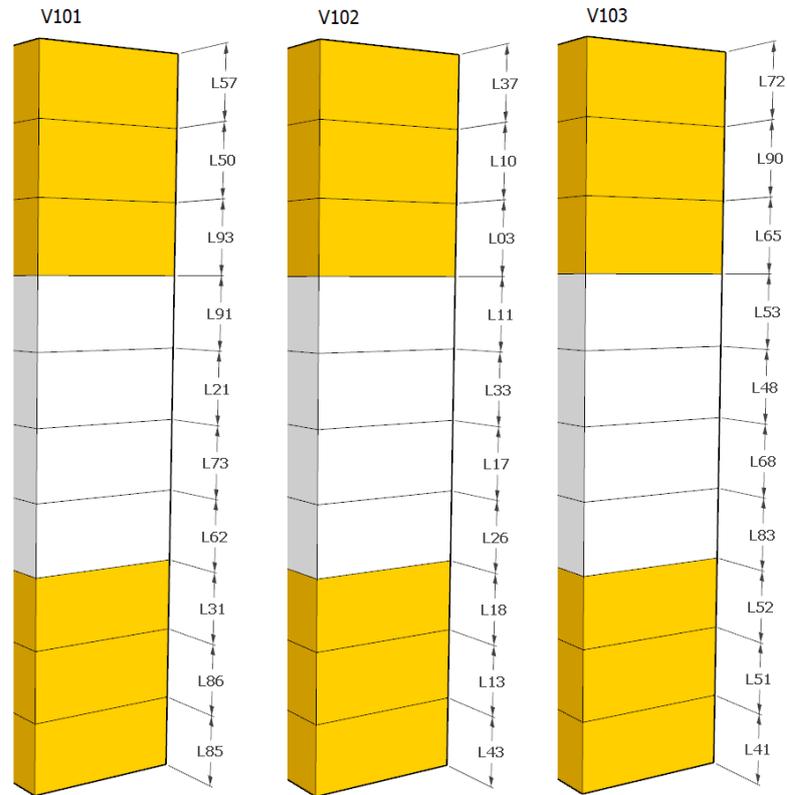


Figura 61: Posicionamento das lamelas nas vigas V12.

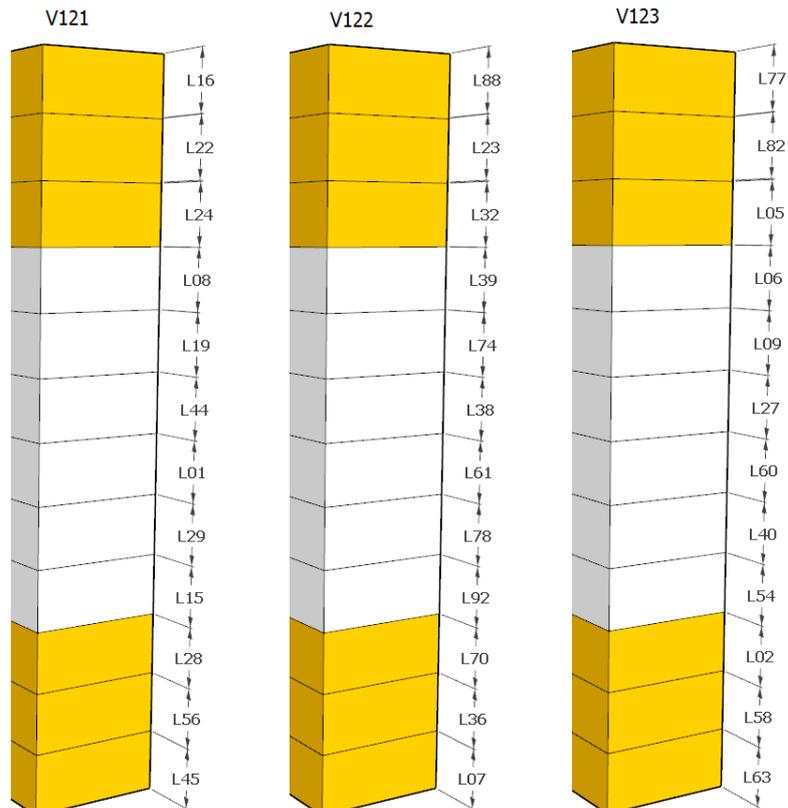


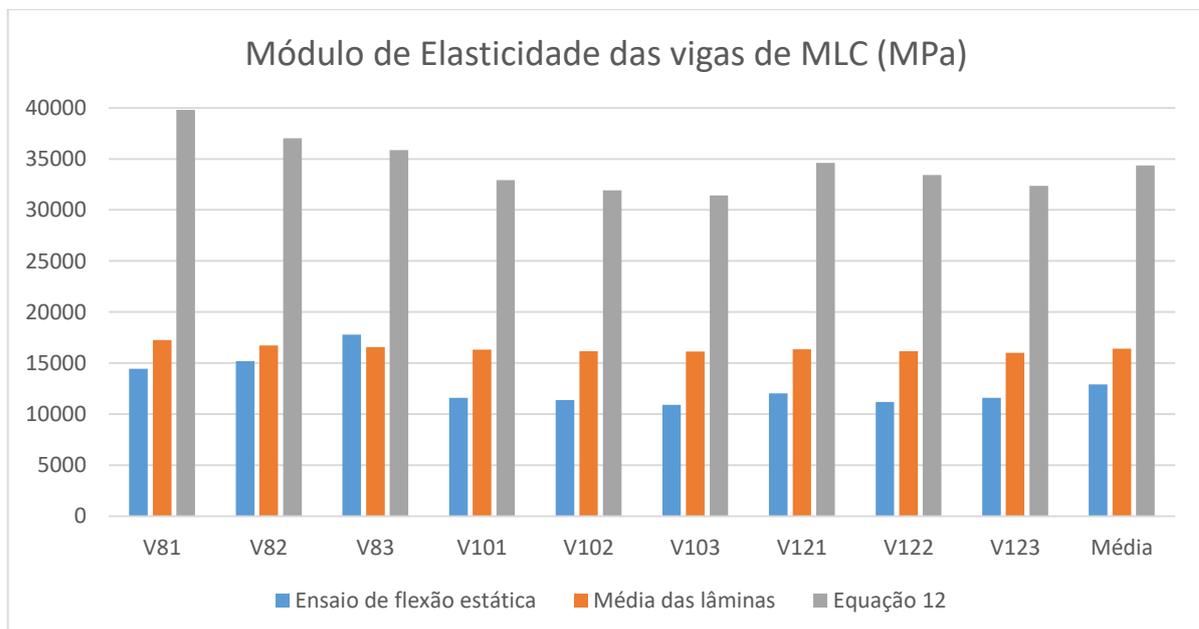
Tabela 22: Caracterização das vigas de MLC através do ensaio de flexão estática.

Vigas	Largura média (mm)	Altura média (mm)	Inércia em x (mm <sup>4</sup> )	Vão (mm)	Carga (N)	Deslocamento médio (mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)
V81	43,78	165,5	16.538.210,12	4.000	857,3	5,07	13.632,49
V82	44,18	164,67	16.439.474,16	4.000	857,3	4,85	14.336,46
V83	43,47	164,83	16.222.477,11	4.000	857,3	4,20	16.776,64
V101	43,86	207,53	32.668.563,60	4.000	857,3	3,20	10.934,31
V102	44,04	208,10	33.073.663,61	4.000	857,3	3,22	10.733,30
V103	44,15	207,87	33.046.457,43	4.000	857,3	3,36	10.294,55
V121	43,62	248,67	55.895.210,79	4.000	857,3	1,80	11.361,21
V122	43,15	248,63	55.266.268,66	4.000	857,3	1,96	10.552,50
V123	43,61	246,97	54.744.115,82	4.000	857,3	1,91	10.932,03

Tabela 23: Comparativo dos módulos de elasticidade das vigas de MLC.

Vigas	Módulo de Elasticidade obtido pelo método de flexão estática corrigido (MPa)	Módulo de Elasticidade obtido pela média dos módulos das lamelas constituintes (MPa)	Módulo de Elasticidade obtido pela equação 12 (MPa)
V81	14.442,26	17.252,14	39.793,37
V82	15.188,04	16.712,69	37.030,67
V83	17.773,18	16.574,34	35.853,71
V101	11.583,81	16.302,67	32.910,17
V102	11.370,86	16.155,18	31.930,70
V103	10.906,05	16.124,08	31.431,59
V121	12.036,06	16.351,62	34.596,01
V122	11.179,32	16.144,17	33.411,57
V123	11.581,39	16.009,40	32.365,96
<b>Média</b>	<b>12.895,66</b>	<b>16.402,92</b>	<b>34.369,30</b>

Figura 62: Comparativo dos módulos de elasticidade das vigas de MLC.



Observa-se na avaliação comparativa dos módulos de elasticidade, que a Equação 12 novamente demonstra um resultado bem superior aos outros dois métodos. Em relação à média dos módulos de elasticidade das lamelas, a diferença percentual é de cerca de 110%, já em relação ao resultado do ensaio de flexão estática chega a marca de 166%, comparativamente, a diferença percentual entre os dois métodos de menores valores do módulo de elasticidade é de aproximadamente 27%. Nota-se ainda, na avaliação comparativa entre os métodos do ensaio, que apenas para a viga denominada V83, o ensaio de flexão estática demonstrou um valor acima da média dos módulos de elasticidade das lamelas, sendo esta diferença de aproximadamente 7%. Para o restante dos casos, a maior diferença entre estes dois métodos de análise deu-se na viga denominada V103, no valor aproximado de 32%, e a menor diferença comparativa se deu na viga denominada V82, cerca de 9%.

A fim de se verificar estatisticamente a significância da diferença dos resultados entre os métodos para a obtenção do módulo de elasticidade através do ensaio a flexão e a média das lamelas, realizou-se uma análise de variância do tipo t de Student com nível de significância de 5% para apenas estas duas metodologias, apresentando seus resultados na Tabela 24. Assim concluindo-se pela rejeição da hipótese nula inicialmente assumida, apresentando a negativa evidencial de que as variâncias são iguais, ou seja, assumindo a diferença significativa nas médias entre os dois métodos comparados.

Assim, para a sequência dos experimentos, adotou-se como parâmetro dimensional, o módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão estática corrigido pela umidade, por este apresentar a menor das médias.

Tabela 24: Análise de variância em relação aos ensaios de módulo de elasticidade.

<b>Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes</b>		
	<b>Ensaio de flexão estática</b>	<b>Média das lamelas</b>
Média	12895,663	16402,922
Variância	5606715,334	152516,800
Observações	9,000	9,000
Hipótese da diferença de média	0,000	
gl	8,000	
Stat t	-4,384	
P(T<=t) uni-caudal	0,001	
t crítico uni-caudal	1,860	
P(T<=t) bi-caudal	0,002	
t crítico bi-caudal	2,306	

#### 4.4 Ensaio de instabilidade lateral

De forma similar ao que ocorrera com a viga teste, como preparação ao ensaio de instabilidade lateral das vigas de MLC, procedeu-se com o cálculo e desenvolvimento de cargas críticas no Estado Limite Último (ELU) para as vigas de acordo com o Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), e apresentado na Tabela 25 considerando-se uma viga bi-apoiada com um carregamento concentrado no centro do vão, sendo desconsiderados os coeficientes majoradores de carregamento e minoradores de resistência.

Tabela 25: Verificação da falha nas vigas de MLC.

<b>Vigas</b>	<b>Carga crítica para a tensão de flexão (kN)</b>	<b>Carga crítica para a tensão de cisalhamento (kN)</b>	<b>Carga crítica para a ocorrência da instabilidade lateral (kN)</b>
V81	12,46	18,84	3,00
V82	12,44	18,92	3,22
V83	12,27	18,63	3,60
V101	19,62	23,67	3,09
V102	19,81	23,83	3,08
V103	19,81	23,86	2,97
V121	28,02	28,20	3,83
V122	27,71	27,89	3,45
V123	27,63	28,00	3,66

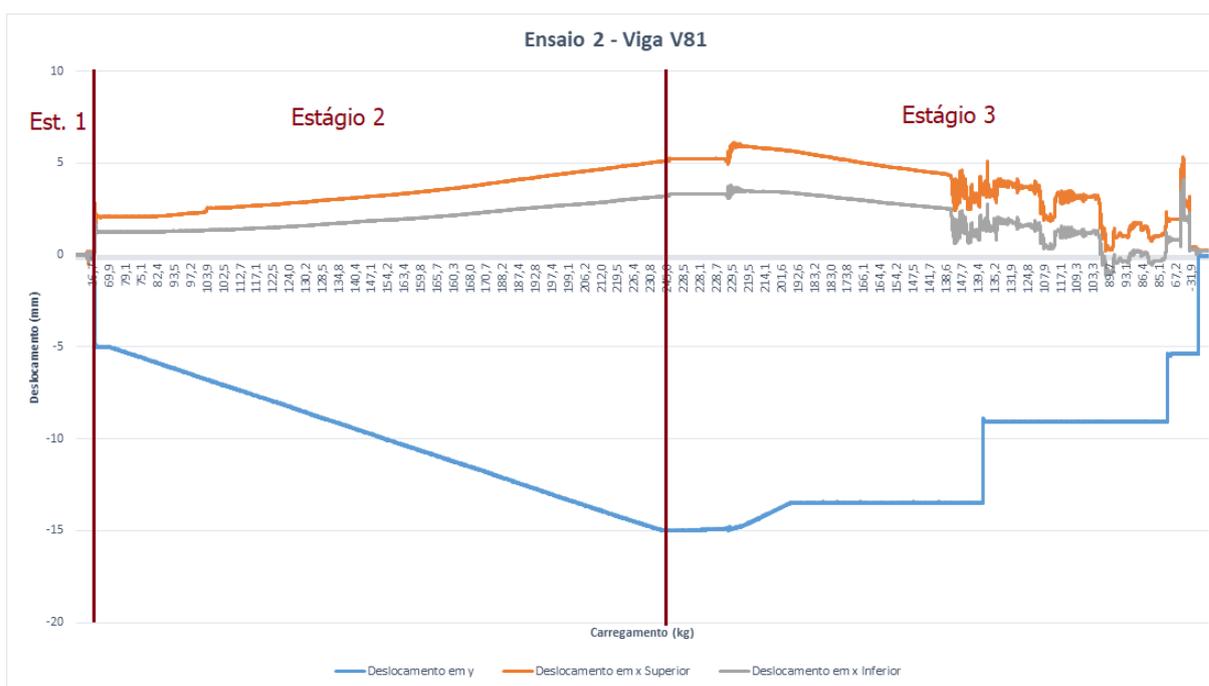
Com a análise dos valores apresentados na tabela 25, verifica-se que as falhas nas vigas de MLC no ELU deverão ocorrer primeiramente por conta da instabilidade lateral. Sendo assim, prosseguiu-se com os ensaios experimentais.

Uma vez planejados, os ensaios experimentais foram iniciados. Assim, uma a uma, as 9 vigas de MLC foram sendo submetidas a metodologia de falha à instabilidade lateral. Uma vez que cada viga foi ensaiada por 3 vezes, obtiveram-se 27 resultados distintos, onde as variáveis experimentais encontradas correspondem ao deslocamento vertical máximo, deslocamento horizontal superior máximo, deslocamento horizontal inferior máximo e o carregamento máximo concentrado no centro do vão que leva à instabilidade lateral da viga. Vale ressaltar que o critério de parada estabelecido acusando-se a instabilidade lateral foi de deslocamento lateral atingindo 3,00 mm, descontados os deslocamentos iniciais provocados pela colocação do suporte de carga. A Figura 63 ilustra o ensaio de estabilidade lateral em andamento e a Figura 64 o gráfico gerado através dos dados registrados durante o segundo ensaio da viga V81.

Figura 63: Ensaio de estabilidade lateral em andamento.



Figura 64: Gráfico do ensaio de estabilidade lateral da viga V81-2.



Através da análise do gráfico da Figura 64 percebe-se que o carregamento acusado pela célula de carga (kg) encontra-se no eixo da abscissa e os deslocamentos no eixo da ordenada, sendo em azul o deslocamento em y (mm), em laranja o deslocamento em x superior (mm) e em cinza o deslocamento em x inferior (mm). Assim, de forma explicativa dividiu-se o gráfico em 3 estágios. O estágio 1 refere-se ao início do processo de gravação dos dados, com os equipamentos de medição já posicionados na viga de MLC. A partir do estágio 2 os equipamentos de apoio (suporte para o incremento de carga) eram instalados sobre a viga e iniciava-se o acréscimo gradativo de carga (início da transferência de água para o reservatório instalado no suporte). Conforme aumentava-se o carregamento, os medidores registravam um aumento de deslocamento. A linha que demarca a transição do estágio 2 para o estágio 3, é o momento em que o acréscimo de carregamento é cessado e estabilizado por 1 minuto, até que no estágio 3 ocorre o descarregamento de carga do suporte, até a finalização do ensaio e o encerramento da gravação de dados. Os gráficos de todos os ensaios estão apresentados no Apêndice deste trabalho.

A Tabela 26 compila os valores referentes as variáveis encontradas através dos ensaios experimentais. No caso da carga pontual máxima, nos valores apresentados já estão adicionados os elementos extras de apoio não acusados pela célula de carga. Por sua vez, a Tabela 27, apresentada na sequência, plota a média dos valores ensaiados (referentes a Tabela 26) de acordo com cada viga de MLC, onde a partir de seus valores, os gráficos das Figuras 65 e 66 foram montados.

Tabela 26: Resultados dos ensaios de instabilidade lateral.

Vigas	Ensaio	Deslocamento vert. Máximo (mm)	Deslocamento horizontal superior máximo (mm)	Deslocamento horizontal inferior máximo (mm)	Carga pontual máxima (kN)
V81	1	17,25	4,84	2,73	2,73
	2	15,03	6,15	2,50	2,50
	3	13,64	5,63	2,48	2,48
V82	1	17,91	3,50	3,24	3,24
	2	17,85	3,00	3,01	3,01
	3	18,80	4,29	3,52	3,52
V83	1	18,72	2,29	4,19	4,19
	2	11,68	5,48	2,84	2,84
	3	16,37	5,36	2,83	2,83
V101	1	5,10	3,79	1,42	1,42
	2	13,29	4,92	3,15	3,15
	3	7,66	6,87	2,08	2,08
V102	1	10,65	3,54	2,87	2,87

	2	9,86	3,68	2,78	2,78
	3	13,20	5,31	3,60	3,60
	1	8,64	7,17	2,82	2,82
V103	2	9,42	9,96	2,34	2,34
	3	8,97	5,93	2,51	2,51
	1	8,80	2,37	4,02	4,02
V121	2	9,50	4,24	4,47	4,47
	3	8,28	4,23	3,91	3,91
	1	5,79	5,55	3,12	3,12
V122	2	6,61	6,61	3,20	3,20
	3	6,13	5,57	3,22	3,22
	1	8,21	3,34	3,62	3,62
V123	2	8,41	6,18	3,98	3,98
	3	7,52	5,09	3,77	3,77

Tabela 27: Média dos resultados dos ensaios de instabilidade lateral.

Vigas	Média do deslocamento vertical máximo (mm)	Média do deslocamento horizontal superior máximo (mm)	Média do deslocamento horizontal inferior máximo (mm)	Média da carga pontual máxima (kN)
V81	15,31	5,54	3,38	2,57
V82	18,19	3,60	1,52	3,26
V83	15,59	4,38	2,13	3,29
V101	8,68	5,19	2,39	2,22
V102	11,24	4,18	2,98	3,08
V103	9,01	7,69	5,10	2,56
V121	8,86	3,61	2,99	4,13
V122	6,18	5,91	2,40	3,18
V123	8,05	4,87	2,15	3,79

Figura 65: Comparativo das médias de cargas pontuais máximas das vigas de MLC.

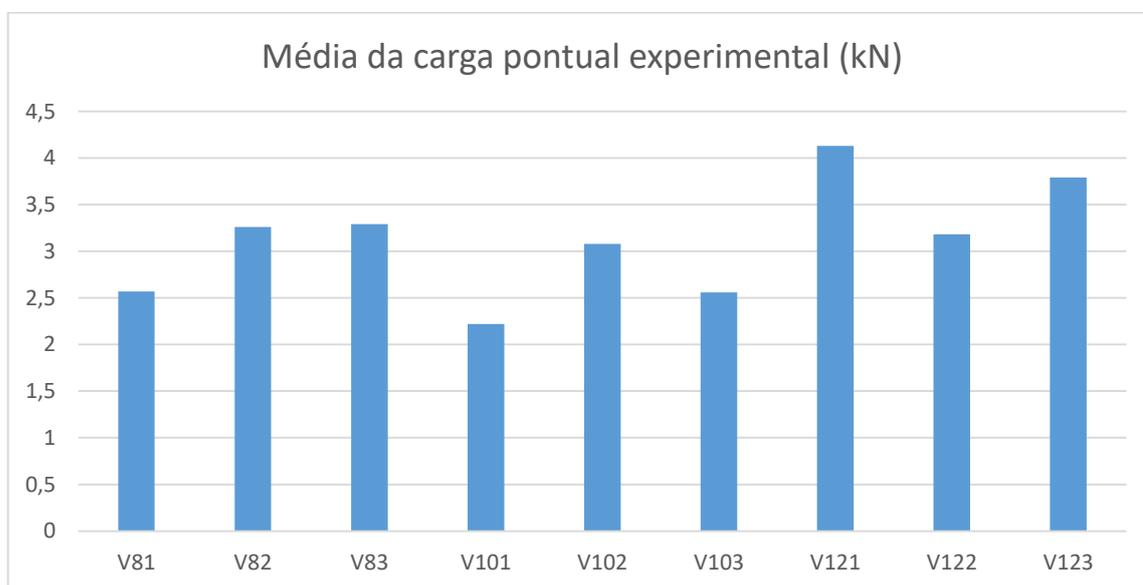
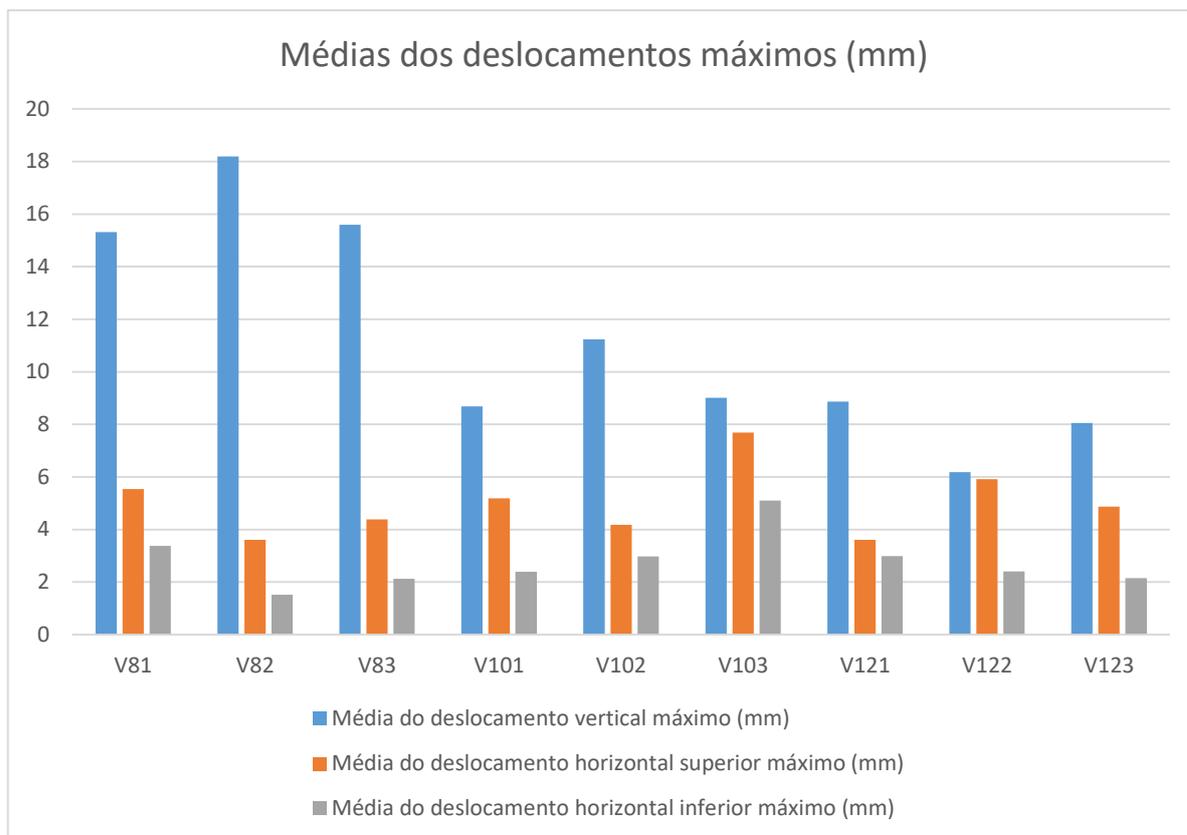


Figura 66: Comparativo das médias de deslocamentos máximos das vigas de MLC.

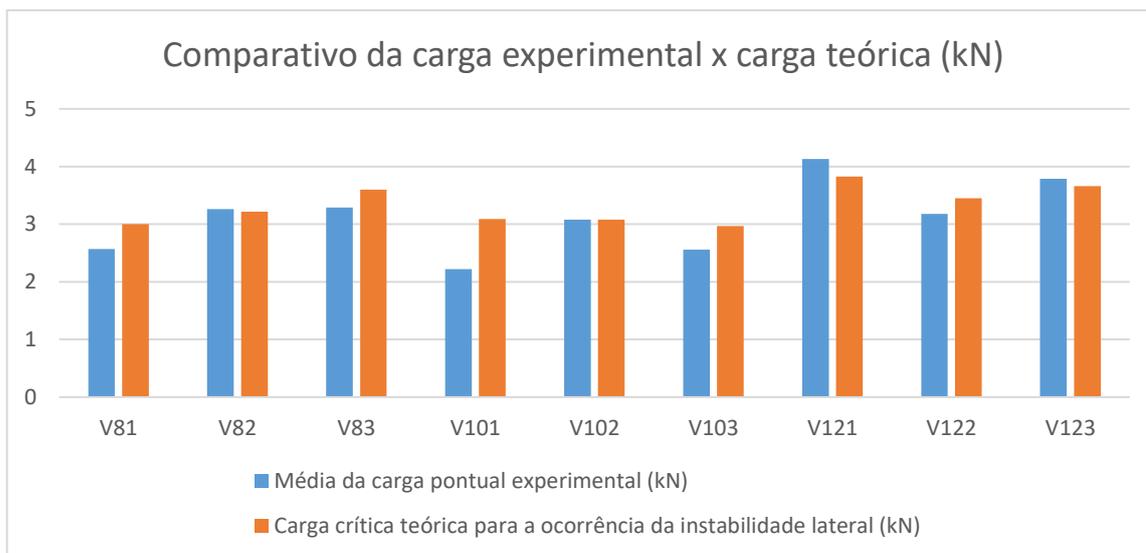


O gráfico da Figura 65 mostra valores bem variados para os carregamentos concentrados que provocam a instabilidade lateral nas vigas de MLC. A maior carga ensaiada entre as vigas ocorreu na viga denominada V121 (4,13 kN), e a menor na viga denominada V101 (2,22 kN), uma diferença percentual de 86%.

Por sua vez, no gráfico da Figura 66 percebe-se que em todos os casos, o maior deslocamento ocorreu no eixo vertical, seguido pela parte superior deslocada horizontalmente, sendo o deslocamento horizontal inferior o menor dos valores ocorridos em todos os ensaios. Percebe-se ainda que as vigas de 8 lamelas deslocaram verticalmente valores maiores antes da ocorrência da instabilidade lateral do que as vigas de 10 lamelas, que por sua vez, de forma média também deslocaram verticalmente valores maiores que as vigas de 12 lamelas, o que evidencia que quanto maior a relação  $h/d$  menor será a deformação vertical das vigas antes da ocorrência da instabilidade lateral.

A fim de se comparar a carga concentrada que levou experimentalmente os elementos de MLC à instabilidade lateral com a expectativa inicial, apresentada anteriormente na Tabela 25, ambos os valores foram relacionados e estão apresentados no gráfico da Figura 67.

Figura 67: Comparativo das médias de cargas pontuais máximas das vigas de MLC.



O gráfico da Figura 67 mostra que relacionados os estudos preliminares teóricos, aos ensaios experimentais, houveram certas variações entre as diferenças dos dois parâmetros, destacando-se a maior diferença ocorrida entre os elementos da viga denominada V101, cerca de 28%, e também a menor diferença, ocorrida na viga denominada V102, onde os valores ensaiados experimentalmente foram os mesmos que os ocorridos na expectativa teórica. Por conta dessa aproximação de indicadores, procedeu-se com um estudo de análise de variância do tipo t de Student com nível de significância de 5% a fim de se avaliar estatisticamente essa semelhança, apresentando seus resultados na Tabela 28.

Tabela 28: Análise de variância comparativo da carga experimental x carga teórica.

<b>Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</b>		
	<b>Carga experimental</b>	<b>Carga teórica</b>
Média	3,120	3,322
Variância	0,369	0,102
Observações	9,000	9,000
Variância agrupada	0,235	
Hipótese da diferença de média	0,000	
gl	16,000	
Stat t	-0,884	
P(T<=t) uni-caudal	0,195	
t crítico uni-caudal	1,746	
P(T<=t) bi-caudal	0,390	
t crítico bi-caudal	2,120	

A análise estatística demonstra a aceitação da hipótese nula inicialmente assumida, apresentando evidências de que as variâncias são iguais, ou seja, assumindo que não há diferença significativa nas médias entre os dois métodos comparados.

#### 4.5 Comparativos para a instabilidade lateral

Uma vez concluídos os ensaios, seus valores foram utilizados para se encontrar os momentos críticos que geram à instabilidade lateral experimental em cada uma das vigas propostas e compará-los com os valores teóricos obtidos através de formulações normativas e referências bibliográficas. Para tal, foram consideradas as características das vigas até então discutidas, que estão compiladas na Tabela 29. Ainda, foram consideradas as combinações das cargas concentradas aplicadas no centro dos vãos dos elementos e seus pesos próprios, que juntamente aos módulos de elasticidade e aos Momentos Críticos Experimentais que levam as vigas à instabilidade lateral, estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 29: Caracterização das vigas de MLC consideradas.

Vigas	Largura média (mm)	Altura média (mm)	Vão (mm)	Relação h/b	Inércia eixo horizontal (m <sup>4</sup> )	Inércia eixo vertical (m <sup>4</sup> )	Inércia torcional (m <sup>4</sup> )
V81	43,78	165,5	4.000	3,78	1,65382E-5	1,15729E-6	3,85802E-6
V82	44,18	164,67	4.000	3,73	1,64395E-5	1,18334E-6	3,93366E-6
V83	43,47	164,83	4.000	3,79	1,62225E-5	1,12830E-6	3,76364E-6
V101	43,86	207,53	4.000	4,73	3,26686E-5	1,45917E-6	5,05967E-6
V102	44,04	208,10	4.000	4,73	3,30737E-5	1,48127E-6	5,13523E-6
V103	44,15	207,87	4.000	4,71	3,30465E-5	1,49074E-6	5,16522E-6
V121	43,62	248,67	4.000	5,70	5,58952E-5	1,71988E-6	6,11934E-6
V122	43,15	248,63	4.000	5,76	5,52663E-5	1,66462E-6	5,93051E-6
V123	43,61	246,97	4.000	5,66	5,47441E-5	1,70695E-6	6,06831E-6

Tabela 30: Momento crítico experimental das vigas de MLC.

Vigas	Módulo de Elasticidade Long. (MPa)	Módulo de Elasticidade Transv. (MPa)	Peso Próprio das vigas (kN/m)	Carga concentrada considerada (kN)	Momento Crítico Experimental (kNm)
V81	14442,26	962,82	0,032	2,57	2,63
V82	15188,04	1012,54	0,032	3,26	3,32
V83	17773,18	1184,88	0,031	3,29	3,35
V101	11583,81	772,25	0,040	2,22	2,29
V102	11370,86	758,06	0,040	3,08	3,16
V103	10906,05	727,07	0,040	2,56	2,64
V121	12036,06	802,40	0,048	4,13	4,23
V122	11179,32	745,29	0,047	3,18	3,27
V123	11581,39	772,09	0,047	3,79	2,89

#### 4.5.1 Comparativo dos resultados experimentais e normativos

Uma vez obtidos os momentos críticos experimentais, dimensionou-se os momentos críticos pelas metodologias normativas do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), da normativa europeia, através do EN-Eurocode 5 (2014) e da normativa americana, a AFPA (2003), apresentando seus valores juntamente ao momento crítico experimental na Tabela 31. A fim de se criar uma relação comparativa entre os dados normativos e experimentais, a Tabela 32 apresenta a razão entre os momentos normativos encontrados em relação ao momento crítico experimental de acordo com cada viga. A partir dos dados encontrados nas Tabelas 31 e 32, geraram-se dois gráficos apresentados nas Figuras 68 e 69.

Tabela 31: Momentos Críticos experimentais e normativos.

<b>Vigas</b>	<b>Momento Crítico Experimental (kNm)</b>	<b>Momento Crítico NBR 7190 (2011) (kNm)</b>	<b>Momento Crítico EM-Eurocode 5 (2014) (kNm)</b>	<b>Momento Crítico AFPA (2003) (kNm)</b>
V81	2,63	3,00	3,32	3,41
V82	3,32	3,22	3,56	3,67
V83	3,35	3,60	3,98	4,09
V101	2,29	3,09	3,42	3,39
V102	3,16	3,08	3,41	3,38
V103	2,64	2,97	3,29	3,26
V121	4,23	3,83	4,24	4,08
V122	3,27	3,45	3,82	3,67
V123	2,89	3,66	4,05	3,90

Tabela 32: Razão entre os momentos normativos e experimentais.

<b>Vigas</b>	<b>NBR7190(2011) / Experimental</b>	<b>EM-Eurocode5(2014) / Experimental</b>	<b>AFPA(2003) / Experimental</b>
V81	1,14	1,26	1,30
V82	0,97	1,07	1,11
V83	1,07	1,19	1,22
V101	1,35	1,49	1,48
V102	0,97	1,08	1,07
V103	1,13	1,25	1,23
V121	0,91	1,00	0,96
V122	1,06	1,17	1,12
V123	1,27	1,40	1,35
Média	1,10	1,21	1,20
Desvio Padrão	0,14	0,16	0,16

Figura 68: Comparativo dos Momentos Críticos experimentais e normativos.

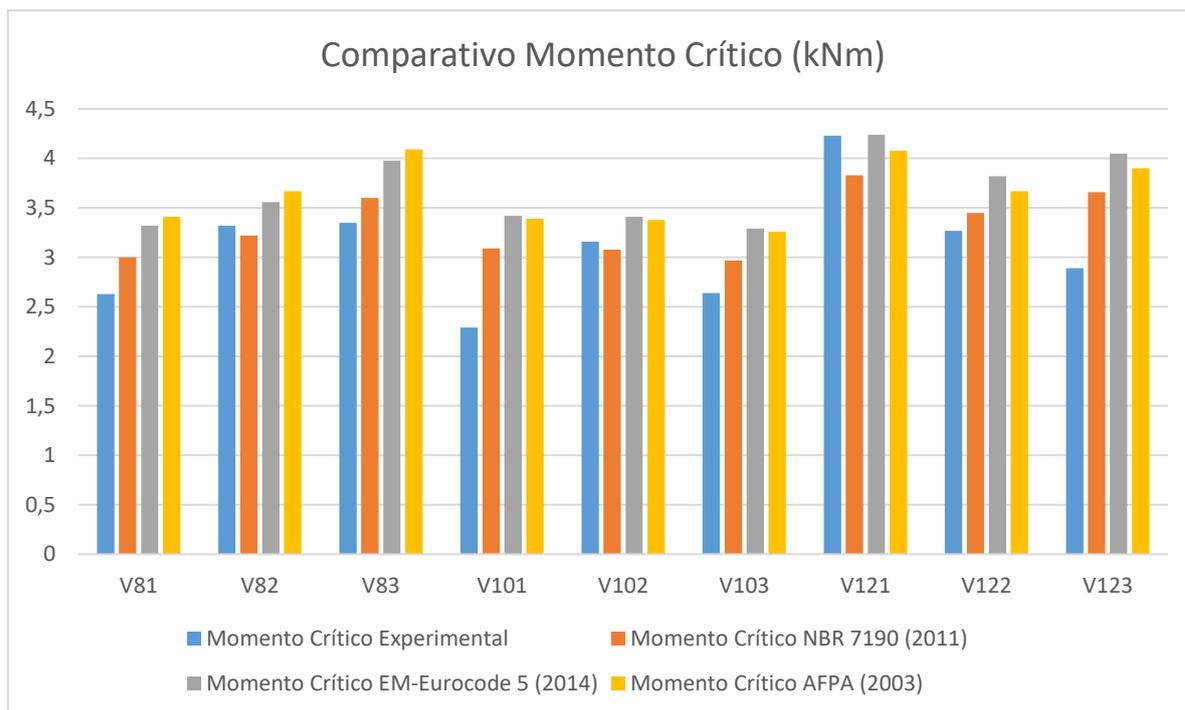
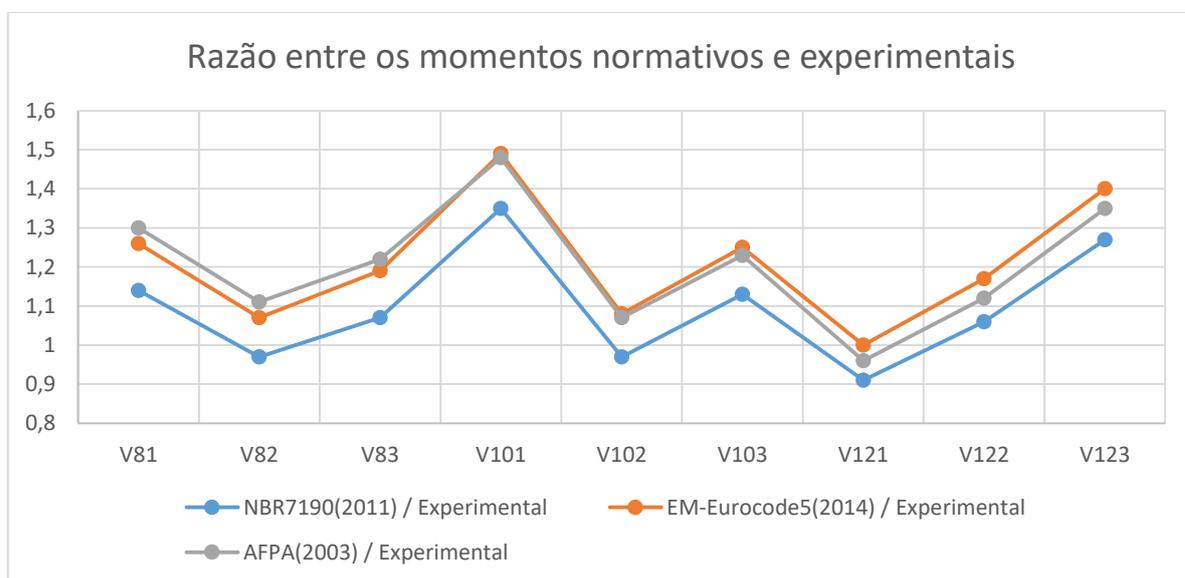


Figura 69: Razão entre os momentos normativos e experimentais.



A fim de se avaliar estatisticamente os comparativos apresentados procedeu-se com dois estudos distintos de análise de variância, ambos com nível de significância de 5%. O primeiro, um teste do tipo t de Student entre o momento crítico experimental e o momento crítico dimensionado através do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011), apresentado na Tabela 33, e o segundo, um teste do tipo anova analisando-se todos os momentos críticos comparados na Figura 68, estes demonstrados na Tabela 34.

Tabela 33: Análise de variância em relação aos Momentos Críticos experimentais e do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011).

<b>Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</b>		
	<b>Momento Crítico experimental</b>	<b>Momento Crítico NBR 7190 (2011)</b>
Média	3,087	3,322
Variância	0,319	0,102
Observações	9,000	9,000
Variância agrupada	0,210	
Hipótese da diferença de média	0,000	
gl	16,000	
Stat t	-1,089	
P(T<=t) uni-caudal	0,146	
t crítico uni-caudal	1,746	
P(T<=t) bi-caudal	0,292	
t crítico bi-caudal	2,120	

Tabela 34: Análise de variância dos Momentos Críticos experimentais e normativos.

<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>		
Momento Crítico experimental	9	27,78	3,09	0,3189		
Momento Crítico NBR 7190 (2011)	9	29,90	3,32	0,1020		
Momento Crítico EM-Eurocode 5 (2014)	9	33,09	3,68	0,1246		
Momento Crítico AFPA (2003)	9	32,85	3,65	0,0990		
<b>ANOVA</b>						
<b>Fonte de variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>Valor-P</b>	<b>Fcrítico</b>
Entre grupos	2,1481	3	0,71603	4,443655	0,010158	2,90112
Dentro dos grupos	5,1534	32	0,16114			
Total	7,3045	35				

Analisando-se inicialmente os gráficos das Figuras 68 e 69 pode-se reparar, que há uma certa alternância entre os resultados, nenhuma das metodologias mantém-se sempre com os maiores valores ou menores valores. Em relação a análise da variância estatística entre o método experimental e o método teórico do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) para obtenção do momento crítico que leva à instabilidade lateral, evidenciou-se a não existência de diferença significativa entre os dois modelos, podendo-se assumir que não há diferença significativa nas médias entre os dois métodos comparados. Já a análise de variância exibida na Tabela 34, onde se comparam os três métodos normativos em relação ao método experimental, conota-se a existência de diferença significativa, em pelo menos um dos modelos

adotados com o valor de  $F$  ultrapassando o  $F_{\text{crítico}}$  e o valor de  $P$  acusando porcentagem inferior (1%) ao nível de significância adotado (5%).

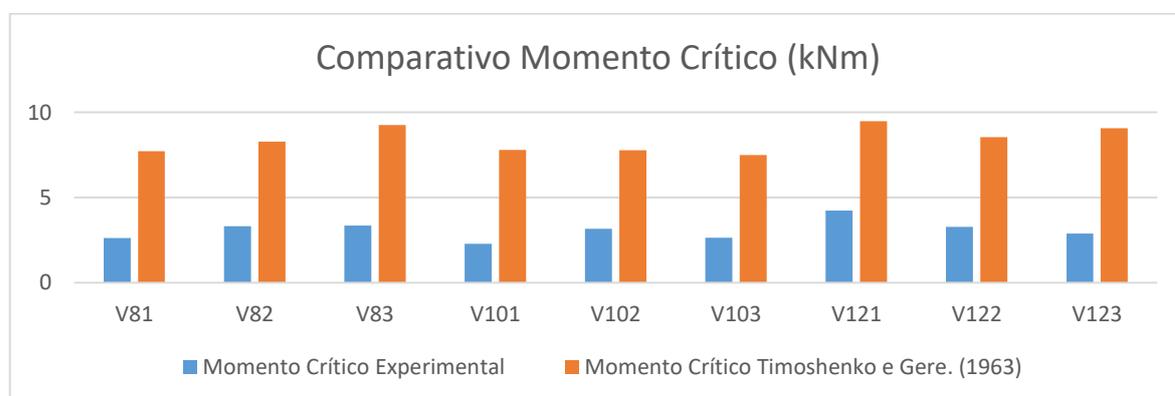
#### 4.5.2 Comparativo dos resultados experimentais e bibliográficos

Ainda, propôs-se o comparativo do momento crítico teórico publicado por Timoshenko e Gere. (1963) em relação ao momento crítico experimental encontrado. Assim a Tabela 35 apresenta os valores adotados pelas duas metodologias bem como a razão entre a teoria bibliográfica e a o valor experimental, com os valores comparativos graficados na Figura 70.

Tabela 35: Momentos Críticos experimentais e bibliográficos.

Vigas	Momento Crítico Experimental (kNm)	Momento Crítico Timoshenko e Gere. (1963) (kNm)	Timoshenko e Gere. (1963) / Experimental
V81	2,63	7,71	2,93
V82	3,32	8,28	2,49
V83	3,35	9,25	2,76
V101	2,29	7,80	3,41
V102	3,16	7,77	2,46
V103	2,64	7,49	2,84
V121	4,23	9,49	2,24
V122	3,27	8,54	2,61
V123	2,89	9,07	3,14
Média	-	-	2,76
Desv. P.	-	-	0,36

Figura 70: Comparativo dos Momentos Críticos experimentais e bibliográficos.



O gráfico da Figura 70 evidencia uma grande diferença em relação aos métodos adotados, onde a maior variação percentual ocorre na viga denominada V123, chegando a 214%, e a menor na viga denominada V102, de 146%.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo geral sobre as características mecânicas e físicas da madeira para aplicabilidade em elementos lamelados colados. Discutiu-se efeitos normativos e limites causais que podem ocasionar a instabilidade lateral em vigas. Caracterizações e ensaios em madeira de reflorestamento da espécie *Pinus* foram realizados e seus valores discretizados. Ainda, se realizou o processo de fabricação de uma viga teste a fim de se dominar a técnica construtiva para então proceder com a fabricação e ensaio de vigas de MLC submetidas a um experimento controlado que ocasiona a instabilidade lateral nestes elementos. Somente então, realizou-se comparações de seus resultados com metodologias normativas, bibliográficas e numéricas.

Através da pesquisa realizada, pôde-se perceber que o primeiro passo para o desenvolvimento de qualquer projeto ou trabalho envolvendo a madeira para fins estruturais, necessita de um estudo de caracterização do lote a ser utilizado, visto que suas características variam muito até dentro de uma mesma espécie. O comparativo dos módulos de elasticidades entre lamelas evidenciou esta importância, visto que a classificação visual do lote não necessariamente produziu resultados satisfatórios em relação a classificação pelo método estático e não destrutivo de rigidez na flexão.

Em relação aos ensaios de cisalhamento descritos, o ensaio com corpo de prova simétrico se mostrou de fácil execução e com resultados promissores em relação ao ensaio assimétrico normatizado, embora ainda necessite de maiores investigações a fim de se garantir a padronização de seus valores, inclusive no que diz respeito a outras espécies de madeira.

A própria escolha da metodologia a ser aplicada a cada diferente tipo de ensaio de caracterização implica de forma cabal em seus resultados, como observado no comparativo entre as três metodologias utilizadas para se identificar os valores dos módulos de elasticidade das vigas de MLC produzidas. Quanto ao processo de fabricação das vigas, o mesmo demonstrou-se satisfatório, uma vez que em fase experimental, excedeu os limites normativos de resistência sem apresentar defeitos ou descolamentos das lamelas adesivadas com resina a base de uréia-formol.

Para o ensaio experimental de estabilidade lateral, o planejamento metodológico e os aparelhos de apoio utilizados, como os apoios das vigas e o equipamento de incremento de carga pendural, demonstraram-se eficientes e seguros de sua função em todo o processo.

Quando comparados os resultados experimentais aos obtidos das formulações normatizadas, observa-se proximidades nos valores obtidos, embora apenas em relação ao método teórico do Projeto aprovado em votação nacional da NBR 7190 (2011) a análise estatística apresentou evidências de não haver diferença significativa nas médias entre os dois métodos, o que demonstra o equilíbrio da formulação normatizada em relação ao teste experimental, e também valida o critério de parada adotado experimentalmente, apesar da natureza de falha brusca ocasionada pela instabilidade lateral.

Já em relação à formulação teórica apresentada por Timoshenko e Gere. (1963), a diferença significativa entre os resultados apresentados era de certa forma esperada, uma vez que o equacionamento de tal teorização leva em conta materiais de comportamento isotrópicos e não anisotrópicos como a madeira. O que leva a evidenciar o impacto que a constituição física dos materiais exerce sobre seu comportamento mecânico.

É fato que com o avanço da tecnologia construtiva e a evolução nos processos fabris de materiais, novas técnicas e diferentes padrões podem vir a compor o novo cenário da construção civil mundial. Por todas as características apresentadas pela madeira, e principalmente por se tratar de material renovável, de baixo impacto ambiental, o investimento científico em elementos deste material deve acompanhar sua crescente no mercado, estimulando cada vez mais novos estudos e arranjos estruturais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas - Procedimento, 2003.

ABRAF. Anuário Estatístico ABRAF. Brasília ABRAF, 2013. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3910>> Acesso em: 02/11/2017.

AFPA. Technical report 14: designing for lateral-torsional stability in wood members. Washington, D.C.: American Forest and Paper Association, 2003.

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

AWC. American Wood Council. ASD/LRFD National Design Specification for Wood Construction. Manual for Engineering Wood Construction. 2012 Edition, 2012.

BALÁŽ, I. Lateral Torsional buckling of timber beams. Wood Res 50(1), 2005.

BELL, K.; EGGEN, T. E. Stability of timber beams and columns. IABSE conference. Lahti: International Association for Bridge and Structural Engineering. p. 155–62, 2001.

BORTOLETTO JR., G. Indicações para utilização da madeira de seis espécies e variedades de Pinus aplicada na construção civil. São Carlos. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia. Universidade de São Paulo. 1993.

BRAZOLIN, S.; LANA, E. L.; MONTEIRO, M. B. B.; LOPEZ, G. A. C.; PLETZ, E. Preservação de madeiras – sistema de classes de risco. Revista Madeira Arquitetura e Engenharia, 5 a., n.13, 2004.

BRIDGE ENGINEERING. Timber bridge manual. Engineering Technology Branch. Roads and Traffic Authority of NSW. June, 2008.

BROUGHTON, J. G.; HUTCHINSON, A. R. Effect of timber moisture content on bonded-in rods. Construction and Building Materials 15, 17-25, 2001.

CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A.; GÓES, J. L. N. de, CHEUNG, A. B.; STAMATO, G. C.; PIGOZZO, J. C.; OKIMOTO, F. S.; LOGSDON, N. B.; BRAZOLIN, S.; LANA, E. L. Manual de projeto e construção de pontes de madeira. São Carlos: Suprema, 252 p., 2006.

CALIL JÚNIOR, C.; MOLINA, J. C.; SEGUNDINHO, P. G. de A.; KIMURA, E. F. A. Manual de projeto e construção de passarelas com estruturas de madeira. São Paulo: Pini, 2012.

CALIL NETO, C. Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie – adesivo – tratamento químico. São Carlos. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

CALIL NETO, C.; CHRITOFORO, A. L.; FILHO, S. L. M. R.; LAHR, F. A. R.; CALIL JÚNIOR, C. Avaliação da Resistência ao Cisalhamento e à Delaminação em Madeira Laminada Colada. *Ciência Florestal*, v. 24, n. 4, 989-996, 2014.

CALLIA, V. W. A madeira laminada e colada de pinho-do-paraná nas estruturas. *Boletim nº 47 IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas*. São Paulo, 1958.

CAMPOS, J. A. O. Método para avaliação da durabilidade e da reabilitação da madeira de estruturas em serviço. *Dissertação (Mestrado)*. Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CAN-CSA O86. Engineering design in wood. Mississauga (Ontario, Canada): Canadian Standard Association; 2015.

CHEUNG, A. B. Tabuleiro ortótropo treliçado protendido transversalmente para aplicação em pontes de madeira. *Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos*. Universidade de São Paulo, 2003.

CWC Canadian Wood Council. “Embodied Energy of WOOD Products.” *Quick Facts - Sustainable Building Series*. 2004.

DE ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. de M. CAVALHEIRO, R. S. DE MACEDO, L. B. Combinação madeira-adesivo-impermeabilizante em MLC. *Madeira: Arquitetura e Engenharia*, v. 12, n. 31, 2011.

DEL SENNO, M.; PIAZZA, M.; TOMASI, R. Axial glued-in steel timber joints – experimental and numerical analysis. *Holz Roh Werkst* 62:137–46, 2004.

DU, Yang. Lateral Torsional buckling of wooden beam-deck systems. *Articles: University of Ottawa*; 2016.

DUWADI, S. R.; RITTER, M. A. Timber Bridges in the United States. *Public Road Magazine*, Volume 60, nº 3, Federal Highway Administration, Winter, 1997.

EBADI, M. M.; DOUDAK, G.; SMITH, I. Evaluation of floor vibration caused by human walking in a large glulam beam and deck floor. *Engineering Structures*, v. 196, p. 109349, 1 out. 2019.

EN-EUROCODE 5 – Design of timber structures. Part 1-1, general: common rules and rules for buildings. Brussels (Belgium), 2014.

EULER, L. *Methodus Inveniendi Lineas Curvas Maximi Minimive Proprietate Gaudentes*. Apud Marcum-Michaellem Bousquet & Socios, Lausanne & Geneva, 1744.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Bridge Inspector’s Reference Manual*. U.S. Department of Transportation. Publication No. FHWA NHI 12-049. December, 2012.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Levantamento de patologias em pontes de madeira e propostas de recuperação. *Anais do XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira-EBRAMEN*, Londrina, PR, jul. 2008.

FRAGIACOMO, M. Long-term behavior of timber–concrete composite beams. II: Numerical analysis and simplified evaluation. *Journal of Structural Engineering*, New York, v.132, n.1, p.13-22, 2006.

FRANGI, A.; FONTANA, M.; MISCHLER, A. Shear behavior of bond lines in glued laminated timber beams at high temperatures. *Wood Sci Technol* 38, 119-126, 2004.

FRANKE, S.; FRANKE, B.; HARTE, A. M. Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art. *Construction and Building Materials* 97, 2-13, 2015.

FUSCO, P. Brasiliense- Os caminhos da evolução da engenharia das madeiras - III ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS EM MADEIRA - EBRAMEM. São Carlos, SP - 1989 - vol. 6 p.07-18.

GUTKOWSKI, R.M.; BROWN, K.; SHIGIDI, A.; NATTERER, J. Investigation of notched composite wood–Concrete connections. *Journal of Structural Engineering*, New York, v.130, n.10, p.1553-1561, 2004.

HASSAN, O. A. B.; JOHANSSON, C. Glued laminated timber and steel beams: A comparative study of structural design, economic and environmental consequences. *Journal of Engineering, design and technology* vol. 16, n. 3, 398-417, 2018.

HINDMAN, D. P.; MANBECK, H. B.; JANOWIAK, J. J. Measurement and prediction of lateral torsional buckling loads of composite wood materials: Rectangular sections. *For Prod J* 55, p. 42–7. 2005.

HOOLEY, R. F.; MADSEN, B. Lateral buckling of glued laminated beams. *J Struct Eng Div, ASCE* 90, p. 201–303, 1964.

HU, Y.; MOHAREB, M.; DOUDAK, G. Effect of eccentric lateral bracing stiffness on lateral torsional buckling resistance of wooden beams. *International Journal Structural Stability and Dynamics* 18(02), 2017.

ISSA, C. A.; KMEID, Z. Advanced wood engineering: glulam beams. *Construction and Building Materials* 19, p. 99-106, 2005.

JANKOWSKY, I. P.; BARILLARI, C. T.; FREITAS, V. de P. Tratamento preservativo da madeira de Pinus. *Revista da Madeira, Curitiba*, v. Edição, n. Especial, p. 110-116, 2002.

JIAO, P.; BORCHANIA, W.; SOLEIMANIA, S.; MCGRAWB, B. Lateral-torsional buckling analysis of wood composite I-beams with sinusoidal corrugated web. *Thin-Walled Structures*, n.119, p.72-82, 2017.

KHELIFA, M.; CELZARD, A.; OUDJENE, M.; RUELLE, J. Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams. *International Journal of Adhesion e Adhesives* 68, 283-297, 2016.

KINJO, H.; KATAKURA, Y.; HIRASHIMA, T.; YUSA, S.; SAITO, K. Deflection behavior and load-bearing period of structural glued laminated timber beams in fire including cooling phase. *Journal of Structural Fire Engineering*. Emerald Publishing Limited, 2040-2317, 2018.

KLAPÁLEK, P.; PROSEK, Z.; KRÁLÍK, V. Comparison of Modulus of Elasticity of Glued Laminated Timber. *Key Engineering Materials*, vol. 714, 29-32, 2016.

KONG, K.; FERRIER, E.; MICHEL, L.; AGBOSSOU, A. Experimental and analytical study of the mechanical behavior of heterogeneous glulam-UHPFRC beams assembled by bonding: Short- and long-term investigations. *Construction and Building Materials* 100, 136-148, 2015.

LAGRANGE, J. L.; SERRET, J.A.; DARBOUX, G. *Oeuvres De Lagrange*. Gauthier-Villars, Paris, 1867.

LESKO, A. Modern moment resisting timber connections – theory and numerical modelling. *Procedia Engineering* 153, 400-406, 2015.

LRFD, em <http://laminatedconcepts.com/timber-vehicular-bridges/mjp2g76u2vtnc06ok9jq4vju78it/5/2/20152015/2/5/mjp2g76u2vtnc06ok9jq4vju78it>, acessado em 03/11/2018.

MACEDO, A. N.; CALIL JUNIOR, C. Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de métodos de ensaio – NBR 7190/1997. *Caderno de Estruturas*. São Carlos-SP, 1999.

MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, B. D.; MISSIO, A. L. Field testing of CCA-treated Brazilian spotted gum. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 74, p. 124–128, 1 out. 2012.

MALO, K. A. Timber Bridges. *Innovative Bridge Design Handbook*. Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway. Cap. 11, 273-297, 2016.

MIOTTO, J. L. Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro. 325p. Tese de doutorado em Engenharia Civil – Estruturas. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2009.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. *Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA*, 35-45, 2009.

MOODY, R. C. et al. Glued structural members. In: *Wood Handbook – Wood as an engineering material*. Madison: Forest Products Laboratory, 1999. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113, chapter 11, 1999.

NEIVA, G. Shirahama - Estudo de vigas retas de madeira laminada colada ('MLC'). IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS EM MADEIRA - EBRAMEM. São Carlos, SP - 1992.

PELLETIER, B.; DOUDAK, G. Investigation of the lateral-torsional buckling behavior of engineered wood I-joists with varying end conditions. *Engineering Structures* 187, pag. 329-340, 2019.

PETRAUSKI, S. M. F. C.; SILVA, J. C.; PETRAUSKI, A.; DELLA LUCIA, R. M. Analysis of eucalyptus glued-laminated timber pórticos structural performance. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 40, n. 5, 931-939, 2016.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. *Estruturas de Madeira: dimensionamento segundo a norma brasileira NBR 7190/97 e critérios das normas norte-americana NDS e europeia EUROCODE 5*. 6.ed., ver. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

POCIUS, A. V. *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. 2nd ed. Hanser Gardner Publications; 2002.

PORTEOUS, J.; KERMANI, A. *Structural Timber Design to Eurocode 5*. Blackwell Publishing, 2007.

PROJETO APROVADO EM VOTAÇÃO NACIONAL DA NBR 7190. Associação brasileira de normas técnicas ABNT/CB-02. *Projetos de estruturas de madeira*, 2011.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; DENSLEY-TINGLEY, D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; SCHERMAN, O. *The wood from the trees: The use of timber in construction, Renewable and Sustainable Energy Reviews Pergamon*, 1 fev. 2017.

REMADE. Expansão do pinuss no Brasil impulsiona setor. *Revista da Madeira*. Edição 98. 2006. Artigo técnico. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=948](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=948)>. Acesso em 12/11/2018.

ROCCO LAHR, F. A. *Contribuição ao estudo de vigas retas de madeira laminada-colada*. São Carlos, SP - 1991. Relatório de iniciação científica.

ROSS, R. J. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, v.1, 2010.

SADS, SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2017. Licenciamento florestal: Inventário floresta. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/inventario-florestal>>. Acesso em: 02/11/2017.

SAHRAEI, A.; PEZESHKY, P.; MOHAREB, M.; DOUDAK, G. Simplified expressions for elastic lateral torsional buckling of wood beams. *Engineering Structures* 174, p. 229-241, 2018.

SATO, J. N.; MASCIA, N. T. Estabilidade em peças de madeira: comparação de critérios normativos. 4º Congresso Latino Americano de Estructuras de Maderas (CLEM), Uruguay, 2019.

SCAPINELLO, R.; BRESOLIN, J.; RAMIRES, F. B.; PRAVIA, Z. M. C. Instabilidade lateral em vigas de madeira. Anais do V Seminário Regional de Engenharia Estrutural. Universidade de Passo Fundo, 2018.

SEGUNDINHO, P. G. de A.; CALIL NETO, C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J.; CALIL JUNIOR, C. Resistência de linhas de cola para madeiras de reflorestamento. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 36, n. 1, 107-116, 2015.

SEGUNDINHO, P. G. de A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). Revista Matéria v. 22, n. 02, 2017.

SEGUNDINHO, P. G. de A.; ZANGIÁCOMO, A. L.; CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; LAHR, F. A. R. Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm.). Cerne, Lavras, v. 19, n. 3, 441-449, 2013.

SILVA, J. P. A. G. Especificações de tratamentos de preservação para elementos de madeira. 2008. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

STAMATO, G. C.; CALIL JUNIOR, C. Madeira compensada: estrutura interna, composição e comportamento estrutural. Revista madeira (CD-Rom), IBRAMEM - São Carlos - SP, 2003.

STEINBERG, E. et al. Connectors for timber–lightweight concrete composite structures. Journal of Structural Engineering, New York, v.129, n.11, p.1538-1545, 2003.

ST-AMOUR, Remi; DOUDAK, Ghasan. Experimental and numerical investigation of lateral torsional buckling of wood I-joists. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 45, issue 1. NRC Research Press, 2018.

SU, Y.; ZHAO, H.; LIU, S.; LI, R.; WANG, Y.; WANG, Y.; BIAN, J.; HUANG, Y. Buckling of beams with finite prebuckling deformation. International Journal of Solid and Structures 165, p. 148-159, 2019.

SURYOATMONO, B.; TJONDRO, A. Lateral torsional buckling of orthotropic rectangular section beams. Department of Civil Engineering, Parahyangan Catholic University, Bandung, Indonesia, 2008.

SZÜCS, Carlos Alberto. Madeira Laminada-Colada: aplicação estrutural da madeira sob a técnica do laminado-colado. Florianópolis: UFSC – Departamento de Engenharia Civil, 1992.

THE FOREST TIME, em <https://www.the-forest-time.com/pt/guia-de-especies/pinus-taeda-5ac5d7c05>, acessado em 15/06/2019.

TIMOSHENKO, S. P.; GERE, J. M. Theory of Elastic Stability. Engineering Societies Monographs. New York: McGraw-Hill, 1963.

VIDAL, J. M. et al. Wood preservation in Brasil: historical, current scenario and trends. Ciência Florestal, v. 25, n. 1, p. 257–271, 2015.

VILELA, M. I. A madeira na Construção de Habitação Colectiva. Universidade Lusofona do Porto, 2013.

XIAO, Q.; DOUDAK, G.; MOHAREB, M. Lateral Torsional buckling of wood beams: FEA modeling and sensitivity analysis. World Conference on Timber Engineering. Quebec City. 2014.

XIAO, Q.; DOUDAK, G.; MOHAREB, M. Numerical and experimental investigation of lateral torsional buckling of wood beams. Engineering Structures, v. 151, p. 85–92, 15 nov. 2017.

ZAHN, J. J. Lateral stability of wood beam-and-deck systems. J Struct Div, ASCE - p. 1391–408, 1973.

ZANGIÁCOMO, A. L. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. 78p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

## APÊNDICE

Figura 71: Ensaio 1 da Viga V81 – Relação deslocamentos x carregamento.

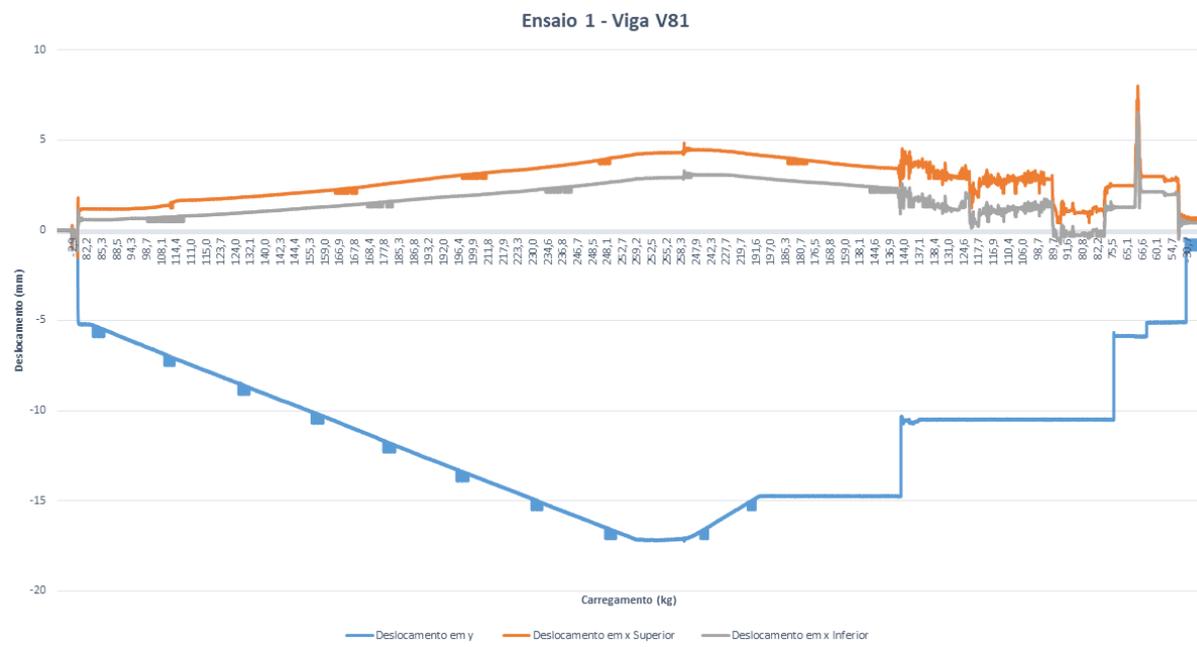


Figura 72: Ensaio 2 da Viga V81 – Relação deslocamentos x carregamento.

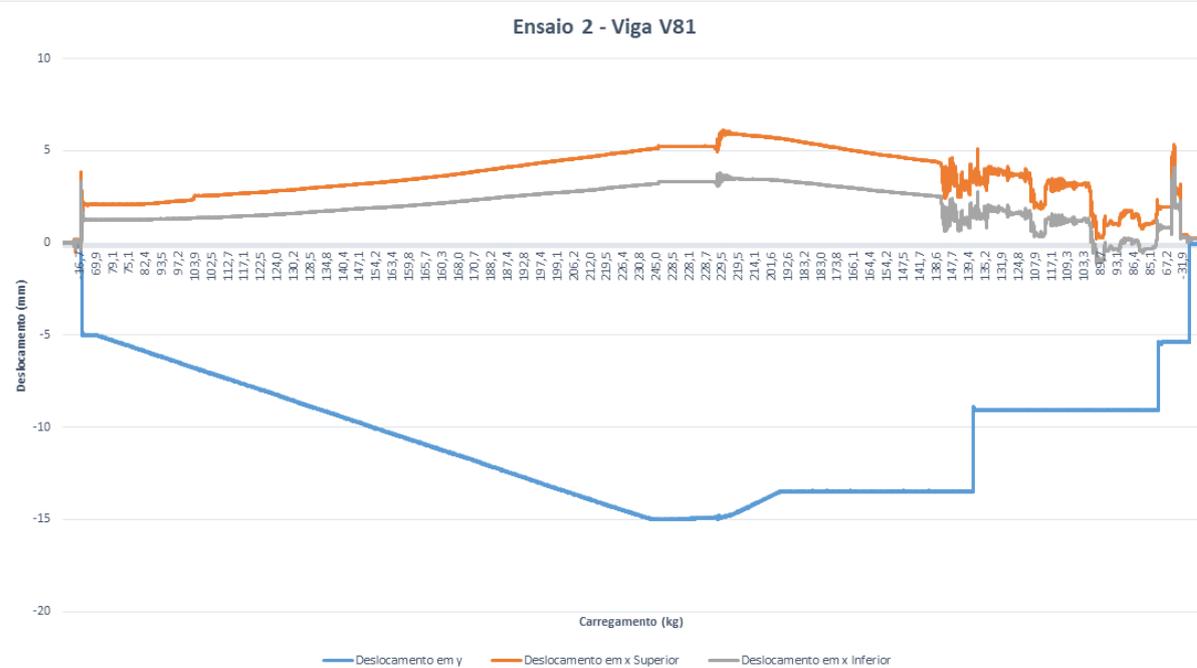




Figura 75: Ensaio 2 da Viga V82 – Relação deslocamentos x carregamento.

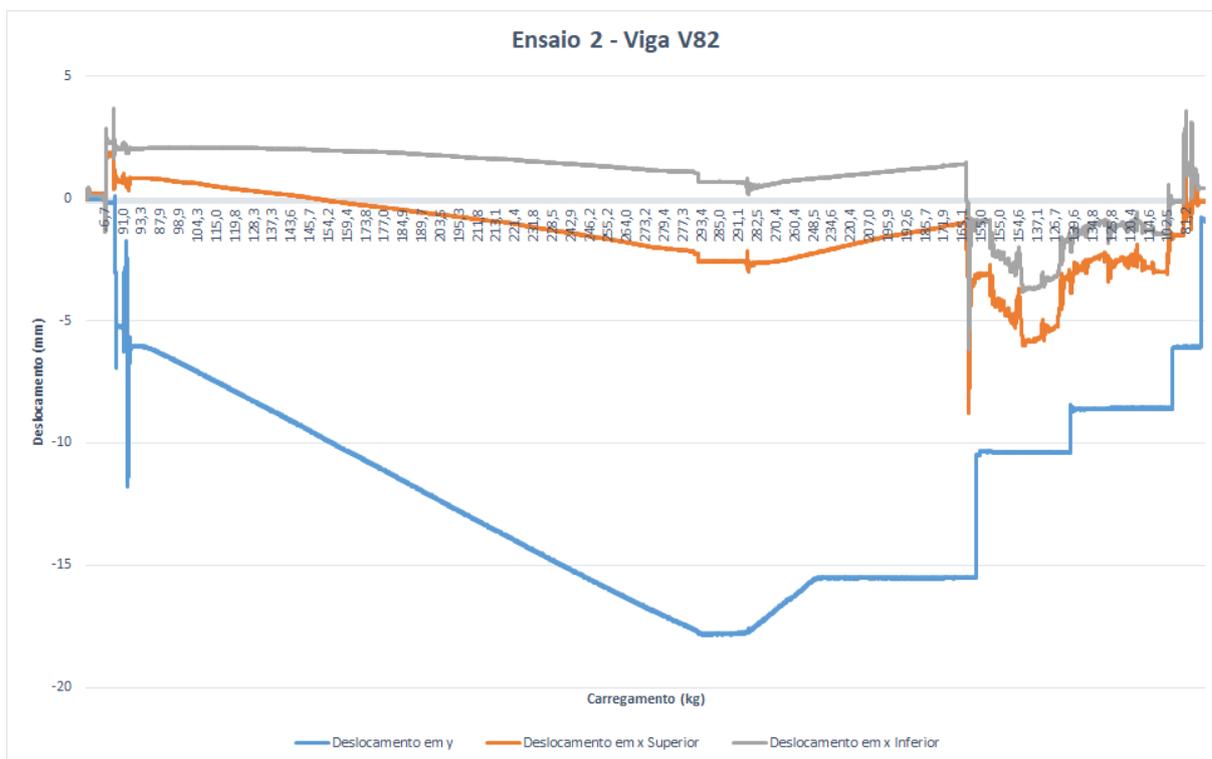


Figura 76: Ensaio 3 da Viga V82 – Relação deslocamentos x carregamento.

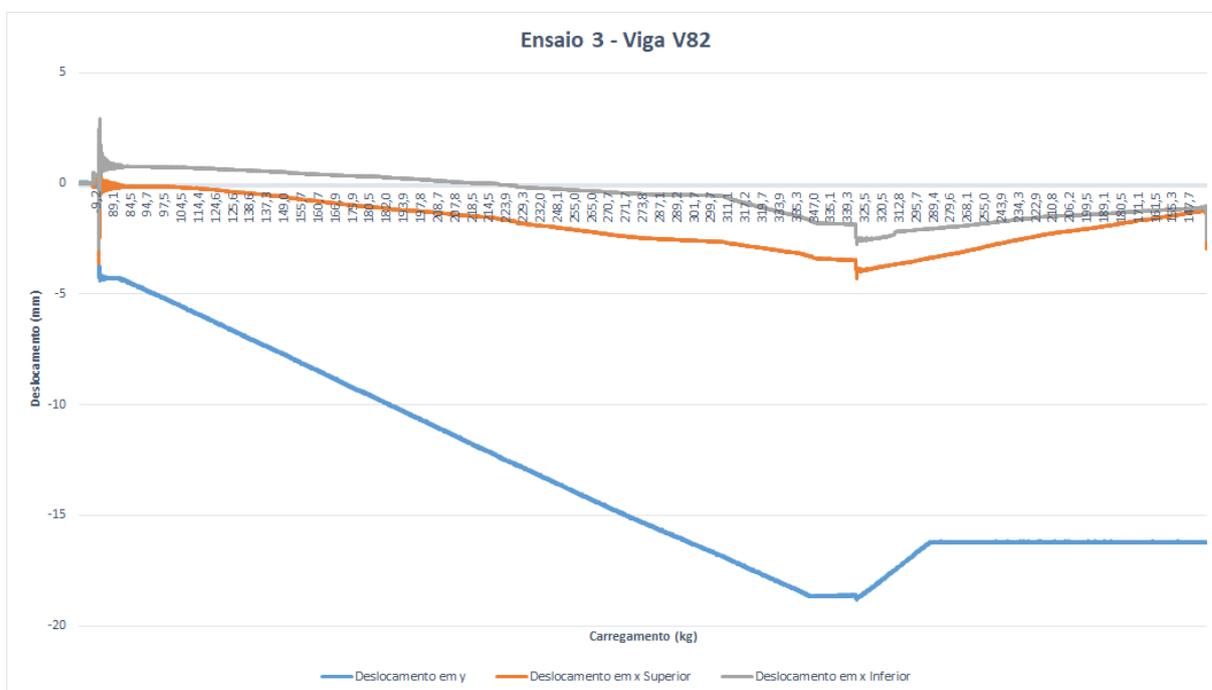


Figura 77: Ensaio 1 da Viga V83 – Relação deslocamentos x carregamento.

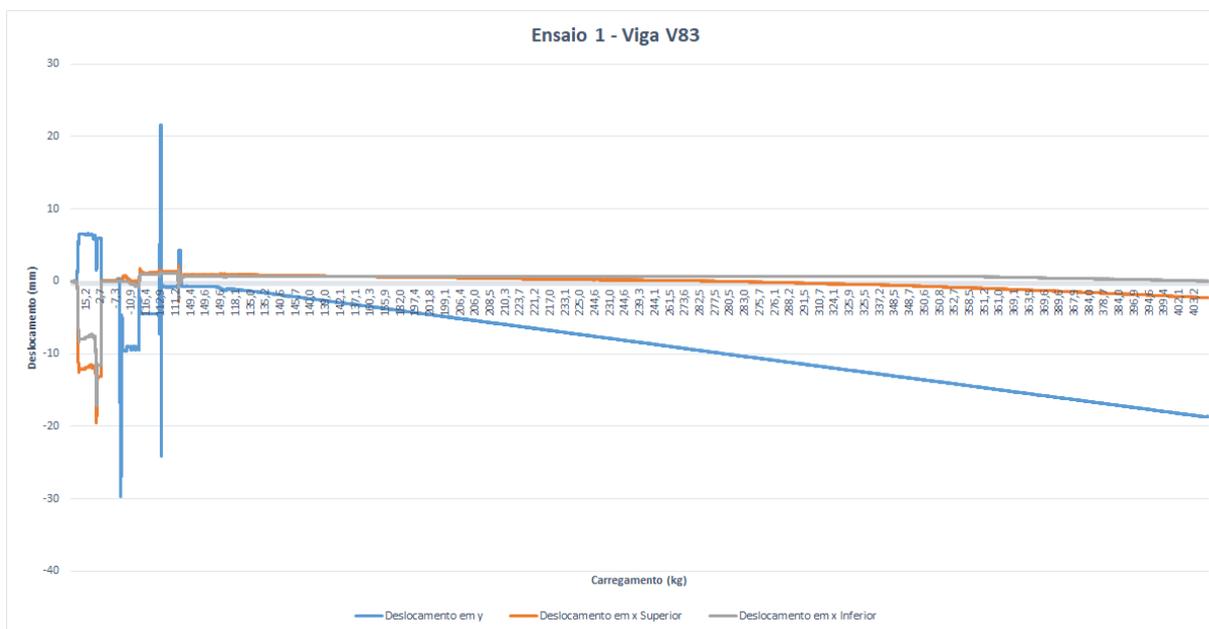


Figura 78: Ensaio 2 da Viga V83 – Relação deslocamentos x carregamento.

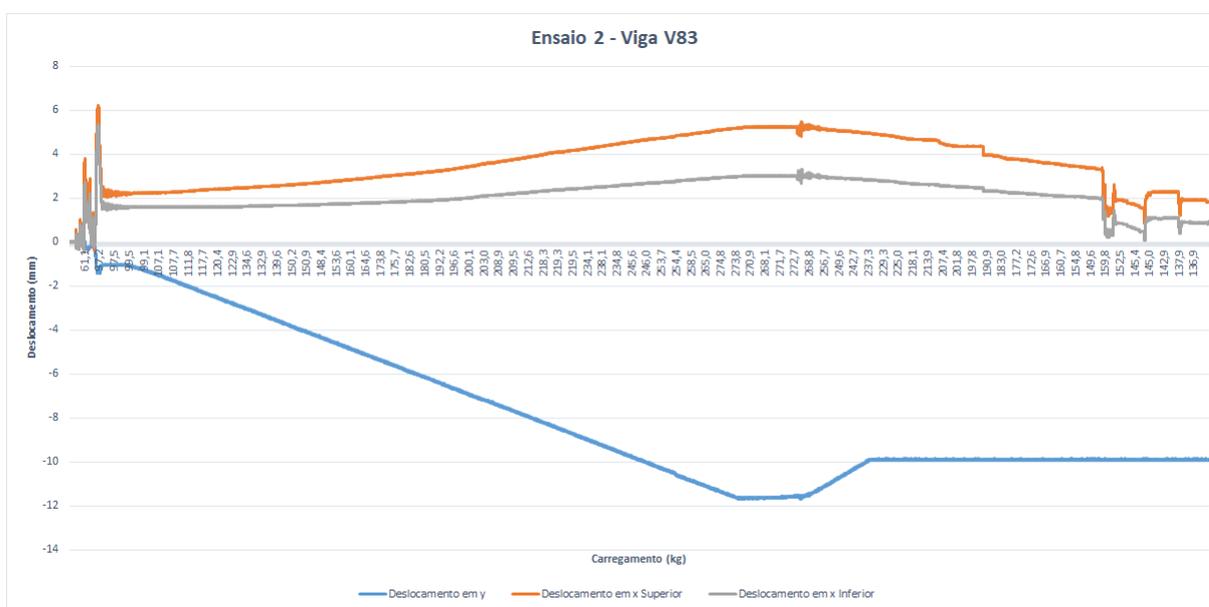


Figura 79: Ensaio 3 da Viga V83 – Relação deslocamentos x carregamento.

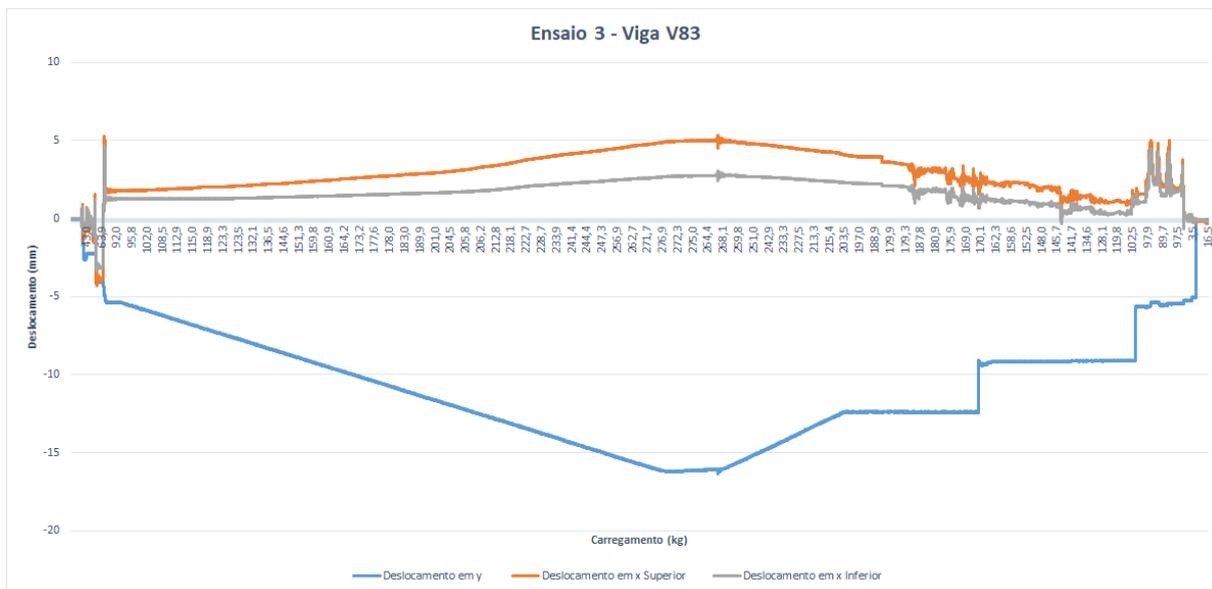


Figura 80: Ensaio 1 da Viga V101 – Relação deslocamentos x carregamento.

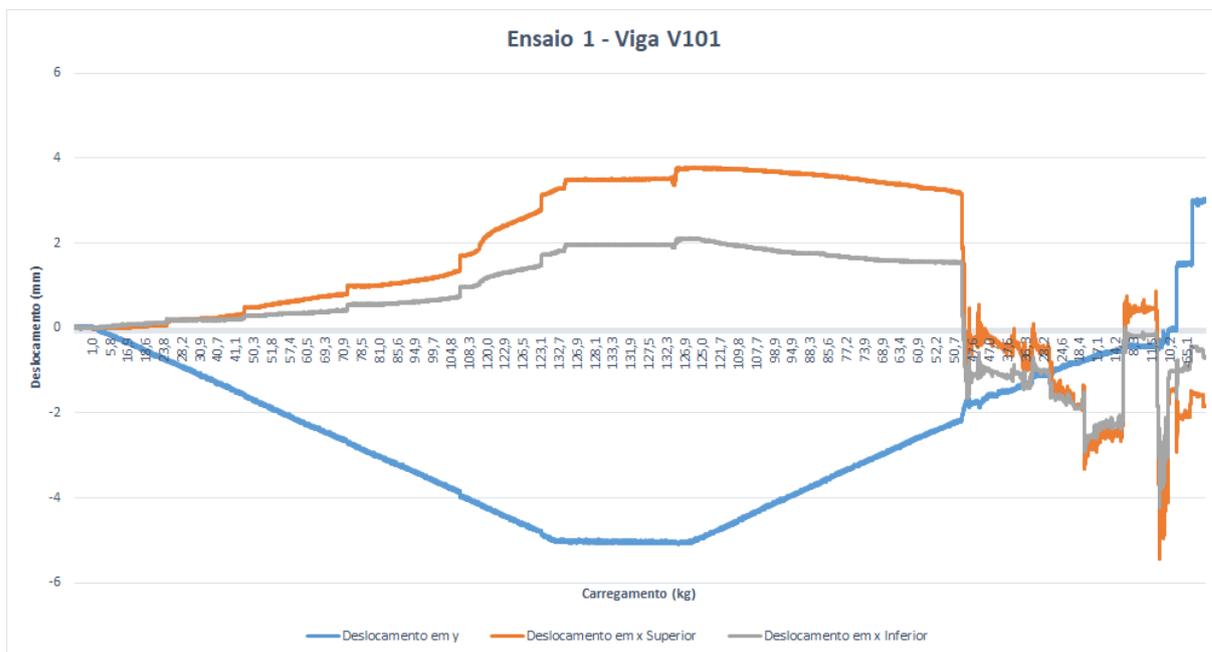


Figura 81: Ensaio 2 da Viga V101 – Relação deslocamentos x carregamento.

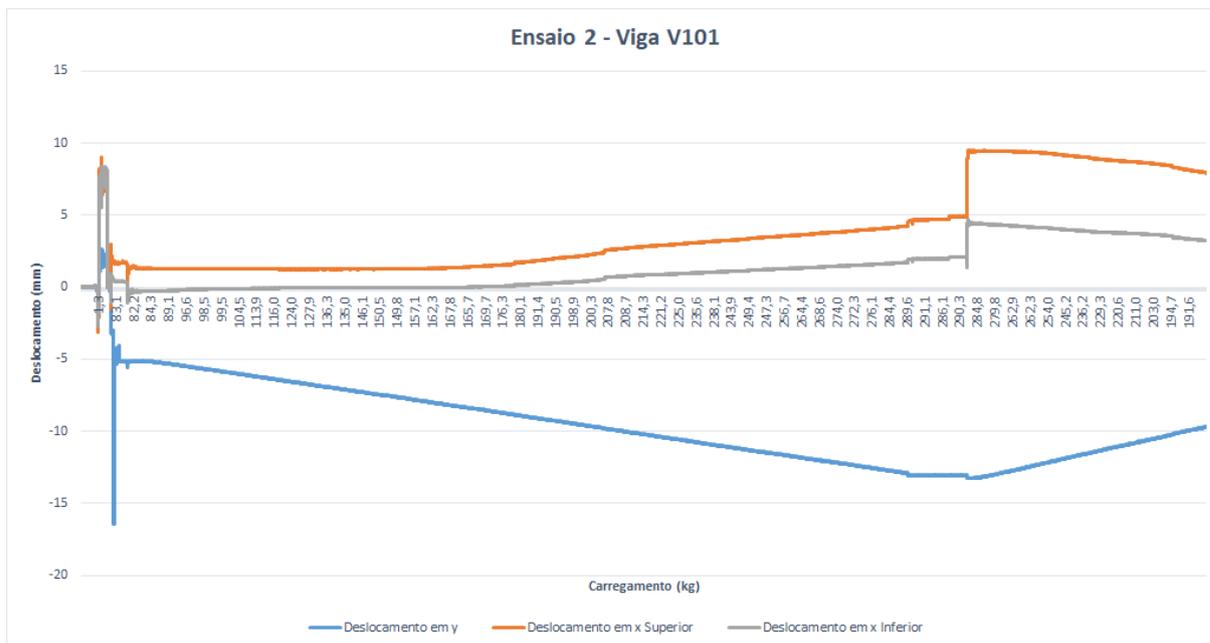


Figura 82: Ensaio 3 da Viga V101 – Relação deslocamentos x carregamento.

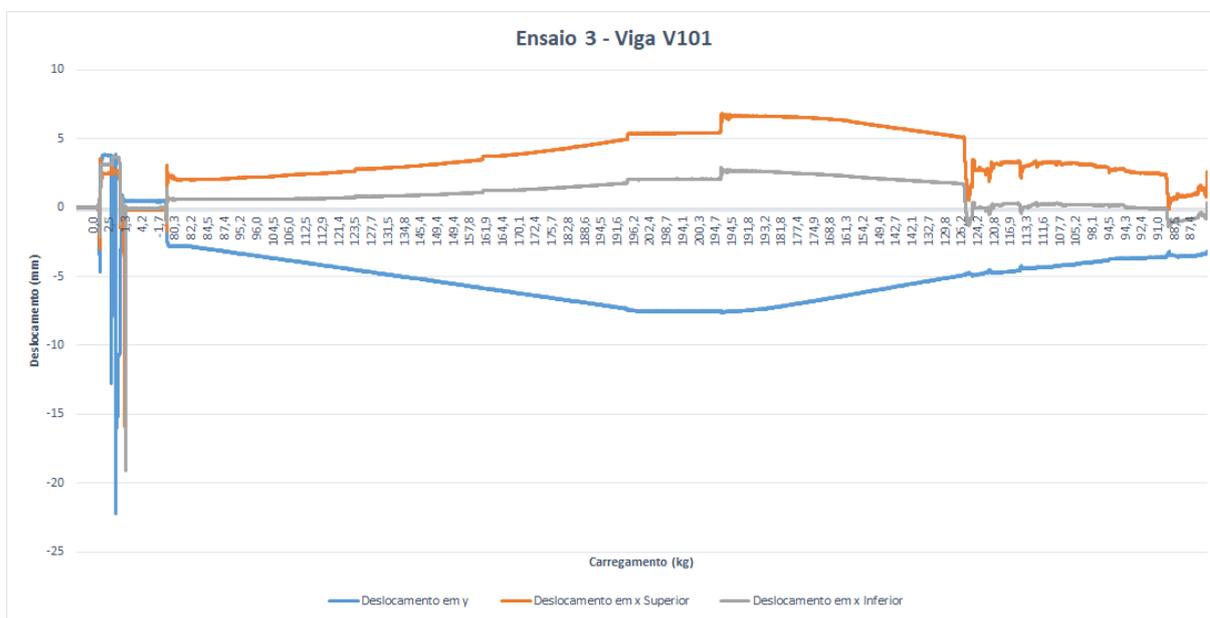


Figura 83: Ensaio 1 da Viga V102 – Relação deslocamentos x carregamento.

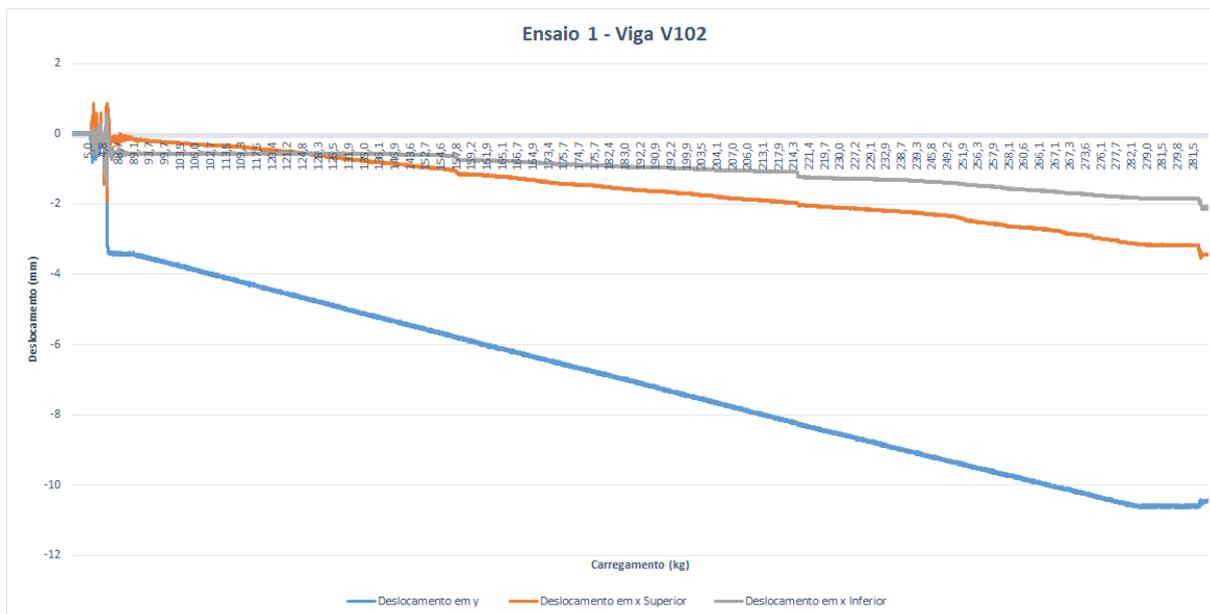


Figura 84: Ensaio 2 da Viga V102 – Relação deslocamentos x carregamento.

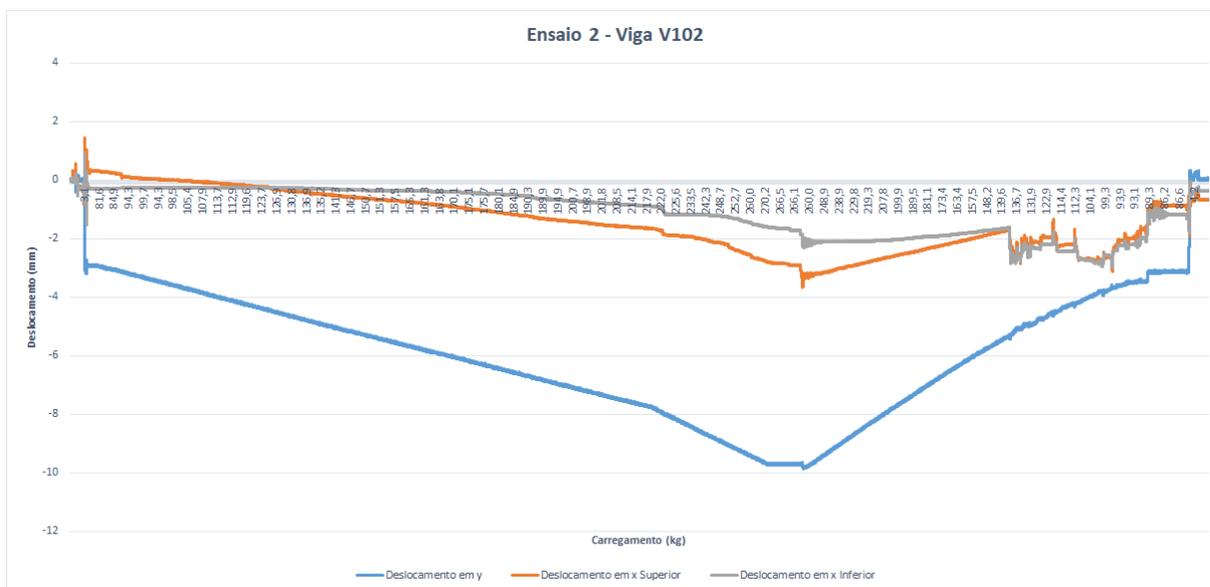


Figura 85: Ensaio 3 da Viga V102 – Relação deslocamentos x carregamento.

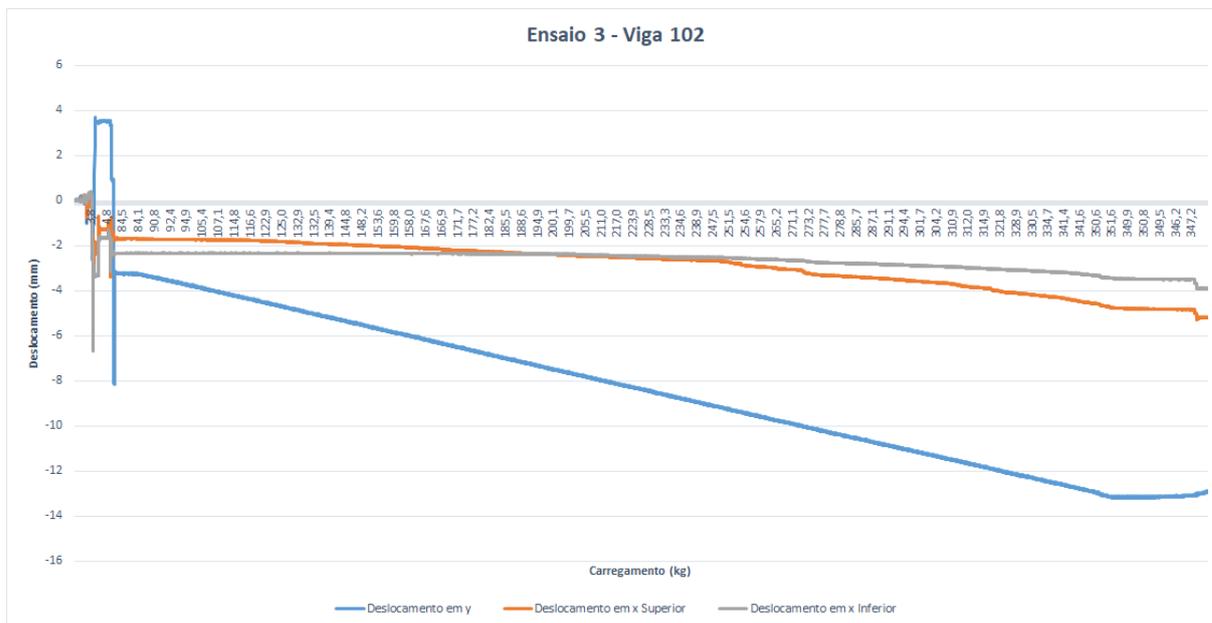


Figura 86: Ensaio 1 da Viga V103 – Relação deslocamentos x carregamento.

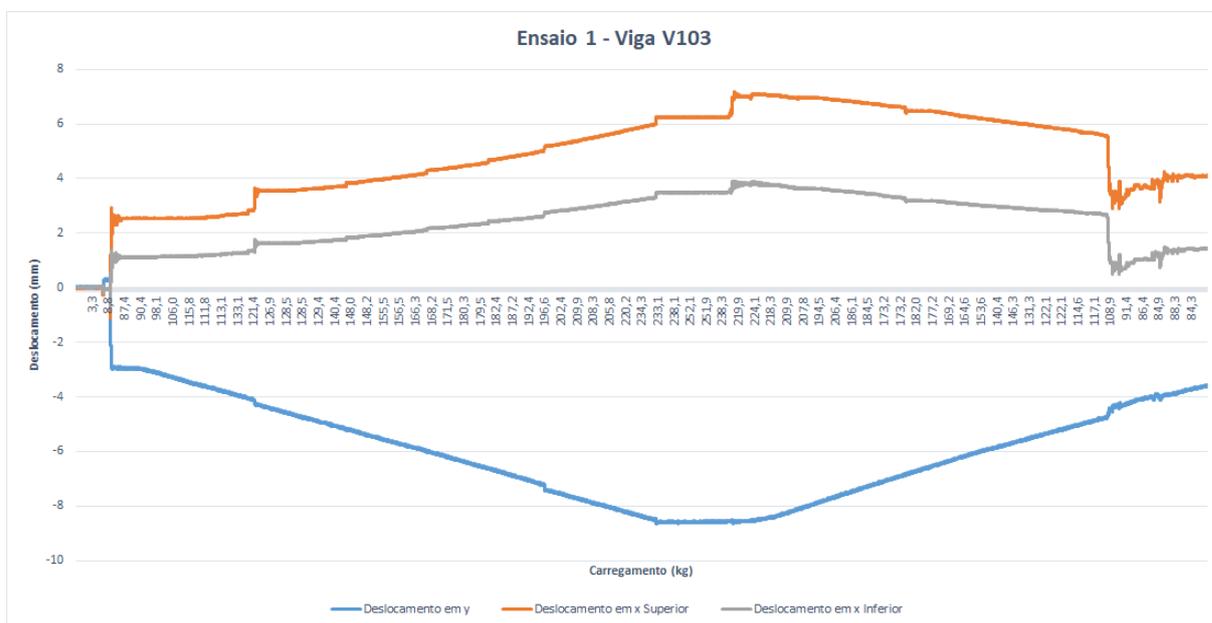


Figura 87: Ensaio 2 da Viga V103 – Relação deslocamentos x carregamento.

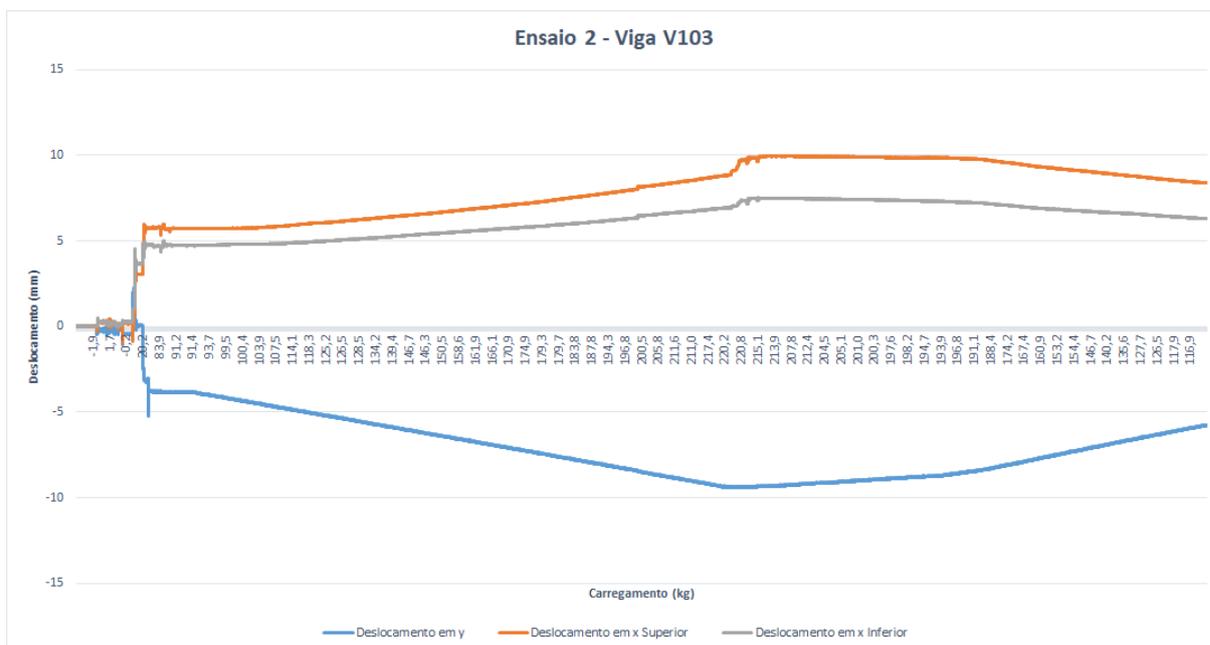


Figura 88: Ensaio 3 da Viga V103 – Relação deslocamentos x carregamento.

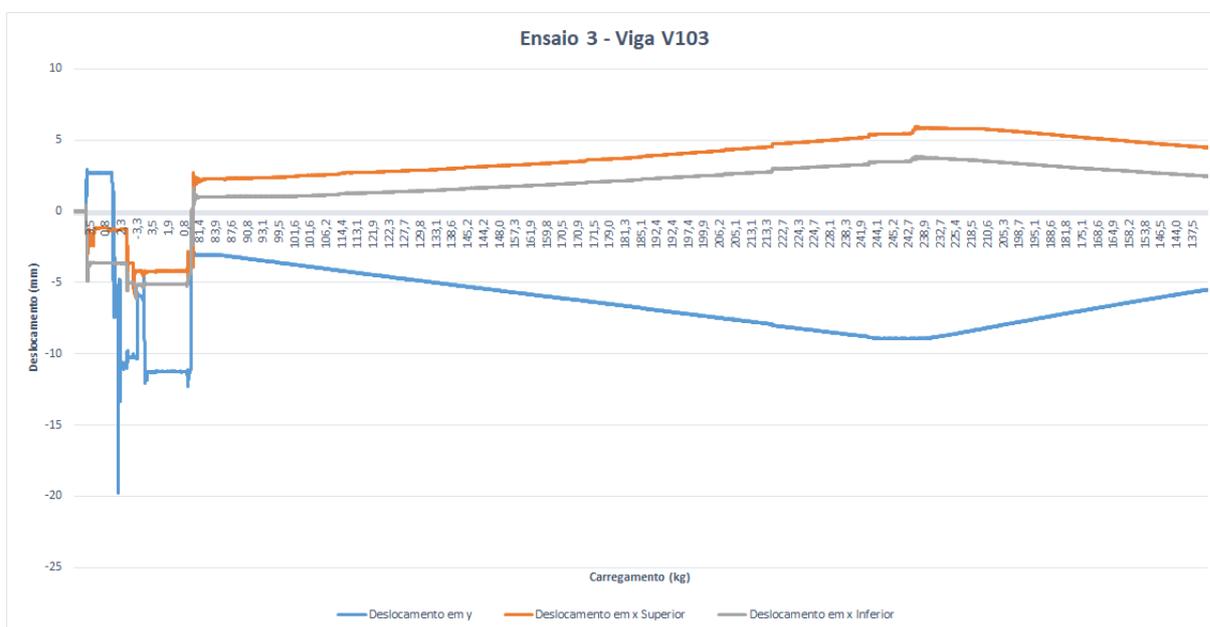


Figura 89: Ensaio 1 da Viga V121 – Relação deslocamentos x carregamento.

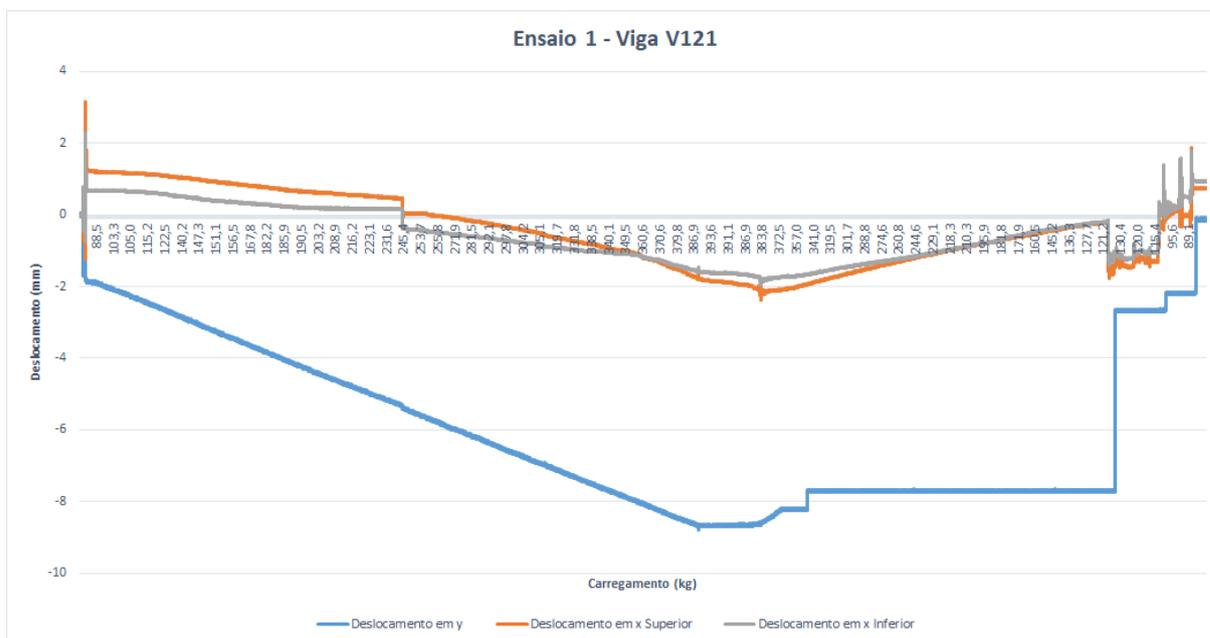


Figura 90: Ensaio 2 da Viga V121 – Relação deslocamentos x carregamento.

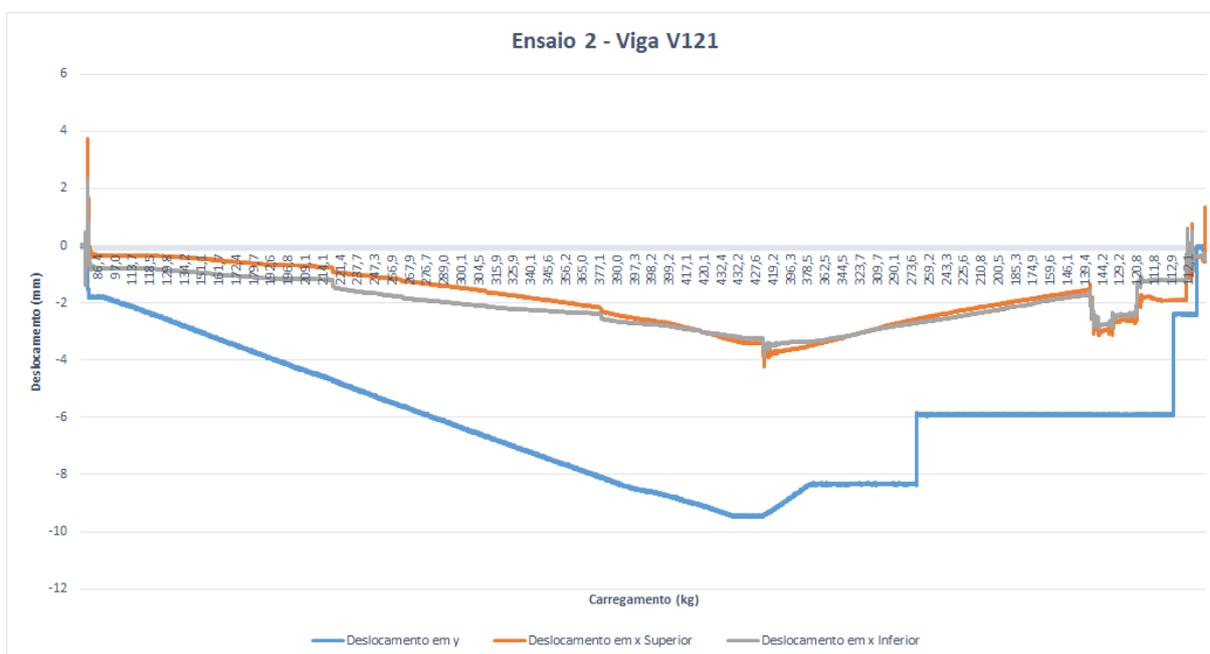


Figura 91: Ensaio 3 da Viga V121 – Relação deslocamentos x carregamento.

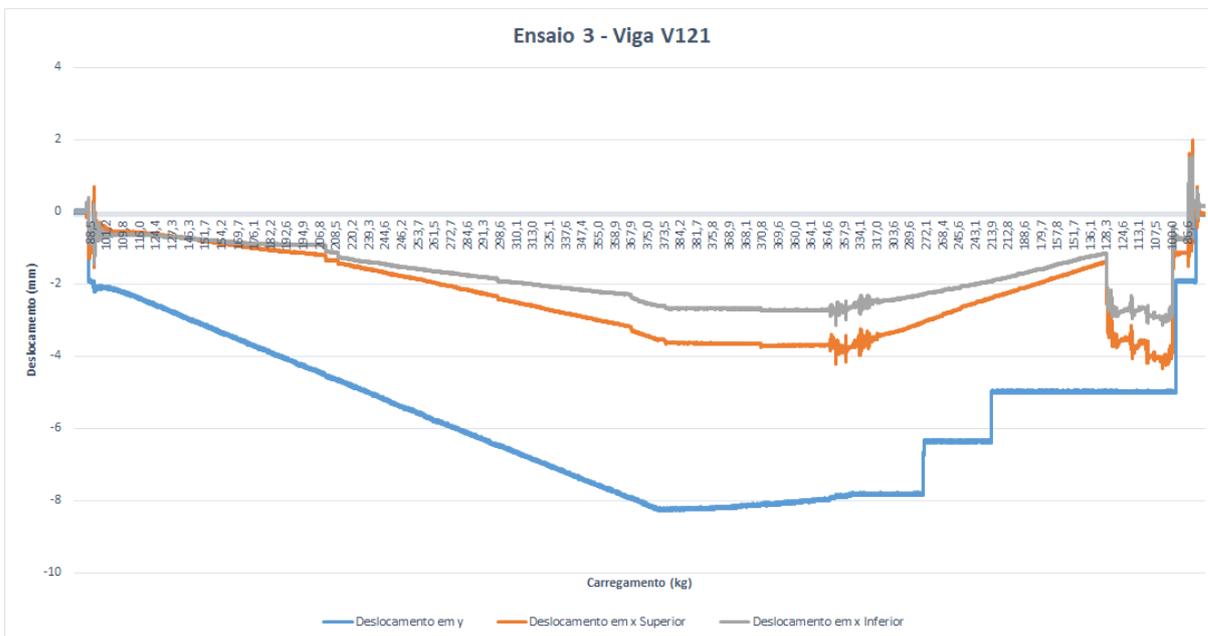


Figura 92: Ensaio 1 da Viga V122 – Relação deslocamentos x carregamento.

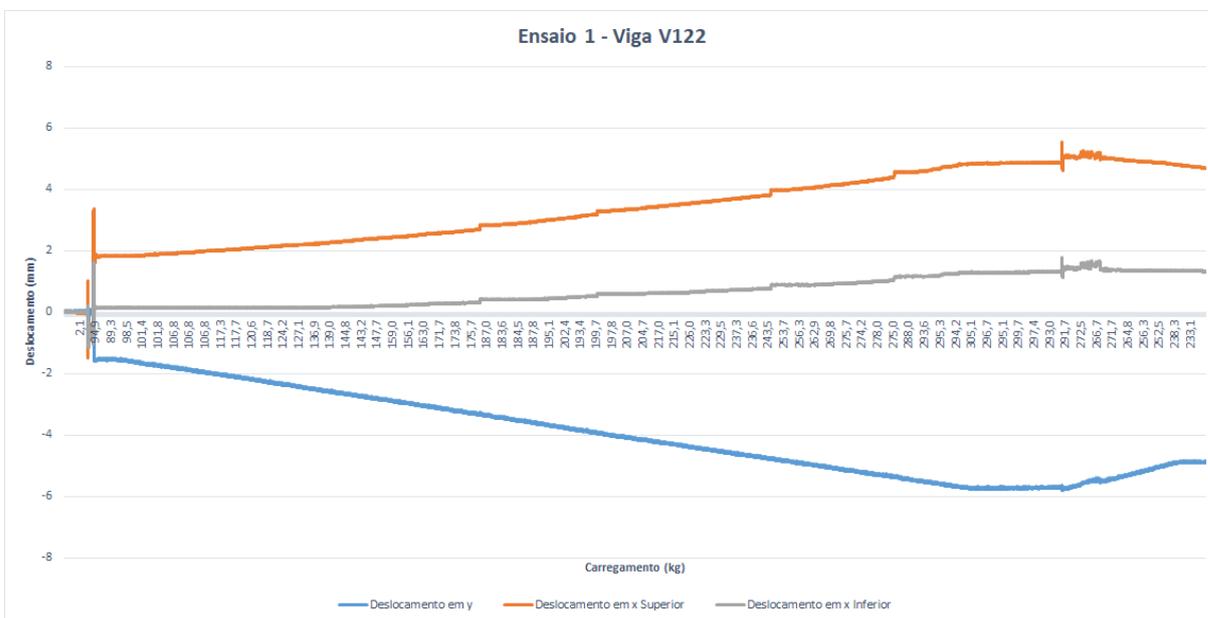


Figura 93: Ensaio 2 da Viga V122 – Relação deslocamentos x carregamento.

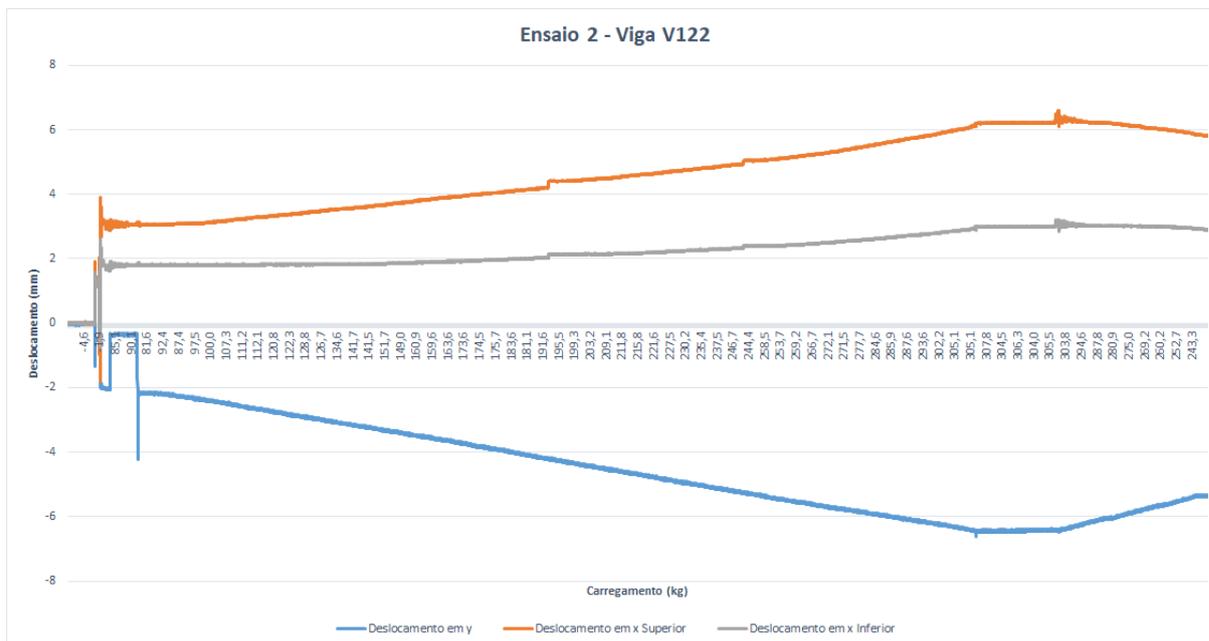


Figura 94: Ensaio 3 da Viga V122 – Relação deslocamentos x carregamento.

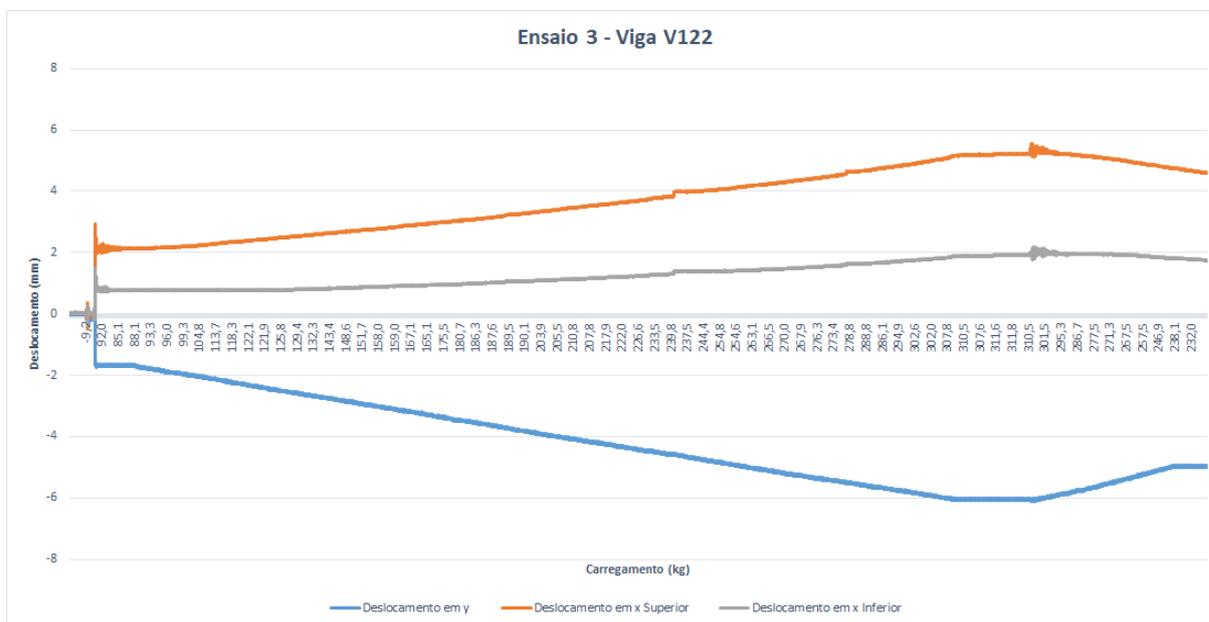


Figura 95: Ensaio 1 da Viga V123 – Relação deslocamentos x carregamento.

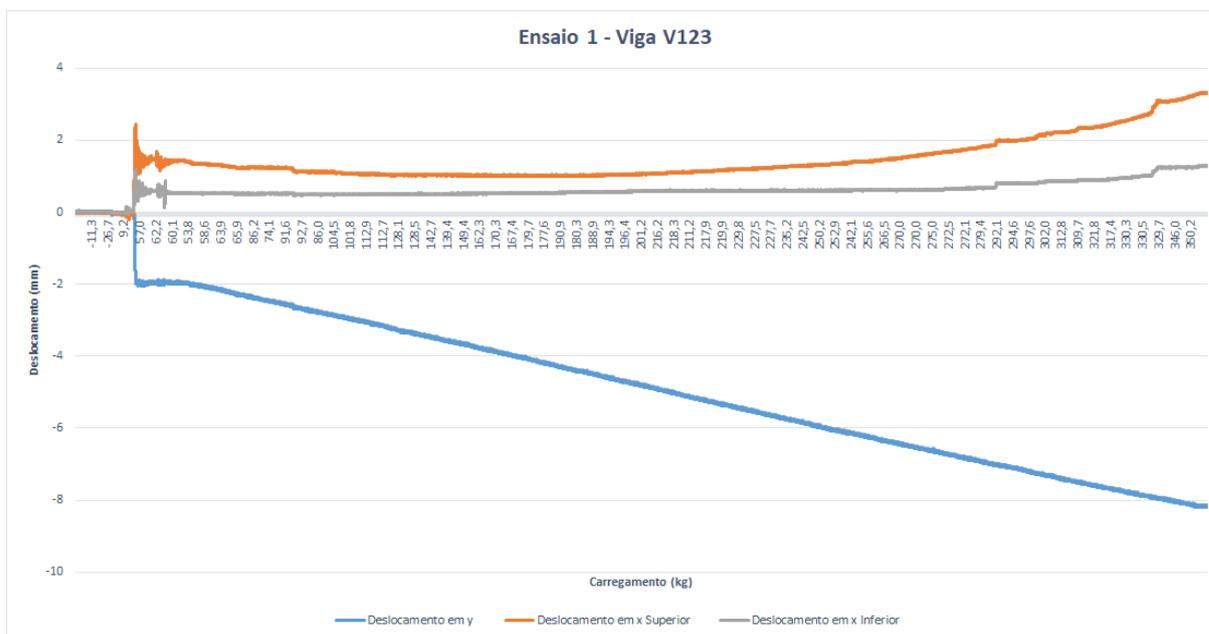


Figura 96: Ensaio 2 da Viga V123 – Relação deslocamentos x carregamento.

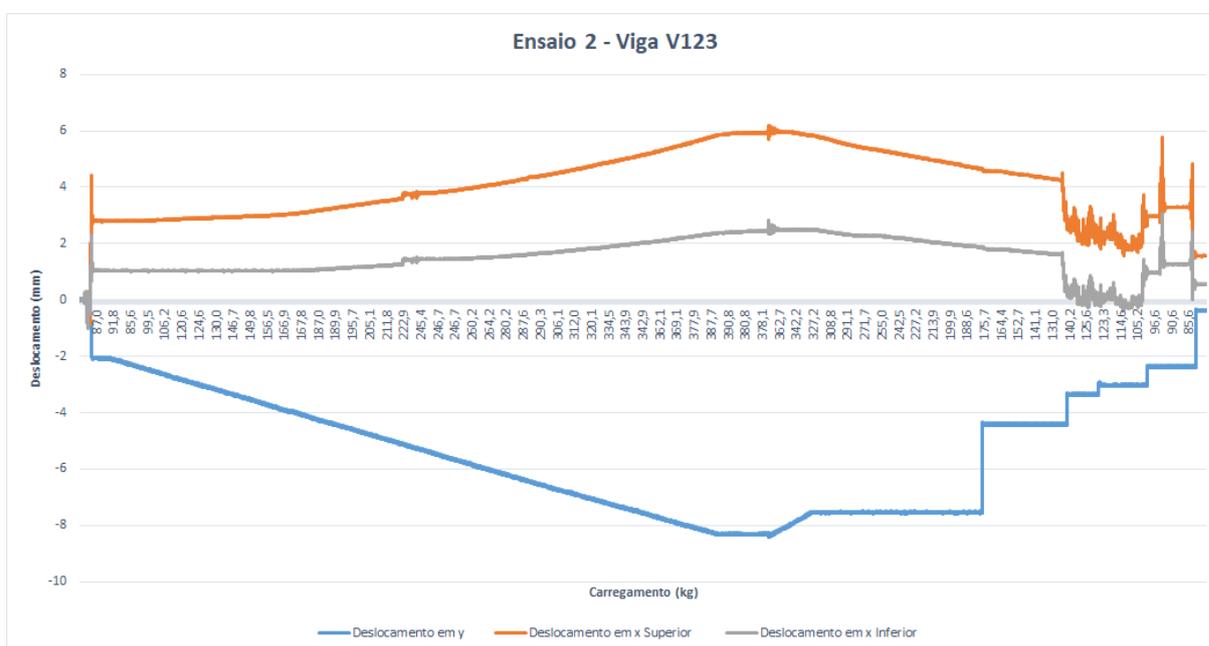
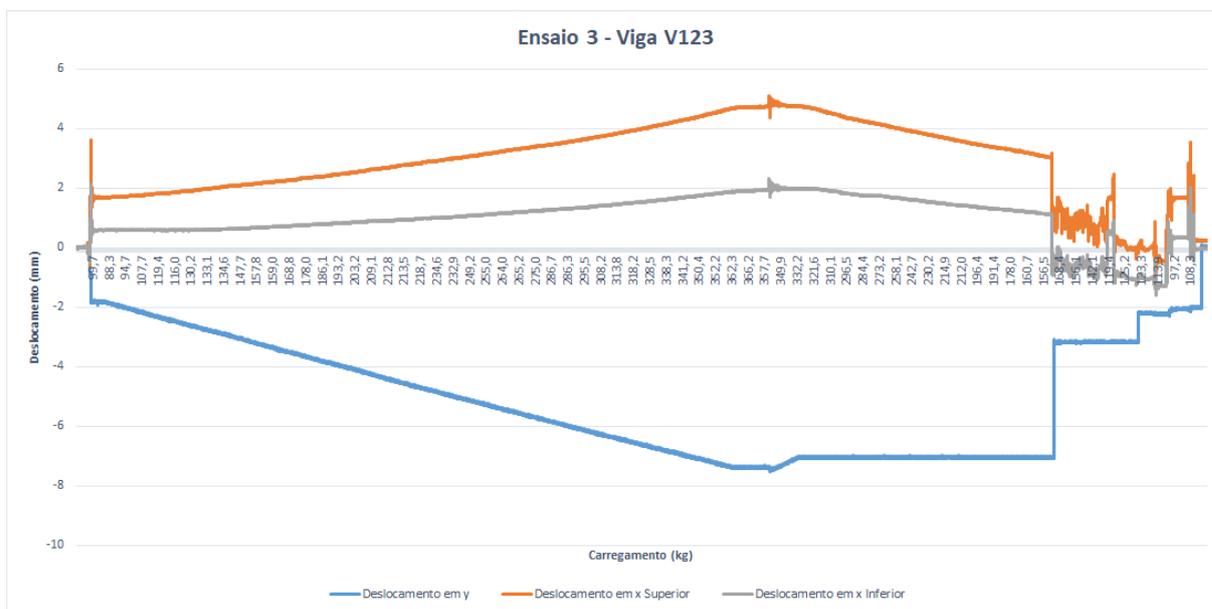
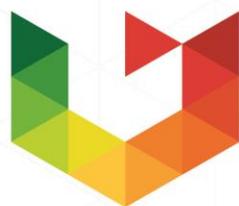


Figura 97: Ensaio 3 da Viga V123 – Relação deslocamentos x carregamento.





# UPF

UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)