



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

BRUNO FAZENDEIRO DONADON

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
VIGAS LAMELADAS COLADAS DE MADEIRA
REFORÇADAS COM FIBRAS SINTÉTICAS E
NATURAIS**

CAMPINAS
2024

BRUNO FAZENDEIRO DONADON

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
VIGAS LAMELADAS COLADAS DE MADEIRA
REFORÇADAS COM FIBRAS SINTÉTICAS E
NATURAIS**

Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil na área de Estruturas e Geotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO DE TESE APRESENTADA PELO ALUNO BRUNO FAZENDEIRO DONADON E ORIENTADO PELO PROF. DR. NILSON TADEU MASCIA.

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

D714a Donadon, Bruno Fazendeiro, 1985-
Análise do comportamento mecânico de vigas lameladas coladas de madeira reforçadas com fibras sintéticas e naturais / Bruno Fazendeiro Donadon. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador(es): Nilson Tadeu Mascia.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Reforço de fibras. 2. Madeira engenheirada. 3. Vigas de madeira. 4. Método dos elementos finitos. 5. Madeira - Tecnologia. I. Mascia, Nilson Tadeu, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações complementares

Título em outro idioma: Analysis of the mechanical behavior of glued laminated timber beams reinforced with synthetic and natural fibers

Palavras-chave em inglês:

Fiber reinforcement

Engineered wood

Wooden beams

Finite element method

Wood - Technology

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Nilson Tadeu Mascia [Orientador]

Armando Lopes Moreno Junior

Leandro Mouta Trautwein

Francisco Antonio Rocco Lahr

Leandro Vanalli

Data de defesa: 21-11-2024

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8082-3506>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/9631131090209916>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS
LAMELADAS COLADAS DE MADEIRA REFORÇADAS COM
FIBRAS SINTÉTICAS E NATURAIS**

Bruno Fazendeiro Donadon

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia
Presidente e Orientador/ FECFAU/ UNICAMP**

**Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior
FECFAU/ UNICAMP**

**Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein
FECFAU/ UNICAMP**

**Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr
Universidade de São Paulo**

**Prof. Dr. Leandro Vanalli
Universidade Estadual de Maringá**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 21 de novembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Nilson Tadeu Mascia pela oportunidade de realizar este trabalho, por toda orientação, paciência e incentivo durante o curso de pós-graduação.

Agradeço à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp por disponibilizar os laboratórios e equipamentos necessários para a realização desta pesquisa.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Estruturas por me acompanharem e auxiliarem durante a realização dos ensaios.

Agradeço à equipe do laboratório da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, em especial aos Prof. Dr. Julio Soriano e Prof.^a Dr.^a Raquel Gonçalves por nos receber e ajudar com os ensaios de cisalhamento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço à empresa Kuraray e seus representantes pelo suprimento de fibras Vectran utilizados nesta tese.

Agradeço a minha família por todo o carinho, apoio e incentivo durante a jornada de estudos.

Aos meus amigos e, especialmente, ao Renato, Alexia e Ramon deixo aqui meus sinceros agradecimentos pelos diversos momentos vividos e por todo o apoio que recebi.

RESUMO

A busca por materiais com alto desempenho mecânico, renováveis e ecologicamente amigáveis tem influenciado o campo da construção civil, de forma que pesquisadores têm desenvolvido novos materiais e novas técnicas construtivas, seguindo esses ideais ou concepções. Uma das linhas de pesquisa consoante com essas diretrizes é a utilização de polímeros reforçados com fibras, sejam naturais ou sintéticas, aplicados em elementos estruturais, formando, desse modo, um compósito. A aplicação desse compósito pode ser implementada em elementos estruturais com o objetivo de recuperação mecânica ou na concepção do projeto, com vistas a um ganho de rigidez ou prevenção de ruptura frágil. Nessa linha de pesquisa, este trabalho visa avaliar o desempenho mecânico de polímeros reforçados com fibras naturais de Curauá e Sisal e sintéticas de Vectran, aplicadas separadamente em vigas de madeira lameladas coladas (MLC). Foram realizadas simulações numéricas em *softwares* comerciais para validação dos resultados advindos do programa experimental. A partir da análise dos resultados obtidos pode-se inferir que o modelo numérico desenvolvido convergiu, de maneira satisfatória, para os dados experimentais. No entanto, a interferência observada nesta análise sugere que ainda existem fatores não completamente capturados pelo modelo numérico, o que limita a sua eficácia na predição do comportamento mecânico de vigas reforçadas com fibras. Conclui-se que as fibras naturais apresentam um desempenho mecânico elevado, mas os adesivos usualmente empregados para a colagem de MLC não foram totalmente eficazes para garantir a aderência do reforço à viga. Porém, as fibras sintéticas de Vectran demonstraram ser eficientes, e quando usadas como reforço estrutural, o desempenho das vigas pode ser promissor desde que haja uma boa aderência, embora, nesta pesquisa, os adesivos usuais de MLC não apresentaram eficiência no reforço quando comparado ao adesivo epóxi. Esses achados indicam a necessidade de novos estudos focados em otimizar o uso das fibras sintéticas de Vectran, visando explorar plenamente suas capacidades como reforço, enquanto se buscam alternativas para melhorar a eficiência de fibras naturais como o Sisal e o Curauá.

Palavras-chave: Madeira lamelada colada, Reforço estrutural, Fibras, Madeira Engenheirada, Análise experimental.

ABSTRACT

The search for high performance, renewable and ecological materials has influenced the field of construction, leading researchers to develop new materials and new constructive techniques following these ideals or conceptions. One of the lines of research following such directions is the use of natural or synthetic fiber-reinforced polymers in structural elements forming, thus, a composite. The application of this composite can be implemented in elements in order to mechanically recover them or to design of the project with stiffness gain or prevent brittle failure. In this line of research, this work aims to evaluate the mechanical performance of reinforced polymers with natural fiber of Curauá and Sisal and synthetics Vectran fibers, applied separately in glued laminated timber beams. Numerical simulations were performed using commercial software to validate the results obtained from the experimental program. From the analysis of the results, it can be inferred that the developed numerical model satisfactorily converged with the experimental data. However, the interference observed in this analysis suggests that there are still factors not fully captured by the numerical model, which limits its effectiveness in predicting the mechanical behavior of fiber-reinforced beams. It was concluded that natural fibers exhibit high mechanical performance, but the adhesives usually employed in GLT (Glued Laminated Timber) bonding were not entirely effective in ensuring the adhesion of the reinforcement to the beam. On the other hand, the synthetic Vectran fibers proved to be efficient, and when used as structural reinforcement, the performance of the beams can be promising with good adhesion, although, in this research, the usual GLT adhesives did not show effectiveness in reinforcement when compared to epoxy adhesive. These findings indicate the need for further studies focused on optimizing the use of synthetic Vectran fibers, aiming to fully exploit their capabilities as reinforcement, while exploring alternatives to improve the efficiency of natural fibers like Sisal and Curauá.

Key words: Glued laminated timber, Structural reinforcement, Fibers, Engineered wood, Experimental analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Madeira como material antigo exemplificada por meio do Templo budista Hōryū Gakumonji construído em madeira no ano 607 no Japão ainda em pé	22
Figura 2 – Rolas de filamento das fibras Vectran e a demonstração de produtos com a aplicação das fibras em sua composição	25
Figura 3 – Configuração de lamelas, adesivos e reforço de fibras das vigas	34
Figura 4 – Malha de fibra Vectran HT com gramatura de 408g/m ²	35
Figura 5 – Malha de fibra de Sisal com gramatura de 1393 g/m ²	35
Figura 6 – Aglomerado de fibra de Curauá com adesivo EPI	36
Figura 7 – Esquema de ensaio de 3 pontos com medidas em centímetros	38
Figura 8 – Ensaio de três pontos realizado no laboratório em viga MLC	39
Figura 9 – Esquema de ensaio com quatro pontos e medidas em centímetros	39
Figura 10 – Ensaio de quatro pontos realizado no laboratório em vigas MLC	40
Figura 11 – Detalhe dos apoios móvel e fixo, respectivamente, utilizados nos ensaios de flexão das vigas	40
Figura 12 – Detalhe do garfo enrijecedor para impedir a perda de estabilidade lateral	41
Figura 13 – Detalhe da viga posicionada para ensaio mostrando a célula de força apoiada sobre uma rótula e os medidores de deslocamento vertical LVDT	42
Figura 14 – Detalhamento do esquema de extensômetros utilizado nos ensaios de flexão de vigas. Figura ilustrativa da montagem na viga	44
Figura 15 – Aquisitor de dados utilizados para captar os sinais dos sensores e converter os dados	44
Figura 16 – Comportamento da curva de força por deslocamento à flexão considerando regime elástico e plástico	47
Figura 17 – Diagrama de cortante e de momento fletor em sistema de flexão a quatro pontos biapoiado	48
Figura 18 – Ensaio de compressão em execução	49
Figura 19 – Ensaio de Flexão de três pontos em amostra extraída de viga	50
Figura 20 – Corpo de Prova para ensaio de cisalhamento Padrão ABNT com dimensões em cm	51
Figura 21 – Corpos de prova de Cisalhamento padrão NBR7190 (ABNT, 1997)	52
Figura 22 – Ensaio de cisalhamento em corpo de prova por meio do uso do acessório EMIC para ensaio	53

Figura 23 – Modelo numérico com aplicação do reforço entre as últimas lamelas de madeira	54
Figura 24 – Modelo numérico sem a presença do reforço	55
Figura 25 – Arvore de comando do Ansys com quatro regiões de contato identificadas	55
Figura 26 – Condições de contorno utilizadas nos modelos com e sem reforço de fibras	57
Figura 27 – Representação da medida do parâmetro <i>element quality</i>	57
Figura 28 – Padrão de identificação adotado para os corpos de prova	60
Figura 29 – Valores médios e variabilidade das resistências ao cisalhamento dos corpos de prova	63
Figura 30 – Resultados de força por deslocamento de corpos de prova retirados das vigas com reforço de Vectran submetidos à flexão	65
Figura 31 – Resultados de força por deslocamento de corpos de prova retirados das vigas com reforço de Curauá submetidos à flexão	65
Figura 32 – Resultados de força por deslocamento de corpos de prova retirados das vigas com reforço de Sisal submetidos à flexão	66
Figura 33 – Dados de carregamento e deslocamentos obtidos no ensaio de flexão a três e quatro pontos na viga VSR1	68
Figura 34 – Dados de carregamento e deslocamentos obtidos no ensaio de flexão a quatro pontos na viga VSR2	68
Figura 35 – Dados de carregamento e deslocamentos obtidos no ensaio de flexão a três pontos na viga VSR3	69
Figura 36 – Modo de ruptura da viga sem reforço VSR2	71
Figura 37 – Modo de ruptura da viga sem reforço VSR3	72
Figura 38 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Vectran VEC1	73
Figura 39 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Vectran VEC2	73
Figura 40 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Vectran VEC3	74
Figura 41 – Comparação dos ensaios de flexão da vigas reforçadas com Vectran frente aos resultados das vigas sem reforço	76
Figura 42 – Viga VEC1 em seu estado de ruptura	77
Figura 43 – Viga VEC 2 em seu estado de ruptura	78
Figura 44 – Viga VEC3 em seu estado de ruptura	78

Figura 45 – Resultados de deslocamento por carregamento por meio da análise de extensometria e transdutores de deslocamento da viga VEC1	79
Figura 46 – Resultados de deslocamento por carregamento por meio da análise de extensometria e transdutores de deslocamento da viga VEC2	80
Figura 47 – Resultados de deslocamento por carregamento por meio da análise de extensometria e transdutores de deslocamento da viga VEC2	80
Figura 48 – Deformações medidas no sentido axial ao longo do perfil da viga VEC1.....	82
Figura 49 – Deformações medidas no sentido axial ao longo do perfil da viga VEC2.....	82
Figura 50 – Deformações medidas no sentido axial ao longo do perfil da viga VEC3.....	83
Figura 51 – Tensões normais estimadas ao longo do perfil da viga VEC1	84
Figura 52 – Tensões normais estimadas ao longo do perfil da viga VEC2.....	85
Figura 53 – Tensões normais estimadas ao longo do perfil da viga VEC3.....	85
Figura 54 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga CUR1 reforçada com Curauá	86
Figura 55 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga CUR2 reforçada com Curauá	87
Figura 56 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga CUR3 reforçada com Curauá	87
Figura 57 – Região do reforço da viga reforçada CUR1 após ruptura	89
Figura 58 – Região do reforço da viga reforçada CUR2 após ruptura	90
Figura 59 – Região do reforço da viga reforçada CUR3 após ruptura	90
Figura 60 – Deslocamento no meio do vão do ensaio de flexão de vigas com reforço de Curauá e Sem reforço	91
Figura 61 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Sisal SIS1.....	92
Figura 62 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Sisal SIS2.....	93
Figura 63 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Sisal SIS3.....	93
Figura 64 – Viga reforçada com Sisal SIS1 após a ruptura em ensaio de flexão a três pontos	95
Figura 65 – Detalhe da fratura de predominância de tração ocorrida na viga reforçada com Sisal SIS1.....	96
Figura 66 – Detalhe do deslocamento do reforço após ruptura da viga reforçada com Sisal SIS1	96

Figura 67 – Viga reforçada com Sisal SIS2 com ruptura inicial da lamela inferior.....	97
Figura 68 – Viga reforçada com Sisal SIS2 na segunda ruptura com colapso do elemento	97
Figura 69 – Deslocamento do reforço da viga reforçada com Sisal SIS2	98
Figura 70 – Viga reforçada com Sisal SIS3 após ruptura com fratura por toda seção.....	98
Figura 71 – Comparação dos ensaios de flexão da vigas reforçadas com Sisal frente aos resultados das vigas sem reforço	99
Figura 72 – VSR1 experimental e numérico	103
Figura 73 – VSR2 comparada com sua simulação numérica	104
Figura 74 – VSR3 comparada com sua simulação numérica	104
Figura 75 – Tensões normais atuantes (MPa) na região Lsup do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC1	106
Figura 76 – Tensões normais atuantes (MPa) nas fibras Vectran do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC1	108
Figura 77 – Tensões normais atuantes (MPa) na região Linf do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC1	108
Figura 78 – Curvas de deslocamento por carregamento da série VEC1 apresentando os dados experimentais associados com os dados de deslocamento calculados via extensometria e os dados obtidos pela simulação numérica	109
Figura 79 – Tensões normais atuantes (MPa) na região Lsup do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC2	109
Figura 80 – Tensões normais atuantes (MPa) nas fibras Vectran do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC2	110
Figura 81 – Tensões normais atuantes (MPa) na região Linf do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC2	110
Figura 82 – Curvas de deslocamento por carregamento da série VEC2 apresentando os dados experimentais associados com os dados de deslocamento calculados via extensometria e os dados obtidos pela simulação numérica	111
Figura 83 – Tensões atuantes na região Lsup do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC3	111
Figura 84 – Tensões atuantes nas fibras Vectran do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC3	112
Figura 85 – Tensões atuantes na região Linf do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC3	112

Figura 86 – Curvas de deslocamento por carregamento da série VEC1 apresentando os dados experimentais associados com os dados de deslocamento calculados via extensometria e os dados obtidos pela simulação numérica	113
---	-----

LITA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das versões da fibra de LCP Vectran	25
Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas dos materiais comumente utilizados como reforço.....	26
Tabela 3 – Resumo de valores de diâmetros e propriedades mecânicas encontradas na literatura por Silva e Aquino (2008).....	27
Tabela 4 – Propriedades físicas das vigas	33
Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados para composição teórica do compósito	36
Tabela 6 – Tensões de cisalhamento em corpos de prova sem a presença do reforço	61
Tabela 7 – Dados obtidos com o ensaio de cisalhamento na linha de reforço de fibra dos corpos de prova.....	61
Tabela 8 – Dados de resistência e módulo de elasticidade, paralelo às fibras, obtidos por meio de ensaio padronizado de compressão.....	64
Tabela 9 – Resultados de módulo de elasticidade e resistência de corpos de prova de madeira <i>Pinus elliotti</i>	66
Tabela 10 – Resultados de rigidez obtidos nos ensaios de flexão das vigas sem reforço	70
Tabela 11 – Módulo de elasticidade médio e desvio padrão amostral da madeira em diferentes ensaios	70
Tabela 12 – Resistência última média e desvio padrão amostral da madeira em diferentes ensaios	71
Tabela 13 – Tabela resumo de dados de ruptura, resistência e rigidez, coletados nos ensaios de flexão das vigas reforçadas com Vectran	74
Tabela 14 – Valores comparativos de deslocamentos entre métodos de aquisição para as vigas reforçadas com Vectran.....	81
Tabela 15 – Resumo de resultados de ruptura, resistência e rigidez, coletados nos ensaios de flexão das vigas reforçadas com Curauá	88
Tabela 16 – Comparação dos valores de rigidez entre métodos de ensaio e vigas não reforçadas.....	89
Tabela 17 – Resumo de resultados de ruptura, resistência e rigidez, coletados nos ensaios de flexão das vigas reforçadas com Sisal	94
Tabela 18 – Fração dos volumes de fibra e adesivo utilizado no compósito e módulo de elasticidade calculado	100
Tabela 19 – Resultados do recurso <i>element quality</i> gerado pelo programa ANSYS	101

Tabela 20 – Resultados do teste de convergência de malha utilizando as variáveis de deformação e deslocamentos para as malhas de 20 mm, 10 mm e 5 mm	102
Tabela 21 – Módulo de elasticidade na fase elástica até 50% da tensão de ruptura e módulo secante utilizados na simulação das vigas sem reforço	103
Tabela 22 – Erro numérico experimental na fase elástica	105
Tabela 23 – Propriedades mecânicas de elasticidade para a fase elástica e módulo secante para a fase plástica do modelo bi-linear das vigas da série VEC	106
Tabela 24 – Dados comparativos das curvas experimental numérico e extensômetros relacionando força e deslocamento.....	113

LISTA DE SÍMBOLOS

A é a área da seção transversal do corpo de prova.

E é o módulo de elasticidade longitudinal obtido nos ensaios de caracterização da madeira.

E_{co} é o módulo de elasticidade da madeira na direção das fibras.

E_a é o módulo de elasticidade do adesivo.

E_c é o módulo de elasticidade do compósito.

E_f é o módulo de elasticidade da fibra.

EI é a rigidez global do elemento reforçado.

f_{v0} é a resistência ao cisalhamento atingido pelo corpo de prova.

f_i é a resistência última calculadas por diferentes ensaios.

f_{c0} é a resistência à compressão paralela as fibras.

f_M é a resistência convencional máxima de madeira submetida a um momento fletor.

$F_{c0,max}$ é a máxima força de compressão atingida no ensaio do corpo de prova.

$F_{v0,max}$ é a máxima força cortante atingida no ensaio do corpo de prova.

L é o comprimento do vão livre da viga ensaiada.

M_{max} é o máximo momento fletor atingido no ensaio.

V_a é o volume de adesivo calculado.

V_f é o volume de fibras calculado.

W_a é a massa de adesivo utilizada.

W_f é a massa de fibras utilizada.

W_e é o módulo de resistência elástico da seção transversal.

y_i é a distância do extensômetro escolhido até a linha neutra.

y_j é a distância entre os extensômetros nas posições i e j .

y_{ln} é a posição da linha neutra tomando como referência o topo da viga.

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	18
2.	Objetivos.....	21
2.1.	Objetivos específicos.....	21
3.	Revisão bibliográfica.....	22
3.1.	Madeira como material de construção.....	22
3.2.	Reforço polimérico de fibra (FRP).....	23
3.3.	Estudo da madeira com reforço.....	27
3.4.	Desempenho mecânico de madeira reforçada.....	30
3.5.	Resinas adesivas na MLC.....	31
4.	Materiais e métodos.....	33
4.1.	Materiais.....	33
4.2.	Metodologia.....	37
4.2.1.	Ensaio de Flexão em viga em escala real.....	37
4.2.1.1.	Extensometria.....	45
4.2.1.2.	Deslocamentos verticais via extensometria.....	45
4.2.1.3.	Análise de tensões via extensometria.....	46
4.2.1.4.	Módulo de elasticidade via extensometria.....	47
4.3.	Ensaio de Compressão.....	48
4.4.	Ensaio de flexão em corpos de prova.....	50
4.5.	Ensaio de cisalhamento.....	51
4.6.	Análise numérica.....	53
5.	Resultados e discussões.....	60
5.1.	Caracterização por cisalhamento.....	60
5.2.	Caracterização por compressão paralela às fibras.....	63
5.3.	Caracterização por flexão.....	64
5.4.	Ensaio de vigas em escala real.....	67
5.4.1.	Ensaio de flexão Vigas sem reforço.....	67
5.4.2.	Vigas reforçadas com Vectran.....	72
5.4.2.1.	Deslocamento via extensometria de vigas com Vectran.....	79
5.4.2.2.	Tensões e deformações para as vigas Vectran.....	81
5.4.3.	Vigas Reforçadas com Curauá.....	86
5.4.4.	Viga reforçada com Sisal.....	91

5.5.	Análise numérica	100
5.5.1.	Teste da malha	100
5.5.2.	Validação dos modelos	102
5.5.3.	Análise numérica de vigas com Vectran	106
6.	Conclusões.....	115
7.	Recomendação de trabalhos futuros	117
8.	Referencias	118
9.	ANEXO	124

1. Introdução

Em décadas recentes, o setor da construção está induzindo preocupações ambientais devido à exploração de recursos não renováveis, ao uso do solo, ao consumo de energia e aos impactos ambientais durante todo o ciclo de vida de uma edificação (MACIEL, 2020). Esse setor é responsável por mais de 40% do uso de energia primária (PE) e 24% das emissões de gases de efeito estufa em todo o mundo.

A redução das necessidades energéticas e a mitigação dos impactos ambientais no setor da construção tornaram-se alvos-chave das políticas energéticas em diferentes países. Esses objetivos devem ser alcançados por meio de estratégias que visam melhorar a eficiência energética, integração de tecnologias de energias renováveis nos edifícios, mitigação de impactos e uso de materiais e tecnologias de “baixo carbono” (HERNANDEZ *et al.*, 2019).

Nesse sentido, a utilização da madeira como material construtivo se mostra um grande aliado, pois a fabricação de produtos da construção baseados em madeira leva um baixo consumo energético, em comparação aos tradicionais materiais aço e concreto.

O homem, desde os tempos antigos, vem empregando diversos materiais em suas construções, sendo a madeira, entre outros materiais, um dos mais antigos empregados (RAMAGE *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2022), apresentando uma aplicabilidade universal. A madeira é amplamente utilizada em situações cotidianas, bem como ferramentas, construções temporárias e estruturas (VOLZ *et al.*, 2012). A madeira é derivada de fontes renováveis (árvores), que podem ser provenientes de uma área de florestas plantadas ou de manejo e seu uso contribui com a redução das concentrações de gases causadores do efeito estufa, tornando-a, sob essa ótica, um dos materiais mais requeridos para construções ecológicas e sustentáveis (GUSTAVSSON; PINGOUD; SATHRE, 2006; CARIA, 2021).

Segundo Ramage *et al.* (2017), a partir da Conferência Mundial de 1992, realizada no Rio de Janeiro-Brasil, com a temática de meio ambiente, as nações do mundo realizaram um acordo com o comprometimento de desenvolver programas de sustentabilidade, que induzissem as pessoas e as empresas a terem ações sustentáveis e, assim, reduzissem os danos ambientais. Nas construções, esses programas incentivaram a utilização de madeiras e outros materiais renováveis, uma vez que as árvores apresentam 50% de sua massa composta por carbono obtido pela absorção do dióxido de carbono, gás responsável pelo efeito estufa, pelo processo de fotossíntese.

Nesse contexto, no setor madeireiro, a busca por um controle de desmatamento foi alta, uma vez que o incentivo ao uso desse material aumentou, havendo, assim, uma necessidade

de manejo florestal controlado que trouxesse benefícios econômicos e com baixo dano ambiental. Para isso foi desenvolvido o manejo sustentável:

Manejo Florestal Sustentável: administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies (BRASIL, 2009).

O manejo foi incorporado ao setor madeireiro, e está de acordo com as colocações de Ritter (1990) e Ino (2024), que afirmam que “com as devidas manutenções, a madeira é um dos materiais mais duráveis dentre os utilizados na construção”.

Apesar de a madeira apresentar um grande potencial e expectativa, Ramage *et al.* (2017) concluem que para a sua utilização em grandes construções, ainda há uma necessidade de pesquisas em grande escala para se ter um material com a confiabilidade adequada para a aplicação em construções civis.

Consoante a esse aspecto, a aplicação de compósitos reforçados com fibras em estruturas de madeira e vigas de madeira lamelada colada (MLC) tem sido estudada como forma de expandir o conhecimento técnico sobre tais aplicações, visando preencher, dessa maneira, essa lacuna sobre esses materiais de construção. Essa técnica tem apresentado vantagens de se melhorar/aumentar os valores das propriedades de resistência e rigidez dos elementos, sem alterar de forma substancial o peso próprio do elemento, e reduzir a dispersão de tais valores, tornando-a um material com melhor desempenho estrutural (FIORELLI; DIAS, 2011b; DONADON, 2016).

Estudos teóricos e experimentais têm apontado para resultados promissores do uso de fibras sintéticas de Vectran para uso no reforço estrutural, devido ao seu bom desempenho mecânico, equiparando-se com os de fibras de carbono utilizadas tradicionalmente como reforço estrutural e com custo inferior (BERTOLINE, 2015; BERTOLINE *et al.*, 2015; DONADON *et al.*, 2020). Já fibras naturais, como as de Sisal e Curauá vem sendo pesquisadas como uma forma de reforçar peças de madeira de classes de resistências menos avantajadas, com a madeira de pinus (DONADON, 2016; VICTOR, 2018).

Usualmente, esses reforços são colados na parte mais tracionada das peças de madeira serrada ou lamelada colada. Com o objetivo de proteger tais compósitos de fibras e o adesivo, uma camada de sacrifício de madeira é colocada para tal função, contribuindo também para questões relativas as situações de incêndio (JOHNSSON; BLANKSVÄRD; CAROLIN, 2007; MASCIA; ALMEIDA; ALVES, 2019).

Nesse contexto, este trabalho visa entender e analisar o comportamento de compósitos de fibras sintéticas de Vectran e naturais de Sisal e Curauá, quando utilizadas em situação e posicionamento de reforço estrutural, de forma a validar a sua aplicação em peças estruturais de madeira lamelada colada, constituídas de madeira de reflorestamento, por meio de procedimentos experimental e numérico, com vistas a contribuir para um melhor conhecimento dessa composição, bem como divulgar os achados científicos para o meio técnico da área de estruturas de madeira.

2. Objetivos

Esta pesquisa teve por objetivo verificar o comportamento mecânico de fibras sintéticas de Vectran e de fibras naturais de Curauá e Sisal, aplicadas separadamente em vigas de madeira lamelada colada (MLC) durante o processo produtivo e a viabilidade da utilização dessas fibras como reforço estrutural.

2.1. Objetivos específicos

Para se atingir os objetivos desta tese de doutorado devem ser considerados os seguintes objetivos específicos:

1. avaliar as interações madeira, fibra e resina adesiva;
2. verificar o desempenho mecânico dos reforços em elemento de escala real comparativamente a elementos sem reforço;
3. simular numericamente, por meio de *software* comercial, os elementos com e sem reforço; e
4. validar o método numérico empregado comparativamente ao experimental.

3. Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica envolvendo fibras naturais e sintéticas, suas propriedades e utilizações na construção, de forma a direcionar e nortear esta pesquisa, com o intuito de melhor compreender o comportamento de elementos estruturais em madeira lamelada colada com reforço de fibras.

3.1. Madeira como material de construção

A madeira é um dos mais antigos materiais de construção utilizados pela humanidade, constituindo sua aplicação nos mais diversos tipos de construções e são requeridos, principalmente, para aqueles fins que se deseja uma construção sustentável. A partir da conferência mundial realizada no Rio de Janeiro em 1992, surgiram programas que incentivam a utilização de materiais renováveis, principalmente a madeira, contribuindo para a absorção de carbono do ambiente (GUSTAVSSON; PINGOUD; SATHRE, 2006; RAMAGE *et al.*, 2017; VOLZ *et al.*, 2012).

Figura 1 – Madeira como material antigo exemplificada por meio do Templo budista Hōryū Gakumonji construído em madeira no ano 607 no Japão ainda em pé



Fonte: Saigen Jiro (2019).

No trabalho de Ramage *et al.* (2017), os autores trazem à tona uma ampla revisão sobre o material madeira, analisando artigos sobre propriedades, sua aplicação e

particularidades desse material. Discutem ser a madeira um material de construção sustentável único, mas entendem que a madeira ainda deve ser estudada, tanto em pequena escala quanto em macro (dimensões estruturais), para que as aplicações em grandes construções sejam possíveis.

Portanto, a busca por alternativas construtivas em madeira tem sido a dedicação de diversos pesquisadores, com o objetivo de desenvolver sistemas mais resistentes e que permitam grandes possibilidades de aplicação nas construções.

Por séculos a madeira tem sido utilizada em construções de casas, pontes, postes de energia e outros fins construtivos, sendo ainda hoje utilizada, devido ao aperfeiçoamento tecnológico, um produto industrializado ou engenheirado, como por exemplo, a madeira lamelada colada (MLC). Esse sistema, introduzido na Europa no século XIX consiste em confeccionar uma viga de madeira de grandes dimensões, a partir de lamelas de madeira de pequenas espessuras unidas por adesivo. No Brasil, esse sistema foi introduzido em 1934 pela indústria Esmara Estrutura de Madeiras Ltda. (AMAYA, 2013; ICIMOTO, 2018; ISSA; KMEID, 2005; SHIGUE, 2018).

A utilização da Madeira Lamelada Colada (MLC) é uma alternativa construtiva interessante, pois permite ser empregada com as mais variadas formas estéticas e estruturais, apresentando boas propriedades físicas, resistência e rigidez. Neste sentido, é material estrutural versátil, apresentando, também, a grande vantagem de possibilitar a utilização de madeira de reflorestamento e de ser facilmente trabalhável (AMAYA, 2013).

Apesar de a madeira exibir um grande potencial e expectativa de aplicações em inúmeros campos da construção, também inúmeros fatores como a grande diversidade de espécies existentes, idade das madeiras utilizadas, forma de cultivo e crescimento, dentre outros fatores, influem em todo o processo de utilização da madeira. Isso leva a uma necessidade de se realizar pesquisas em larga escala para se ter um material com a confiabilidade adequada para a aplicação em construções civis (RAMAGE *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2022, 2023; NEVES, 2023).

3.2. Reforço polimérico de fibra (FRP)

Segundo as definições encontradas na literatura, um material compósito é um conjunto de dois ou mais materiais combinados em escala macroscópica, tendo uma distinta interface entre os mesmos, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de

propriedades mecânicas, que nenhum dos componentes apresentavam, trabalhando de forma individual (AGARWAL; BROUTMAN, 1990; GIBSON, 2011; MENDONÇA, 2005).

Os materiais compósitos já estão completamente estabelecidos como materiais engenheirados trabalháveis e são comumente utilizados ao redor do mundo (DWIVEDI; KUMAR, 2015). A busca por materiais com elevada propriedade mecânica aliada ao uso de materiais renováveis e ecologicamente amigáveis, torna-se um interessante tema para trabalhar com elementos em madeira combinada com outros materiais, formando um compósito ecológico renovável.

Como apresentado, um compósito é formado da combinação de dois ou mais materiais para a obtenção de um novo. Particularmente, para a madeira, torna-se importante testar as combinações possíveis de matriz (adesivo), de reforço (fibras) e espécies de madeira de reflorestamento, buscando um compósito com boas propriedades mecânicas.

Como componente ligante (adesivo), existem quatro grupos de adesivos estruturais que se mostraram eficientes: resinas epóxi; poliuretanos (PU) mono componentes e bicomponentes; resinas acrílicas; e emulsão polimérica de isocianetos (EPI) (DAVIS, 1997). Sendo que, dos adesivos apresentados, os EPI e PU estão entre os cinco mais utilizados em processos de laminação de madeira (RAFTERY *et al.*, 2009).

Já os componentes de reforço estão de acordo com os interesses econômicos e com a atual ordem ecológica mundial (MASCIA; FURLANI; VANALI, 2010). Sendo estes componentes:

1. Vectran;
2. Sisal; e
3. Curauá.

As fibras sintéticas de Vectran são formadas a partir da extrusão de cristal líquido por finos capilares que orientam agrupamento de bastonetes internos, sendo essa orientação o que confere a elevada propriedade mecânica desse material, possibilitando inúmeras aplicações (KURARAY AMERICA, 2010). A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas dos três modelos de fibras de Vectran produzidos.

Figura 2 – Rolas de filamento das fibras Vectran e a demonstração de produtos com a aplicação das fibras em sua composição



Fonte: Kuraray America (2012).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das versões da fibra de LCP Vectran

Modelo	Densidade g/cm ³	Ruptura a tração MPa	Módulo de Elasticidade MPa
Vectran NT	1,4	1100	52000
Vectran HT	1,4	3200	75000
Vectran UM	1,4	3000	103000

Fonte: Kuraray America (2010).

As fibras sintéticas Vectran, devido a altas propriedades mecânicas, equiparam-se aos materiais utilizados como reforço (Tabela 2) e por apresentarem uma boa relação entre resistência por peso, mostram-se como um promissor elemento a ser utilizado como reforço.

A análise teórica da utilização dessas fibras como reforço demonstrou que tecnicamente e economicamente, sua aplicação é viável para o reforço de viga MLC de madeira plantada, de coníferas e folhosas (BERTOLINE *et al.*, 2016).

Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas dos materiais comumente utilizados como reforço

Tipo de fibra	f_t MPa	E_t GPa	ρ g/cm ³
Vidro	1379-1724	48-62	2,4
Carbono	1650-2610	152-165	1,55
Aramida	1200-2068	50-74	1,25
Aço	1379-1862	186-200	7,9

Fonte: Balseiro (2007).

f_t é a resistência a tração do material; E_t é o módulo de elasticidade do material a tração; ρ é o peso específico do material

As fibras vegetais apresentam importantes características que fazem parte do grande interesse mundial pelo desenvolvimento de novas tecnologias, que possibilitem a utilização de produtos com menor impacto ambiental (MARINELLI *et al.*, 2008). Dentre esses pontos alguns são destacados:

- 1) são materiais renováveis e sua disponibilidade pode ser considerada ilimitada;
- 2) são materiais biodegradáveis, característica crucial para componentes, que após esgotarem a sua vida útil, devem ser descartados;
- 3) representam financeiramente uma nova fonte de renda para a população rural, podendo evitar o enorme fluxo do campo para a cidade, verificado principalmente nas regiões norte e nordeste do Brasil;
- 4) apresentam baixo custo, em relação aos reforços atualmente empregados.

Segundo Tomczak (2010), as propriedades mecânicas dessas fibras são influenciadas pelo tipo de cultura, colheita, processo de desfibramento e de tratamento das fibras, constituindo, assim, uma desvantagem das fibras naturais em relação às sintéticas. Essa variação das propriedades das fibras naturais pode ser verificada por meio dos valores encontrados por Silva e Aquino (2008), em sua revisão na literatura, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo de valores de diâmetros e propriedades mecânicas encontradas na literatura por Silva e Aquino (2008)

	Diâmetro μm	f_t MPa	E_t GPa
Curauá Roxo	49-93	665-1300	20-33
Curauá Branco	60-100	859-1404	20-36
Juta	200	393-773	26,5
Sisal	50-300	511-635	9,4-22
Coco	100-450	131-175	4-13

Fonte: Silva e Aquino (2008).

f_t é a resistência a tração do material; E_t é o módulo de elasticidade do material a tração.

A aplicação de fibras naturais, como as de Sisal, em vigas com madeira de coníferas, como o *Pinus spp*, que pertence a classes de resistências de madeiras compatíveis com a resistência desta fibra, bem como ser de densidade não elevada e porosa (ABNT, 2022a, 2022b), mostra-se uma interessante opção, pois confere aumento da rigidez, mudança no modo de ruptura e seu fácil manuseio permite aplicação industrial ou *in loco* (MASCIA; DONADON; VILELA, 2019).

3.3. Estudo da madeira com reforço

A versatilidade da MLC com respeito às formas, dimensões e resistência, aliada ao aumento da durabilidade por meio de preservativos, vem ampliando seu uso em diversos países, gerando assim, uma necessidade de conhecer os diversos fatores que influenciam as características de resistência e rigidez de vigas de MLC (FIORELLI, 2005; ABNT, 2022a).

Uma alternativa que vem sendo estudada por diversos autores, é o uso de polímeros reforçados com fibras (PRF), com o objetivo de aumentar a resistência, a rigidez e alterar o modo de ruptura de vigas de MLC (FIORELLI; DIAS, 2011a; AMAYA, 2013; SCHOBBER *et al.*, 2015; BERTOLINE *et al.*, 2016; VICTOR, 2018; DONADON *et al.*, 2020).

O reforço com PRF também pode ser necessário como forma de estender a vida útil de uma estrutura submetida a deterioração, danificada ou que teve o modo de utilização modificado (FRANKE *et al.*, 2015).

É importante observar que a ruptura por flexão, geralmente, ocorre na região de tensão de tração, o que leva a uma ruptura frágil, ou pode ocorrer na região predominante de tensões de compressão, resultando em deformações elásticas e plásticas, configurando-se uma ruptura dúctil. No entanto, devido aos defeitos naturais, a ruptura em situação de flexão é,

principalmente, caracterizada como de forma frágil na tração, sendo assim, considerada como uma ruptura crítica (FRANKE *et al.*, 2015).

A adição de PRF fixado na região tracionada do MLC, altera o modo de ruptura da madeira de tração nas fibras ou nas emendas, ou seja, vai de uma ruptura frágil para uma complexa, que consiste em uma combinação de compressão, tração e cisalhamento (FIORELLI, 2005).

Diversos autores como Fiorelli e Dias (2011b), Ribeiro (2018), Victor (2018) e Donadon *et al.* (2020), dentre outros, vêm estudando a madeira combinada com PRF, tanto em seu aspecto em microescala como em dimensões estruturais, de modo a compreender essa complexidade de estado de tensões que ocorre em elementos reforçados.

Autores tais como Bertoline *et al.* (2016), Donadon (2016) e Victor (2018) demonstraram que as vigas de madeira lamelada colada reforçada com fibras de Vectran, Sisal e Curauá, na região inferior da viga, como um reforço externo na região tracionada, melhoram a rigidez dos elementos, aumentam o valor de força última requerida para ruptura completa e mudam o modo de ruptura da forma brusca para uma plástica, com grandes deformações antes de se atingir a ruptura frágil.

Apesar de nesses estudos a aplicação das fibras como reforço na região externa tracionada do elemento, induzir melhorias em valores das propriedades mecânicas de seu material constituinte, bem como no comportamento estrutural dessas peças reforçadas, o compósito de fibras e adesivo se encontra exposto ao meio, estando suscetível a ações de agentes físicos, químicos, biológicos e térmicos, podendo-se estar sujeito a danos que alterem seu desempenho funcional.

No Brasil uma das razões que restringe o uso da madeira em edificações é a insegurança relacionada ao alto potencial de risco com incêndio (PINTO, 2001; FIGUEROA; DE MORAES, 2009; MARTINS, 2016), além de questões associadas à durabilidade, por ser a madeira um material orgânico sujeito à biodeterioração (CALIL JR *et al.*, 2021). A combustibilidade da madeira é um dos fatores que afeta os critérios de escolha do material para a construção, tendo como quesito a segurança contra incêndios, porém, a compreensão do comportamento do material frente a essa situação é de suma importância para desenvolver estratégias de segurança (MARTINS, 2016).

Apesar de levantamentos estatísticos preocupantes, o Brasil está em terceiro lugar no *ranking* mundial em número de vítimas de incêndios, enquanto os Estados Unidos estão em

primeiro lugar, seguido do México (MAPFRE SEGURIDADE *apud* MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1995; SPINKLERS, 2019).

Em 2019 foram registrados, pela imprensa, 866 ocorrências de incêndio estrutural (SPINKLERS, 2019), com uma média de 2 a 3 incêndios por dia no Brasil. Levando em consideração essa importante informação, a norma ABNT NBR 14432 (2001) define o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) em 30 minutos, podendo ser necessário até 120 minutos, de acordo com a ocupação da estrutura, como o tempo suficiente para possibilitar: a) fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança; b) segurança das operações de combate ao incêndio; e c) minimização de danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública.

Avaliando o posicionamento do PRF de forma a atender ao TRRF, é importante verificar a taxa a qual a madeira carboniza para que o elemento não sofra as ações do incêndio. Portanto, a taxa de carbonização serve para avaliar a resistência ao fogo de estruturas de madeira. Essa taxa varia de acordo com a espécie, mas de forma geral, situam-se entre 0,37 e 0,80 mm/min, sendo o valor de 0,60 a 0,65 mm/min um valor apresentado por Figueroa e De Moraes (2009) para MLC formado por coníferas.

Com relação à ação térmica de incêndio, a norma europeia (EM 1995-1-2, 2014) aborda o dimensionamento de estruturas de madeira para os casos nessa situação. Para atender a essa norma, as estruturas são dimensionadas com a previsão de uma camada extra (camada de sacrifício) ao redor do elemento que será queimada no tempo requerido para a estrutura. Especificamente para os casos de um reforço estrutural, deve-se conceber o elemento com o reforço com uma camada protetora contra a ação do incêndio.

De forma similar, a norma brasileira de estruturas de madeira (ABNT, 2022a) assume que o núcleo da seção de um elemento estrutural se mantém frio, mesmo estando a apenas uma pequena distância da zona queimada, conservando assim, grande parte das propriedades físicas e mecânicas da madeira. Sendo assim, essa norma utiliza o método da seção reduzida, em que é considerado uma redução da seção transversal, devido à carbonização da madeira, e um núcleo com propriedades intactas resistindo aos esforços.

Dando continuidade aos estudos anteriores de Bertoline *et al.* (2016), Donadon *et al.* (2020), Ribeiro (2018) e Victor (2018), e sabendo da importância de um dimensionamento de elemento reforçado que atenda as dimensões de normas contra incêndio (EM 1995-1-2, 2014; ABNT, 2022a), entende-se a importância de compreender e avaliar o comportamento de elementos reforçados com as fibras propostas neste estudo. Assim, esta pesquisa direcionou-se

em avaliar a camada de PRF de Vectran, Sisal e Curauá, inserido entre as duas últimas lamelas do elemento MLC.

3.4. Desempenho mecânico de madeira reforçada

A utilização de PRF surgiu como uma necessidade de reforçar estruturas em uso ou para compor novo elemento estrutural, com propriedades mecânicas melhores. Sua aplicação proporciona um incremento nas propriedades mecânicas de resistência (FIORELLI, 2002), em que é possível proporcionar o modo de ruptura a compressão, sendo uma forma mais dúctil e segura, ao invés de uma de tração, que é mais frágil (DONADON, 2016; FIORELLI, 2002; VICTOR, 2018).

Issa e Kmeid (2005) avaliaram nove vigas MLC reforçadas com chapa de aço e fibra de carbono, em pequena escala, e verificaram que a aplicação do reforço nos elementos MLC contribuíram para um aumento na força e deslocamento máximo suportado pelo elemento. Isso seria o equivalente a utilização de uma seção de vigas de madeira duas vezes para o caso do reforço da chapa de metal, e a uma seção 2,35 vezes maior para o da fibra de carbono. Apesar dos resultados promissores, os autores entenderam que somente quando uma compreensão clara dos valores reais de resistência à flexão para vigas em escala real for conhecida, é que o comportamento real pode ser entendido e, com isso, será possível o refinamento do fator de segurança à flexão.

Fiorelli (2002) avaliou o desempenho mecânico do PRF, utilizando fibra de carbono e fibra de vidro, aplicados em MLC de *Pinus elliotti*, *Eucalypto grandis* e de Peroba Rosa (*Aspidosperma polyneuron*). Nesse estudo, foram avaliadas a aplicação do reforço externamente à viga, com os elementos de MLC confeccionados, tanto em escala reduzida quanto em escala real, e foram verificados aumento de rigidez de até 60% com aplicação do reforço.

Em continuidade de seu trabalho, Fiorelli (2005) avaliou vigas MLC, em escala real, de pinus reforçados com fibra de vidro na última linha de cola, entre as duas últimas lamelas, com diferentes alturas de viga. O autor verificou a importância da utilização de uma lamela de madeira abaixo da camada de reforço, com o intuito de proteger as fibras dos efeitos das altas temperaturas, em caso de incêndio, bem como de proporcionar um efeito estético mais agradável.

Piva Pellis (2015) verificou o desempenho de vigas MLC, em escala real, reforçadas com barras de aço CA-50 de 10 mm, submetidas a flexão de quatro pontos, comparando as

taxas de reforço de 0%, 2% e 4% do volume. A aplicação do reforço levou a um aumento de 53% a 73% da rigidez, em comparação com o elemento não reforçado.

Donadon (2016) avaliou o desempenho mecânico via ensaios de flexão de três pontos, de vigas MLC reforçadas com fibras de Sisal, Curauá e Vectran aplicadas na região externa tracionada do elemento com taxa de reforço de 1% a 5%. Foram obtidos ganhos de resistência com as fibras de 14% para Curauá, 20% para o Sisal e 23% para o Vectran. Além disso, foi verificado o ganho de rigidez de 8% a 20% para as fibras de Curauá; 9% a 16% para as fibras de Sisal; e 22% a 36% para as fibras de Vectran. Ao final de seu trabalho, Donadon (2016) sugeriu a avaliação do reforço na última lâmina de cola, entre as duas últimas lamelas de madeira para verificar se há alteração no desempenho do reforço, garantindo com essa configuração, a proteção contra temperaturas e melhor homogeneidade do compósito.

Bertoline *et al.* (2016) avaliaram numericamente a aplicação das fibras de Sisal, Curauá e Vectran como reforço de diferentes configurações de vigas de MLC. O desempenho do reforço foi verificado na situação de flexão a três pontos, segundo a norma ABNT NBR 7190 (1997) vigente na época dos ensaios, com a aplicação do reforço entre as duas últimas lamelas de madeira. As vigas avaliadas eram compostas pelas classes C25 monocotilêdnea e C40 dicotilêdnea em diferentes configurações de seção. Ao final do estudo, os autores concluíram que a aplicação dos três reforços avaliados nas vigas são tecnicamente e economicamente viáveis; que os reforços de fibras naturais são mais bem aproveitados se aplicados em vigas com madeira de baixa resistência e que para pequenos vãos, a aplicação do reforço de fibras torna-se pouco vantajoso (VICTOR, 2018).

Diante dos estudos avaliados é possível perceber que a análise de vigas ensaiadas em escala real se faz necessário e que, ao se estudar elementos reforçados, o PRF deve ser aplicado entre as duas últimas lamelas em um elemento em MLC e, portanto, para este estudo foi previsto a utilização do PRF inserido entre lamelas para compreender o comportamento do reforço nessa situação.

3.5. Resinas adesivas na MLC

De acordo com Silva Filho e Garcez (2007), o componente matricial de um compósito é caracterizado por ser contínuo e por envolver o componente de reforço. As principais funções que o componente matricial exerce são as de transmitir as tensões entre o material de reforço, proteção mecânica para diminuir danos físicos e agressividade do meio e,

por fim, gerar aderência entre as fibras e o substrato (LEVY NETO; PARDINI, 2006; SILVA FILHO; GARCEZ, 2007; GIBSON, 2011).

Donadon (2016) utilizou, em seu estudo, a resina epóxi bicomponente como matriz de interface entre a madeira e reforço de fibra Vectran, Sisal e Curauá, obtendo um bom desempenho, mas recomendando estudos futuros utilizando outros adesivos para realizar essa interface entre madeira e fibra.

Fiorelli (2002) recomenda o uso de resina epóxi para fibras, porém, na continuidade de seu trabalho, manteve sua recomendação sobre o uso do adesivo epóxi, mas também, recomendou a utilização de adesivo phenol-resorcinol para a fixação da fibra na madeira. Entretanto, o autor entende que essa recomendação não significa que outros adesivos não possam ser utilizados com o mesmo ou com melhor desempenho.

Os adesivos tradicionalmente aplicados a madeira tem sido o poliacetato de vinila (PVA), base de ureia-formaldeído (UF), melamina-ureia-formaldeído (MUF), epóxi, poliuretanos (PU) monocomponentes e bicomponentes e emulsão polimérica de isocianato (EPI) (GRØSTAD; PEDERSEN, 2010; DAVIS, 1997).

Os adesivos EPI foram, primeiramente, desenvolvidos no Japão, depois espalhados pela Ásia, Europa e Américas. Os adesivos EPI têm excelentes propriedades de adesão à superfície da madeira e a materiais como metais, plásticos e espumas, sendo muito adequado para colar materiais compósitos, em que a madeira é combinada com outros materiais. Muitos adesivos EPI estão aprovados para produção de postes no mercado japonês. Na América do Norte são usados para aplicações estruturais, principalmente, para vigas I e juntas denteadas. Na Europa, são usados para juntas denteadas, vigas I e vigas de madeira laminada. Apresentando um baixo custo de mercado, atualmente esse adesivo se torna interessante para aplicação neste estudo (GRØSTAD; PEDERSEN, 2010).

O adesivo de poliuretano (PU) é altamente elástico e possui alta resistência à água, substâncias químicas, óleos e micro-organismos (CUNHA; MATOS, 2011; UZEL *et al.*, 2018). Em estudo realizado por Uzel *et al.* (2018), os autores obtiveram valores de resistência em vigas reforçadas utilizando adesivo de poliuretano, em comparação com os valores obtidos utilizando adesivo epóxi.

Para esta pesquisa de doutoramento optou-se por utilizar os reforços de fibras Sisal, Curauá e Vectran com os adesivos tradicionalmente utilizados para a colagem da madeira, que nesse caso, foram o EPI e PU.

4. Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nos ensaios, bem como os métodos escolhidos para o programa experimental, com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas e para o monitoramento do comportamento estrutural dos elementos estudados.

4.1. Materiais

As peças de madeira utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa foram adquiridas no comércio local, sendo 55 tábuas de 3m da espécie *Pinus elliottii*, advinda de um único lote. As 55 tábuas foram desdobradas em 108 lamelas, por uma empresa terceirizada, supervisionada pelo pesquisador, contendo as especificações de 2,2 cm de altura, e 6 cm de largura, atendendo a norma brasileira, versão vigente no ano dos ensaios (ABNT, 1997), que foram utilizadas para produzir 12 vigas contendo nove lamelas cada. Com o intuito de se atingir a altura padronizada de 18 cm, as vigas foram emparelhadas pela lâmina superior, oposta ao reforço estrutural, portanto, a primeira lâmina do MLC tem altura reduzida próxima de 1,5 cm. A Tabela 4 mostra as características físicas e geométricas das vigas confeccionadas.

Tabela 4 – Propriedades físicas das vigas

Amostra	Comprimento cm	Base mm	Altura mm	Peso kg	Densidade kg/m ³	Inércia mm ⁴
VSR 1	289,60	52,83	178,78	13,90	508,14	25159839
VSR 2	289,50	52,92	178,40	14,10	515,92	25037778
VSR 3	289,20	52,68	178,72	13,60	499,46	25060352
CUR 1	289,80	52,60	178,35	13,55	498,40	24867025
CUR 2	289,70	52,37	178,92	14,10	519,48	24993443
CUR 3	289,40	52,60	178,58	13,60	500,28	24964753
SIS 1	289,50	52,78	178,82	13,80	505,04	25150090
SIS 2	289,60	52,68	178,50	14,10	517,74	24969317
SIS 3	289,60	52,78	178,75	13,75	503,22	25121971
VEC 1	289,20	52,85	179,10	13,70	500,47	25301747
VEC 2	289,20	52,85	178,67	13,40	490,70	25118538
VEC 3	289,80	52,97	178,75	13,25	482,91	25209228
Média	289,51	52,74	178,69	13,74	503,48	25079507
Desvio	0,22	0,17	0,21	0,28	10,81	120964
Erro	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,48%

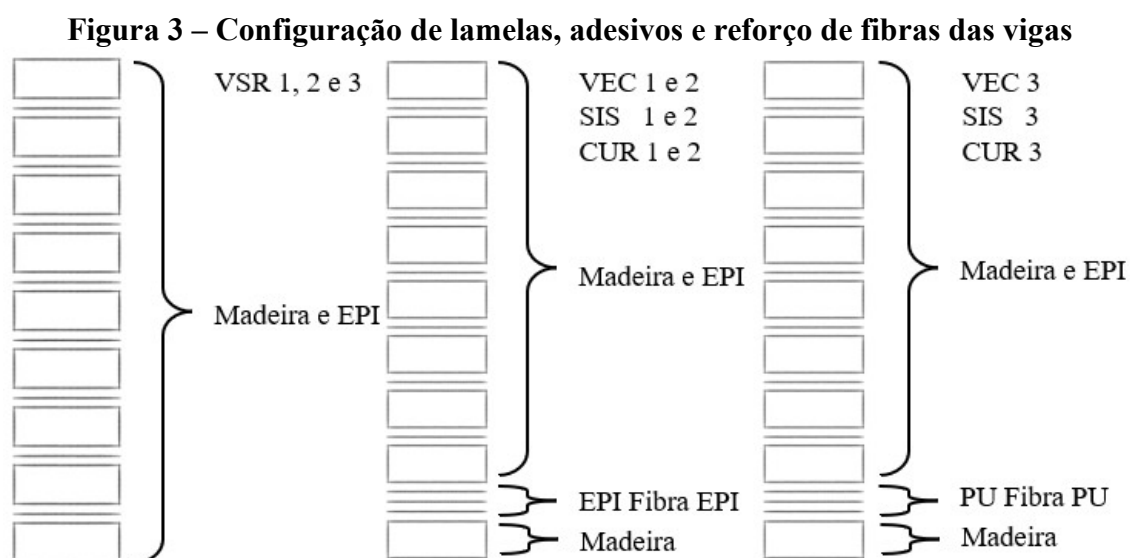
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O processo de produção das vigas incluiu a utilização de lamelas de melhor qualidade nas regiões superior e inferior das vigas de MLC e na região central das mesmas, as

lamelas mecanicamente menos qualificadas. Nesse processo, a classificação das lamelas foi feita de forma visual e por densidade.

As 12 vigas foram divididas em quatro grupos: sem reforço (VSR); reforçada com Sisal (SIS); reforçada com Curauá (CUR); e reforçada com Vectran (VEC). Cada grupo foi composto por três séries.

O Grupo VSR e as séries 1 e 2 dos Grupos VEC, SIS e CUR foram produzidas utilizando o adesivo EPI ReactTITE EP-925 como matriz de união dos elementos. Na série 3 dos grupos SIS, VEC e CUR, foi utilizado adesivo EPI ReactTITE EP-925 entre as lamelas de madeira e na região do reforço foi utilizado adesivo PU PURBOND HB S609 na série 3 (Figura 1).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

As fibras utilizadas nesta pesquisa foram as de Vectran HT em formato de malha com gramatura de 408 g/m² (Figura 2), fibra de Sisal com gramatura de 1393 g/m² (Figura 3) e Curauá (Figura 4).

Figura 4 – Malha de fibra Vectran HT com gramatura de 408g/m²



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 5 – Malha de fibra de Sisal com gramatura de 1393 g/m²



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 6 – Aglomerado de fibra de Curauá com adesivo EPI

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A composição das propriedades do compósito formado por fibra e adesivo foi realizada utilizando-se os valores médios das propriedades dos materiais disponíveis em Donadon (2016), Kuraray America (2010), Mascia *et al.* (2010), Spinacé *et al.* (2011), Monteiro, Lopes e Ferreira (2013) e Souza *et al.* (2015), demonstrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados para composição teórica do compósito

Material	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	Gramatura (g/m ²)
Madeira <i>Pinus elliotti</i>	503,48	11478	-
EPI	1280	4000	200
PU	1160	1500	260
Curauá	1100	30000	505
Sisal	1370	37390	1393
Vectran	1400	75000	408

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

ρ é o peso específico do material; E é o módulo de elasticidade.

Por meio das propriedades encontradas na literatura e disponíveis na Tabela 5, é possível calcular os volumes de fibras e adesivos utilizados e realizar a composição dos módulos de elasticidade (equações 1 a 3), por meio da lei das misturas, determinando assim, o módulo de elasticidade do compósito (CAMPBELL, 2010; RIBEIRO, 2018; DONADON *et al.*, 2020).

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_f / \rho_f + W_a / \rho_a} \quad (1)$$

$$V_a = \frac{W_a / \rho_a}{W_f / \rho_f + W_a / \rho_a} \quad (2)$$

$$E_c = V_f \cdot E_f + V_a \cdot E_a \quad (3)$$

Onde:

V_f é o volume de fibras calculado utilizado;
 W_f é a massa de fibras utilizada;
 ρ_f é a massa específica de fibras utilizada;
 V_a é o volume de adesivo calculado utilizado;
 W_a é a massa de adesivo utilizada;
 ρ_a é a massa específica de adesivo utilizada;
 E_c é o módulo de elasticidade do compósito;
 E_f é o módulo de elasticidade da fibra; e
 E_a é o módulo de elasticidade do adesivo.

Foi adotado para o estudo, ensaios de flexão a três e quatro pontos em vigas MLC com e sem reforço aplicados já durante o processo produtivo. A classificação mecânica da madeira utilizada ocorreu em sequência aos ensaios de flexão com amostras extraídas das vigas.

Também foi realizado, neste estudo, uma análise numérica pelo método de elementos finitos utilizando *software* comercial, sustentado/alimentado com os dados obtidos nos ensaios e dos adquiridos no estudo de Donadon (2016).

4.2. Metodologia

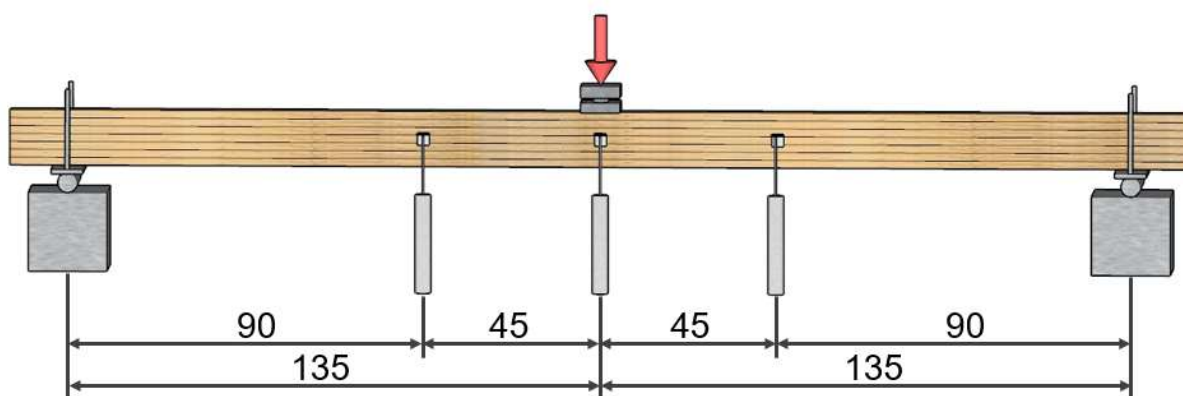
4.2.1. Ensaio de Flexão em viga em escala real

Quando reforçada, a viga de MLC teve o reforço incorporado entre a penúltima e última lâminas, ficando assim protegido por uma lâmina de madeira, simulando, portanto, numa situação de projeto, em que as fibras ficam protegidas pela camada de sacrifício prevista na norma de estruturas de madeira brasileira NBR7190 (ABNT, 2022)¹ e no Eurocode (EM 1995-1-2, 2014), norma europeia para dimensionamento de estrutura de madeira em situação de incêndio.

¹ Este estudo foi realizado anteriormente a aprovação da norma NBR7190 (ABNT, 2022), a qual prevê a proteção contra incêndio, porém, todos os ensaios e discussão foram realizados baseados na mesma norma com publicação de 1997.

Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de flexão a três pontos, um ponto de aplicação de força no meio do vão e dois pontos de reação (Figura 7 e Figura 8), e flexão a quatro pontos, sendo dois de carregamento e dois de reação dos apoios (Figura 9 e Figura 10). O primeiro foi adotado por ser o mesmo método de ensaio utilizado pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997) para a caracterização de madeiras na flexão e por ser uma situação crítica de solicitação em vigas. Já o segundo, ensaio de quatro pontos, foi realizado para que no trecho verificado, parcela central entre dois pontos de aplicação de força, fosse isento das influências da força cortante, sendo solicitado apenas devido ao momento fletor. Ambos os métodos de ensaio tiveram o vão livre padronizado em 270 cm entre apoios e, para o ensaio de quatro pontos, os vãos entre ponto de força foi padronizado em 90 cm.

Figura 7 – Esquema de ensaio de 3 pontos com medidas em centímetros



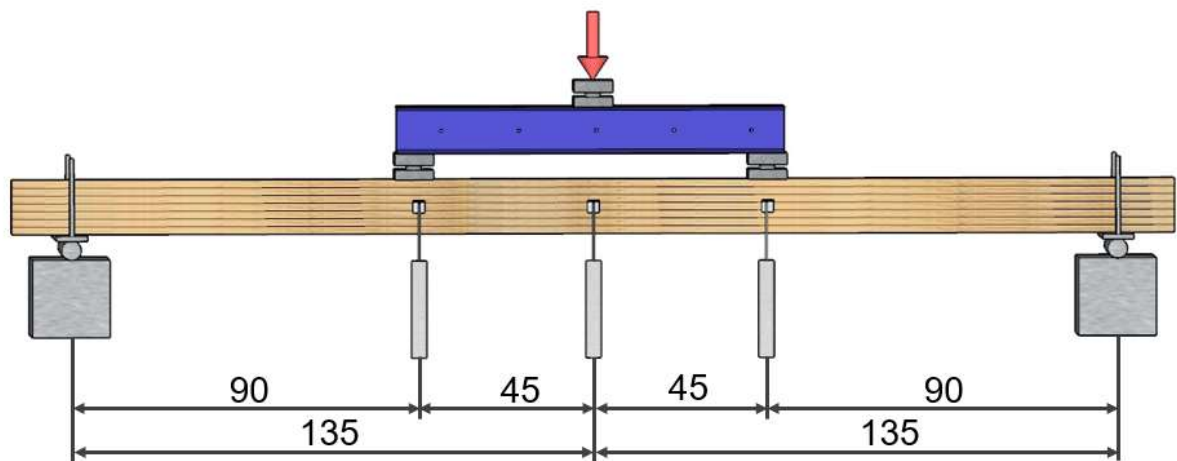
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 8 – Ensaio de três pontos realizado no laboratório em viga MLC



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 9 – Esquema de ensaio com quatro pontos e medidas em centímetros



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 10 – Ensaio de quatro pontos realizado no laboratório em vigas MLC



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os ensaios de flexão foram realizados com a viga em sistema biapoiado, sendo um apoio fixo e um apoio móvel (Figura 11). A força foi aplicada na viga, no meio do vão, por meio de uma rótula e um cilindro hidráulico de ação simples, com capacidade de 150kN, e carregamento monitorado por uma célula de força calibrada de capacidade 150kN. Para o ensaio de flexão a quatro pontos, foi utilizada uma viga de transição metálica de duplo C apoiada sobre roletes metálicos e a transferência da força para viga com placas metálicas.

Figura 11 – Detalhe dos apoios móvel e fixo, respectivamente, utilizados nos ensaios de flexão das vigas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Devido à perda de estabilidade lateral ocorrida em ensaios preliminares, optou-se por instalar enrijecedores laterais nas vigas no apoio. Para isso, garfos metálicos foram instalados com presilhas metálicas na viga de madeira, mas apoiados sobre os roletes dos apoios de reação (Figura 12). Essa configuração permitiu o giro da viga nos apoios, mantendo, assim, a configuração de apoios fixo e móvel, reduzindo a possibilidade de instabilidade da viga.

Figura 12 – Detalhe do garfo enrijecedor para impedir a perda de estabilidade lateral



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os deslocamentos verticais sofridos devido a força aplicada foram medidos por meio de transdutores de deslocamentos do tipo LVDT, com precisão 0,001 mm posicionados na lateral das vigas, com eixo de referência próximo da linha neutra (Figura 13). Esses transdutores foram posicionados um no meio do vão entre apoios e os outros dois, de forma simétrica, distanciados em 45 cm do meio do vão (Figura 13).

Figura 13 – Detalhe da viga posicionada para ensaio mostrando a célula de força apoiada sobre uma rótula e os medidores de deslocamento vertical LVDT



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Como forma de verificar as influências dos diferentes tipos de reforço nas vigas de MLC, foi realizado o cálculo da rigidez global dos elementos reforçados por meio da Equação 4, com o intuito de se comparar a rigidez das vigas reforçadas, verificando, assim, o desempenho do reforço de fibra utilizado. Como a relação L/h das vigas ensaiadas é maior do que 15, segundo Souza (2013), dentre outros, o deslocamento total sofre efeito de 3% a 5% da cortante, sendo consideravelmente desprezível seu efeito e permitindo utilizar a equação simplificada descrita a seguir:

$$EI = \frac{\Delta F \cdot L^3}{\Delta v \cdot 48} \quad (4)$$

Sendo que:

EI é a rigidez global do elemento reforçado;

ΔF é a variação da força em N em um trecho linear do gráfico de força por deslocamento;

Δv é a variação do deslocamento vertical em um trecho linear do gráfico de força por deslocamento;

L é o comprimento do vão livre da viga ensaiada.

Também foi utilizada a Equação 5 para avaliar a rigidez à flexão das vigas fletidas no sistema de quatro pontos:

$$EI = \frac{\Delta F \cdot 23 \cdot L^3}{\Delta v \cdot 648} \quad (5)$$

O cálculo de resistência convencional à flexão foi realizado com a Equação 6, mesma equação indicada no anexo B da norma brasileira NBR7190 (ABNT, 1997) para o cálculo dessa resistência em corpos de prova.

$$F_M = \frac{M_{\max}}{W_e} \quad (6)$$

Sendo que:

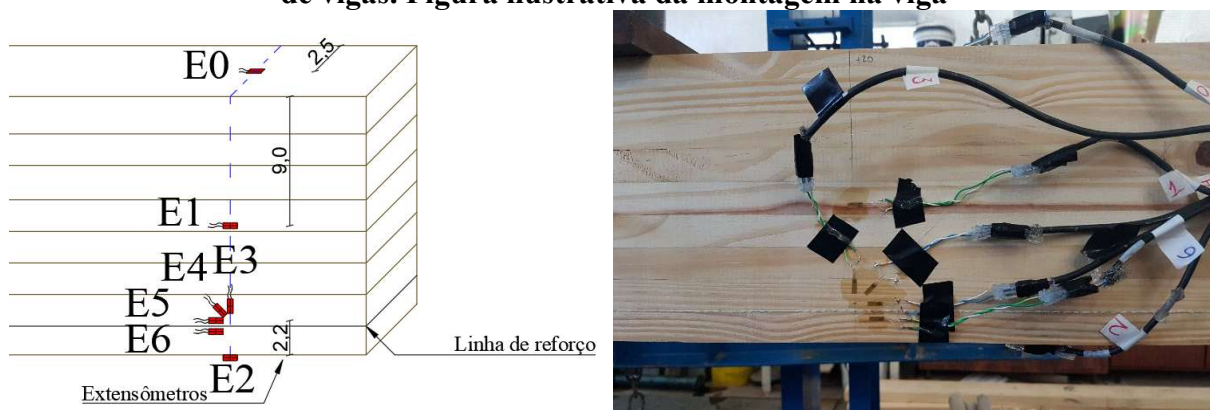
f_M é a resistência convencional máxima de madeira submetida a um momento fletor;

$M_{\max}$ é o máximo momento fletor atingido no ensaio;

W_e é o módulo de resistência elástico da seção transversal.

Sobre a superfície da viga foram posicionados extensômetros, de forma a permitir o monitoramento das deformações ao longo da seção, durante os ensaios. Foram utilizados extensômetros da marca Kyowa tipo KFG-5-120-C1-5, com 5 mm de comprimento e $119,8 \pm 0,2 \, \Omega$ de resistência. A superfície da viga foi preparada para receber os extensômetros que foram posicionados com um afastamento de 20 cm do meio da viga, ponto de aplicação da força, para se evitar os efeitos da perturbação de tensões, e com um posicionado verticalmente ao longo da seção da viga, como apresentado na Figura 14, manteve-se um alinhamento vertical. Também foi preparada uma roseta de extensômetros próximo da região do reforço de fibra para análise das tensões cisalhante no reforço. Todos os extensômetros foram aderidos a viga com adesivo instantâneo Super Bonder®.

Figura 14 – Detalhamento do esquema de extensômetros utilizado nos ensaios de flexão de vigas. Figura ilustrativa da montagem na viga



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A avaliação/determinação dos deslocamentos após a retirada dos LVDT foi realizada utilizando os dados de deformação captados pelos extensômetros e a análise de curvatura apresentada por Bodig e Jayne (1982).

Os dados dos monitoramentos do carregamento foram feitos por meio de uma célula de carga, e dos deslocamentos verticais por transdutores de deslocamento e, por fim, das deformações, pelos extensômetros posicionados na seção da viga. Tais dados foram captados e registrados em um sistema computacional via sistema de aquisição de dados modelo 5100B da marca Micro-Measurements (Figura 15).

Figura 15 – Aquisitor de dados utilizados para captar os sinais dos sensores e converter os dados



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

4.2.1.1. Extensometria

O monitoramento das deformações ao longo da seção da viga, pelos extensômetros instalados sobre sua superfície, possibilitou avaliar os deslocamentos verticais, realizar uma análise das tensões atuantes ao longo da seção e calcular o módulo de elasticidade da madeira, de acordo com as metodologias apresentadas nos próximos tópicos.

4.2.1.2. Deslocamentos verticais via extensometria

Para o cálculo dos deslocamentos verticais foi empregado o seguinte procedimento: calculou-se o raio de curvatura com relação a linha neutra da viga pela Equação 7, considerando que o elemento está simplesmente apoiado e seguindo a lei de Bernoulli (INAUDI *et al.*, 1998; DONADON *et al.*, 2020).

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_i}{y_i} \quad (7)$$

Sendo que:

ρ é o raio de curvatura da viga fletida;

ε_i é a deformação medida no extensômetro na posição i escolhida;

y_i é a distância do extensômetro escolhido até a linha neutra.

Usando os extensômetros E0 e E2 (Figura 14), a posição da linha neutra para o cálculo do raio de curvatura da Equação 7 pode ser definido pela Equação 8.

$$y_{ln} = \frac{\varepsilon_i \cdot y_j}{\varepsilon_i + \varepsilon_j} \quad (8)$$

Sendo que:

y_{ln} é a posição da linha neutra tomando como referência o topo da viga;

ε_i é a deformação medida no extensômetro na posição i escolhida sendo $i = 0$;

ε_j é a deformação medida no extensômetro na posição j sendo $j = 2$;

y_j é a distância entre os extensômetros nas posições i e j .

Geometricamente, os deslocamentos sofridos pela viga podem ser relacionados com o raio de curvatura de acordo com a Equação 9.

$$\Delta v = \rho \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (9)$$

Sendo que:

Δv é o deslocamento vertical da viga;

ρ é o raio de curvatura da viga deformada;

α é o ângulo formado entre o os extremos da viga ao centro da curvatura da viga deformada.

Por meio das Equações 8 e 9, o deslocamento no meio do vão, por meio dos dados coletas nos extensômetros, pode ser calculado, segundo a Equação 12. Importante ressaltar que a análise pode ser desenvolvida dessa forma, uma vez que os deslocamentos são pequenos, comparados com as dimensões da viga, portanto, o ângulo α se aproxima de sua tangente.

$$\Delta v = \frac{y_i}{\varepsilon_i} \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{L}{2} \cdot \frac{\varepsilon_i}{y_i} \right) \right) \quad (10)$$

Sendo que:

Δv é o deslocamento vertical da viga;

ρ é o raio de curvatura da viga deformada;

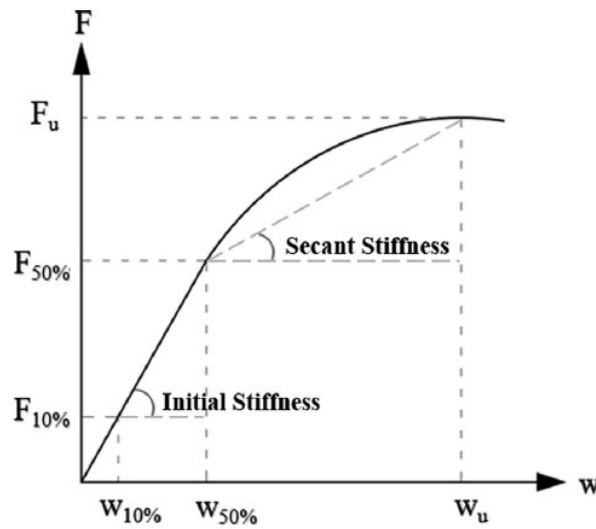
α é o ângulo formado entre o os extremos da viga ao centro da curvatura da viga deformada.

Pela Equação 10 foi possível acompanhar os deslocamentos sofridos no meio do vão, mesmo com a retirada dos LVDT após atingir 50% da força estimada máxima. Esses dados também permitiram o cálculo da rigidez da viga, tanto em sua fase elástica, como também, torna possível captar a rigidez na fase plástica.

4.2.1.3. Análise de tensões via extensometria

Além do monitoramento dos deslocamentos, as deformações dos extensômetros permitiram o cálculo das tensões atuantes ao longo da seção da viga, considerando a atuação de tensões no regime elástico (Figura 14) segundo a Equação 11.

Figura 16 – Comportamento da curva de força por deslocamento à flexão considerando regime elástico e plástico



Fonte: Donadon *et al.* (2020).

$$\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i \quad (11)$$

Sendo que:

σ_i é tensão medida na superfície da viga na posição i ;

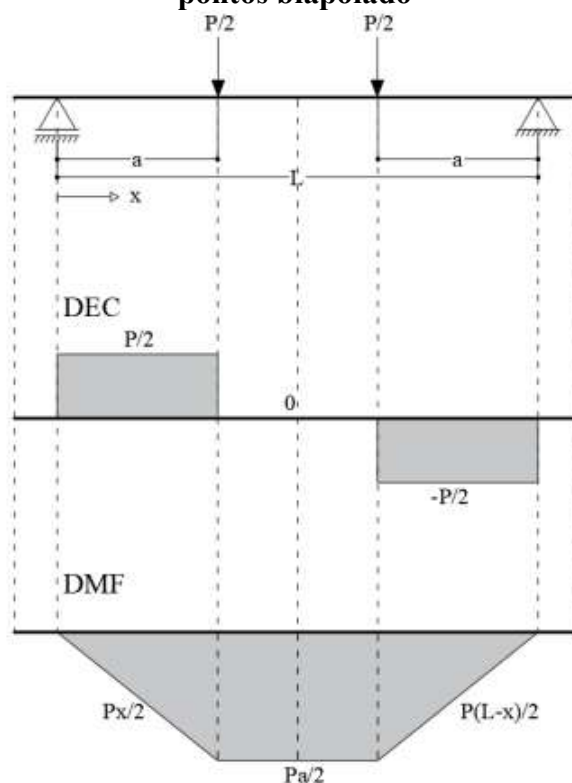
E é o módulo de elasticidade longitudinal obtido nos ensaios de caracterização da madeira;

ε_i é a deformação medida no extensômetro na posição i .

4.2.1.4. Módulo de elasticidade via extensometria

O cálculo do módulo de elasticidade longitudinal utilizando-se os extensômetros foi realizado por intermédio do ensaio de flexão de quatro pontos, em que a seção da viga considerada, estava submetida somente por momento fletor (Figura 15). Portanto, as deformações medidas pelos extensômetros, unidos do cálculo das tensões atuantes solicitadas no trecho de puro momento, quando correlacionadas à Equação 11, apresentada anteriormente, permitiu o cálculo do módulo de elasticidade de interesse.

Figura 17 – Diagrama de cortante e de momento fletor em sistema de flexão a quatro pontos biapoado



Fonte: Vilela (2020).

4.3. Ensaio de Compressão

Como procedimento de caracterização do lote de madeira utilizado para a confecção das vigas, foi realizado o ensaio de compressão para a determinação da resistência e da rigidez à compressão, paralela às fibras da madeira, segundo os procedimentos da NBR7190 (ABNT, 1997).

Foram confeccionados 15 corpos de prova de tamanho padrão de norma, 5 cm x 5 cm x 15 cm, extraídos das vigas utilizadas no ensaio de flexão. Esses corpos foram instrumentados em faces opostas com sensores de deslocamento relativo (Figura 18) e submetidos a um carregamento crescente até a obtenção da ruptura dos mesmos.

Figura 18 – Ensaio de compressão em execução



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Como rege a norma brasileira NBR7190 (ABNT, 1997), os cálculos de resistência e do módulo de elasticidade na direção paralela às fibras da madeira dos corpos de prova ensaiados foram feitos pelas Equações 12 e 13.

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

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (13)$$

Sendo que:

f_{c0} é a resistência à compressão paralela as fibras;

$F_{c0,max}$ é a máxima força de compressão atingida no ensaio do corpo de prova;

A é a área da seção transversal do corpo de prova;

E_{c0} é o módulo de elasticidade da madeira na direção das fibras;

σ são as tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} ; e

ε são as deformações específicas, medidas correspondentes as tensões de 10% e 50% da resistência.

4.4. Ensaio de flexão em corpos de prova

Com o intuito de obter as propriedades mecânicas da madeira utilizada em cada viga reforçada, optou-se por extrair e submeter ao ensaio de flexão, amostras das vigas ensaiadas. Apesar do ensaio padronizado pela norma brasileira no anexo B item B14.4 (ABNT, 1997) determinar corpo de prova prismático com dimensões 5 cm x 5 cm x 115 cm, foram extraídas, de cada viga, amostras nas dimensões 4 cm x 4 cm x 70 cm, pois foram as dimensões possíveis, isentas de defeitos, extraídas do material ensaiado. Ao total, foram extraídas nove amostras de flexão. Essas foram submetidas ao ensaio de flexão em três pontos com vão livre entre apoios de 60 cm, mantendo assim, a mesma relação $L/h = 15$ para que a parcela de cisalhamento pudesse ser desprezada, corroborando com Souza (2013), e por ter sido a relação utilizada no ensaio de flexão em escala real.

O ensaio decorreu com aplicação de carregamento monotônico crescente de forma lenta e com monitoramento do deslocamento vertical, ambos no meio do vão como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Ensaio de Flexão de três pontos em amostra extraída de viga



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

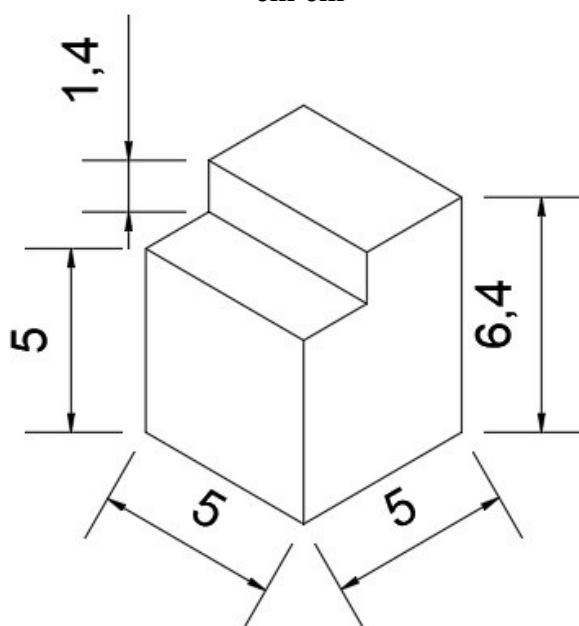
Para o cálculo da resistência convencional à flexão e do módulo de elasticidade longitudinal foram utilizadas as Equações 4 e 6, indicadas no anexo B da norma brasileira (ABNT-NBR 7190, 1997) e utilizadas em seções anteriores.

4.5. Ensaio de cisalhamento

Para verificar as máximas tensões cisalhantes possíveis de se atuar na seção da viga reforçada, buscou-se realizar o ensaio de cisalhamento, em que os planos de corte dos corpos estivessem submetidos a apenas um elemento do MLC reforçado (madeira, linha de cola, linha de reforço de Vectran com resina EPI e PU e reforço de Sisal com resina EPI e PU).

Para isso, foram extraídos três corpos de prova no padrão indicado pela NBR7190 (ABNT, 1997), demonstrados na Figura 20, para cada elemento considerado variável nas vigas. Não foram confeccionados corpos de prova com reforço de Curauá, pois com esse reforço não se obteve resultado satisfatório nos ensaios de flexão das vigas reforçadas como será demonstrado mais adiante.

Figura 20 – Corpo de Prova para ensaio de cisalhamento Padrão ABNT com dimensões em cm



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Figura 21 – Corpos de prova de Cisalhamento padrão NBR7190 (ABNT, 1997)



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

Apesar de existir controvérsia na questão da confiabilidade desse método para a caracterização do cisalhamento, principalmente quando há a presença do reforço com fibras, pois é um material com propriedades de rigidez e resistência distintas da madeira e da resina, um estudo paralelo, realizado por Ribeiro (2018) abordou essa análise, por método numérico, utilizando modelagens no *software* ANSYS no pacote *static structural*, e de ensaios experimentais, e verificou o método da NBR7190 (ABNT, 1997), bem como outros dois métodos em seu estudo, que podem ser aplicados, efetivamente, para o dimensionamento de madeira laminada colada, reforçada por fibras.

Dessa forma, foi adotado o método para o ensaio de 18 corpos de prova na situação de cisalhamento por compressão, utilizando o acessório de cisalhamento da máquina universal de ensaios da EMIC (Figura 22). O ensaio foi controlado por meio da programação do equipamento, seguindo um carregamento monotônico crescente com taxa de incremento de 6250 N/min recomendado na norma brasileira NBR7190 (ABNT, 1997).

Figura 22 – Ensaio de cisalhamento em corpo de prova por meio do uso do acessório EMIC para ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

A resistência ao cisalhamento de cada corpo de prova ensaiado foi calculada conforme anexo B da norma brasileira NBR7190 (ABNT, 1997) pela Equação 14 apresentada a seguir.

$$F_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A} \quad (14)$$

Sendo que:

$F_{v0,max}$ é a máxima força cortante atingida no ensaio do corpo de prova;

A é a área da seção cisalhada;

f_{v0} é a resistência ao cisalhamento atingido pelo corpo de prova.

4.6. Análise numérica

Neste estudo, foi realizada a modelação numérica para analisar o comportamento estrutural de uma viga das vigas de madeira reforçadas com fibras Vectran. Para isso, foi utilizado o *software* ANSYS WORKBENCH 19.0, amplamente reconhecido por sua capacidade de simulação por elementos finitos (FEM), com seu recurso *static structural*. Para

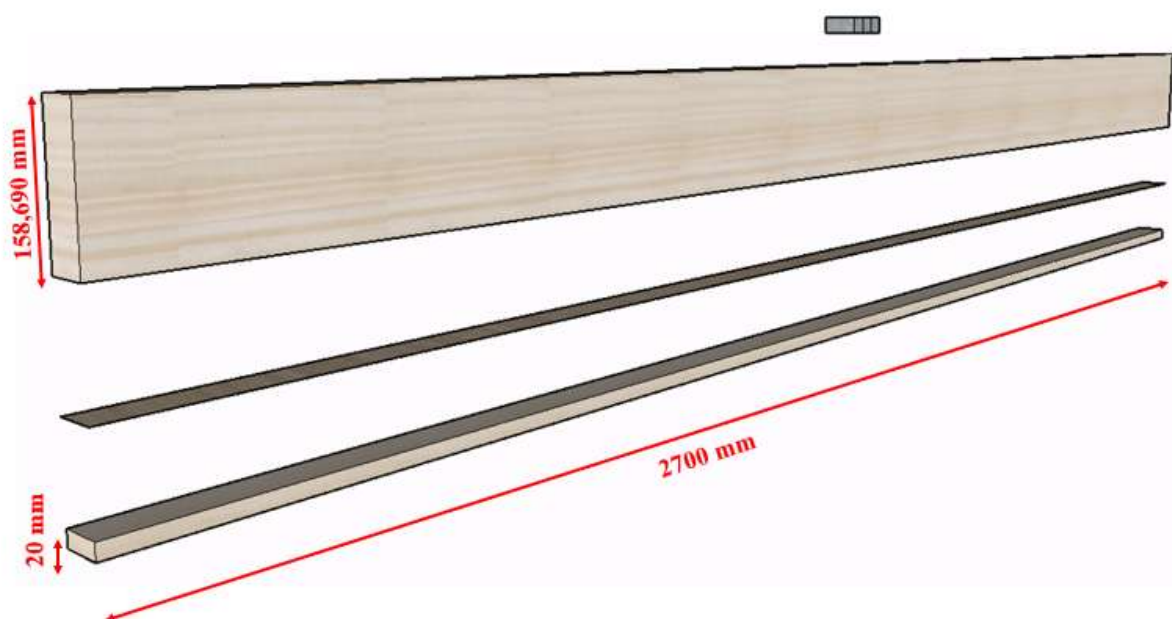
essa análise, foram criados dois modelos de vigas, uma com reforço de fibras Vectran e o outro sem o reforço de fibras.

Para o modelo sem reforço, a viga de madeira foi simulada como um sólido com altura final da viga de 178,69 mm (direção y) e sua de largura 52,74 mm (direção z), valores médios obtidos das vigas utilizados nos ensaios experimentais (Tabela 4), e foi utilizado 2700 mm de vão livre entre apoio (direção x), mesmo vão padronizado nos ensaios experimentais.

Para o modelo com reforço de fibra, a viga de madeira foi simulada com dois sólidos, um acima da linha do reforço com altura de 158,69 mm e um abaixo da linha do reforço com 20 mm mantendo, assim, a altura total de 178,69 mm, mesma situação utilizada na parte experimental, em que o reforço se encontra entre as duas últimas lamelas da viga MLC. Já o reforço posicionado entre os dois sólidos foi simulado como uma casca com 0,6 mm de espessura.

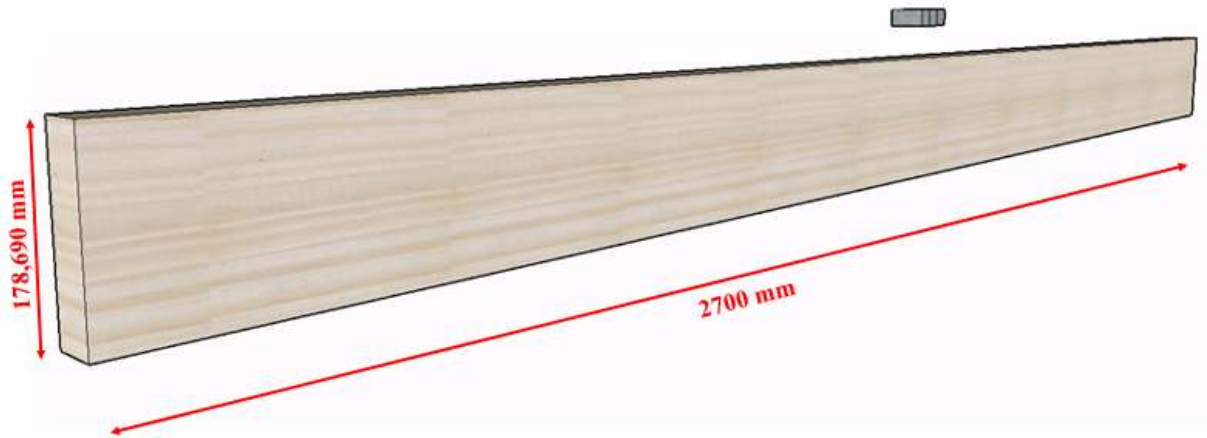
Em ambos os modelos também foi modelada uma placa sobre a viga, centralizada no meio do vão e com largura igual à da viga e comprimento de 100 mm, utilizada para simular a aplicação do carregamento. Os dois modelos utilizados são apresentados com suas dimensões nas Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 – Modelo numérico com aplicação do reforço entre as últimas lamelas de madeira



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

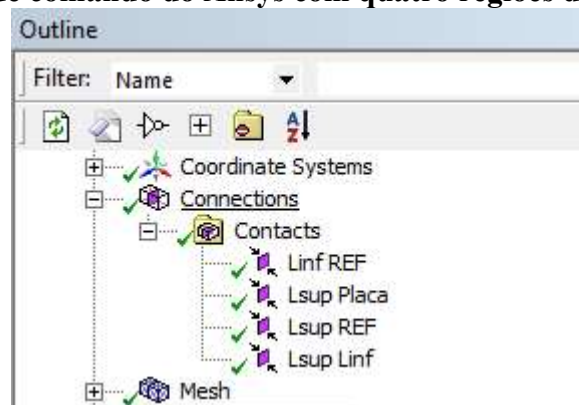
Figura 24 – Modelo numérico sem a presença do reforço



Fonte: Elaborada pelo autor (2018).

O programa identificou quatro regiões de contato (Figura 25) necessárias para classificar a forma como interação, sendo o contato entre a placa atuadora de força e a região superior da viga (Lsup), a região superior da viga e o reforço de fibra (REF), a lamela inferior (Linf) da viga e o reforço e, por fim, a região superior da viga e a lamela inferior.

Figura 25 – Arvore de comando do Ansys com quatro regiões de contato identificadas



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Para os contatos Linf REF, Lsup REF e Lsup Linf foi considerada a opção *bonded* no programa, que considera que não há deslizamento ou separação entre os elementos em contatos (ANSYS, INC, 2024). Já para o contato Lsup Placa foi considerada a opção *rough*, que considera que não há deslizamento entre os elementos, podendo haver separação.

Na simulação realizada foram utilizados os elementos ***Solid186***, ***Targe170***, ***Conta174*** e ***Shell181***, selecionados automaticamente pelo programa, devido a sua melhor adequação às características do modelo e às condições de contorno impostas.

O elemento ***Solid186*** é um elemento tridimensional (3D) com 20 nós, cada um com três graus de liberdade (translações em X, Y e Z), utilizado para modelar sólidos sendo possível uma alta precisão na representação de deformações e tensões em simulações não-lineares, indicado para a análise de estruturas com grandes deformações ou em contato (ANSYS, INC, 2024).

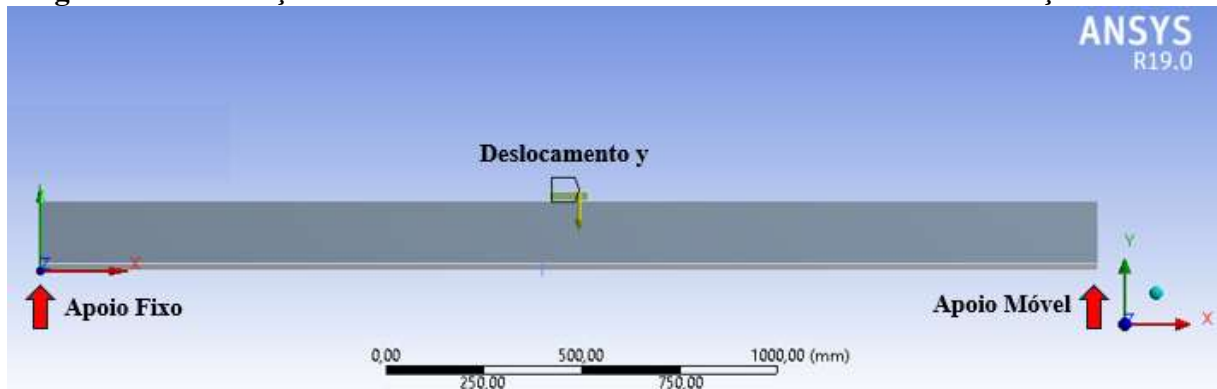
Já o elemento ***Target170*** é usado para definir superfícies-alvo em análises de contato, podendo ser aplicado em superfícies rígidas ou flexíveis, permitindo que a simulação capture o comportamento do contato entre diferentes partes da geometria. O elemento ***Conta174*** complementa o ***Target170*** e é utilizado para modelar a superfície de contato, definindo a parte da geometria que entra em contato com a superfície-alvo (definida pelo ***Target170***). Esse elemento é capaz de captar comportamentos de contato complexos, como fricção e separação, garantindo que a interação entre as superfícies seja modelada com precisão (ANSYS, INC, 2024).

Por fim, o elemento ***Shell181*** é um elemento de casca (*shell*) adequado para modelar estruturas finas, possuindo quatro nós com seis graus de liberdade cada (translações e rotações), o que permite capturar a flexão, torção e as deformações na membrana de reforço (ANSYS, INC, 2024).

Como condições de contorno foram considerados um apoio fixo em um lado da viga, um apoio móvel no lado oposto. O carregamento aplicado foi gerado por um deslocamento vertical em y realizado pela placa (Figura 26), simulando o comportamento ocorrido nos ensaios experimentais.

Como propriedades de materiais, a placa central foi simulada como aço de comportamento elástico isotrópico módulo elasticidade 200Gpa. A madeira foi considerada com comportamento elástico bilinear, apresentando valor de elasticidade igual aos obtidos nos ensaios experimentais e módulo secante com redução de 28,86% do módulo de elasticidade ao atingir 60% da tensão de ruptura, conforme observado em (DONADON *et al.*, 2020).

Figura 26 – Condições de contorno utilizadas nos modelos com e sem reforço de fibras



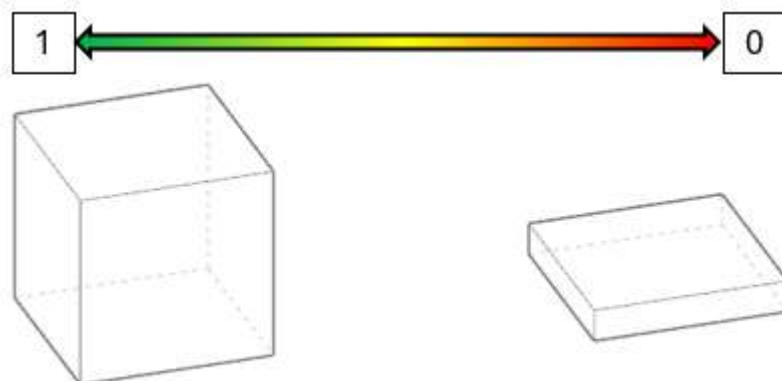
Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

As calibrações dos modelos foram feitas utilizando os dados obtidos nos ensaios experimentais, levando em consideração as propriedades mecânicas dos materiais utilizados, as forças aplicadas para cada ensaio e seus deslocamentos equivalentes.

O teste das malhas utilizadas foi realizado por meio de duas etapas de verificações. A primeira etapa consistiu em verificar a qualidade da malha por meio de um recurso próprio do ANSYS, o *element quality*, e a segunda etapa consistiu em avaliar a convergência da malha.

A medida do *element quality*, realizada pela programa é baseada em uma razão entre o volume e a soma dos contornos ao quadrado, sendo essa medida variável de 0 a 1, em que 0 seria um elemento sem volume e 1 um elemento numericamente perfeito como exemplificado na Figura 27 (ANSYS, INC, 2024).

Figura 27 – Representação da medida do parâmetro *element quality*



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A segunda etapa consistiu em avaliar a convergência da malha, para estimar o erro de discretização gerado na simulação. Dentre os métodos existentes optou-se pelo método reconhecido chamado de método GCI, baseado na extrapolação Richardson (RE). Esse método

é muito utilizado em análises numéricas de dinâmica dos fluidos para determinar erros de discretização, sendo o método indicado pela *Journal of fluids Engineering* (ASME, 2008).

Para verificação da %GCI de convergência, o método determina a escolha de pontos-chave para a verificação da convergência em três tamanhos de malha (ASME, 2008). Para isso, foram escolhidos três pontos de tensões normais posicionados nos extensômetros E0, E1 e E2, e três pontos de deslocamentos nas posições dos transdutores de deslocamento LVDT1, LVDT2 e LVDT3.

O método também determina que os pontos-chave sejam simulados numericamente em três malhas com uma razão entre seus tamanhos calculadas, sendo essa razão maior que 1,3 calculados pela Equação 15.

$$R = \frac{h_{grossa}}{h_{fina}} \quad (15)$$

Sendo que:

r é a razão entre a dimensão da malha mais grossa pela mais fina;

h_{grossa} é a dimensão menos refinada de malha;

h_{fina} é a dimensão mais refinada de malha;

A razão utilizada foi escolhida com o valor de 2, por ter sido a razão empregada em trabalhos similares com madeira reforçada (RIBEIRO, 2018).

A dimensão de malha menos refinada foi determinada como de tamanho 20 mm, por ser a menor dimensão de aresta das lamelas de madeira utilizadas na simulação. Em seguida, para se calcular o tamanho das duas próximas malhas foi utilizada a Equação 15, sendo, então, utilizados os tamanhos de malha 20 mm, 10 mm e 5 mm neste trabalho.

Com os resultados dos postos-chave obtidos para cada malha, foi calculada a ordem de convergência (p) pela Equação 16:

$$p = \frac{\ln \left(\frac{\Phi_3 - \Phi_2}{\Phi_2 - \Phi_1} \right)}{\ln (r)} \quad (16)$$

Sendo que:

p a ordem de convergência;

Φ_i o resultado do ponto-chave calculado na simulação;

i indicação da malha sendo a 1 a mais refinada e 3 a menos refinada.

Como próximo passo, o método requer calcular o erro relativo pela equação:

$$\varepsilon_{i+1,i} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1} \quad (17)$$

Sendo que:

$\varepsilon_{i+1,i}$ é o erro relativo entre os resultados de duas malhas;

Φ_i o resultado do ponto-chave calculado na simulação;

i indicação da malha sendo a 1 a mais refinada e 3 a menos refinada.

E, por fim, calcular o índice GCI pela equação:

$$GCI_{i+1,i} = \frac{1,25 \cdot \varepsilon_{i+1,i}}{r^p - 1} \quad (18)$$

Sendo que:

$\varepsilon_{i+1,i}$ é o erro relativo entre os resultados de duas malhas;

Φ_i o resultado do ponto-chave calculado na simulação;

i indicação da malha sendo a 1 a mais refinada e 3 a menos refinada.

Para o teste de convergência foram utilizados os dados dos obtidos nos ensaios de laboratório e foi tomada, como referência, a viga VSR para verificação se há proximidade dos dados simulados com os obtidos em laboratório.

A partir do que foi avaliado na literatura, passa-se aos resultados desta pesquisa, bem como as discussões pertinentes aos objetivos propostos inicialmente.

5. Resultados e discussões

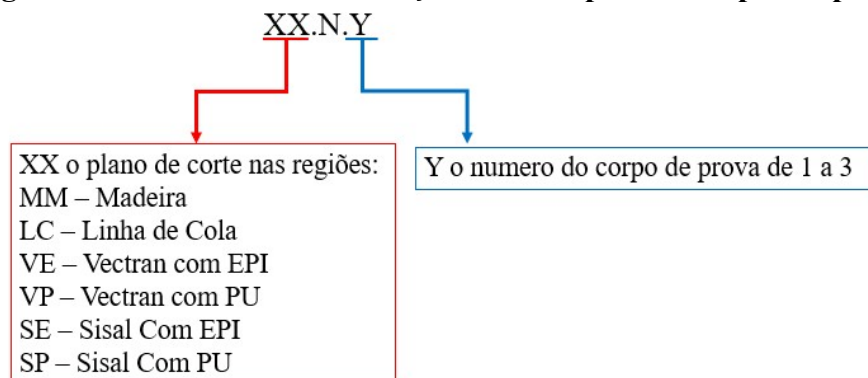
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados no laboratório, bem como análises e discussões sobre os achados da pesquisa.

5.1. Caracterização por cisalhamento

Com o intuito de avaliar como o reforço auxilia na situação de solicitação cisalhante, foram verificadas as tensões limites de cisalhamento na seção com reforço. Para isso, foram realizados ensaios, no mesmo padrão de corpo de prova da NBR 7190 (ABNT, 1997), comparando os resultados com plano de cisalhamento na região predominada com reforço de fibras e resina, com o plano concentrado na região da madeira.

Para a identificação dos corpos de prova foi adotada a nomenclatura em que as primeiras letras XX representam o elemento que o plano de corte é definido, seguido da letra N, para representar que o corpo de prova segue o padrão da norma brasileira, e com terminação em numeral, em referência ao número do corpo de prova, representado pela letra Y.

Figura 28 – Padrão de identificação adotado para os corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na Tabela 6 são apresentados os dados da resistência ao cisalhamento dos corpos de prova, em que o plano de corte passa pelo elemento madeira e linha de cola.

Tabela 6 – Tensões de cisalhamento em corpos de prova sem a presença do reforço

MM.N.1	MM.N.2	MM.N.3	MÉDIA	D.PAD
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
8,37	7,10	3,09	7,74	0,90

LC.N.1	LC.N.2	LC.N.3	MÉDIA	D.PAD
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
9,15	7,80	6,60	7,85	1,28

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os dados apresentados possibilitam a comparação com as resistências obtidas com o ensaio no plano dos reforços, bem como também indicam que o adesivo EPI utilizado para a colagem das lamelas de madeira atende ao requisito da norma NBR7190 (1997), em que a resistência da linha da cola deve ser superior a resistência da madeira, possibilitando o seu uso.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento para os reforços de fibras de Sisal e Vectran, bem como com as duas resinas utilizadas na região do reforço, EPI e PU, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados obtidos com o ensaio de cisalhamento na linha de reforço de fibra dos corpos de prova

VE.N.1	VE.N.2	VE.N.3	MÉDIA	D.PAD
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
10,73	6,30	8,59	8,54	2,22

VP.N.1	VP.N.2	VP.N.3	MÉDIA	D.PAD
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
9,83	13,62	13,20	12,22	2,08

SE.N.1	SE.N.2	SE.N.3	MÉDIA	D.PAD
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2,50	3,27	3,09	2,96	0,40

SP.N.1	SP.N.2	SP.N.3	MÉDIA	D.PAD
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
2,23	2,98	2,34	2,52	0,41

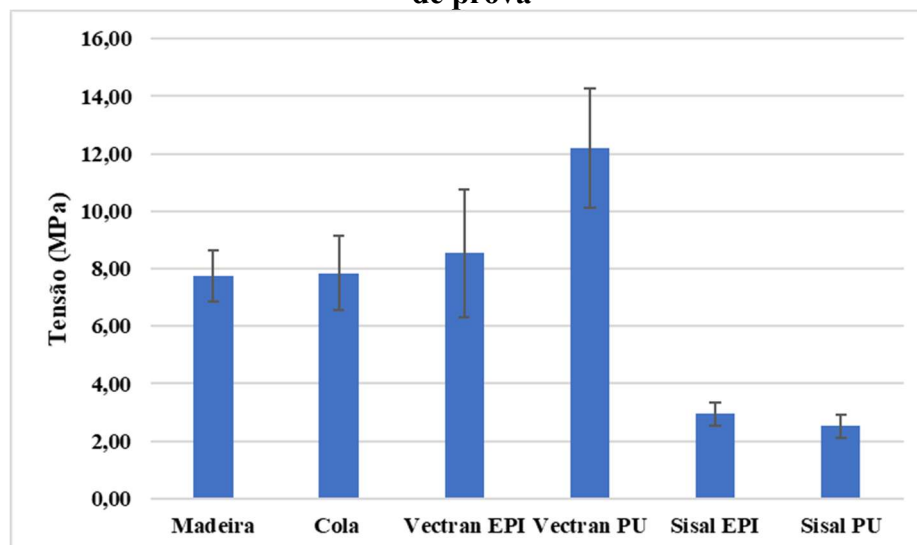
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os resultados da Tabela 7 indicam que o reforço aplicado de Sisal, tanto para o reforço aderido com adesivo EPI, bem como com PU, não foram efetivos, tendo sua ruptura

por cisalhamento na interface do reforço, apresentando valores muito abaixo dos valores atingidos pela madeira, 62% e 67% da resistência respectivamente, como também da linha da cola. Tais resultados podem indicar um possível problema durante o processo de colagem, possivelmente uma impregnação não efetiva do material, uma vez que a manta de Sisal apresenta muitos vazios, ou uma má interação desse tipo de reforço com os adesivos utilizados, ou seja, não há conexão química e/ou mecânica entre adesivo e fibra, sendo, portanto, recomendado estudo de adesividade entre o Sisal e os vários adesivos. Porém, o reforço com fibras de Sisal apresenta resultados satisfatórios em outros estudos que utilizaram a resina epóxi. Portanto, este trabalho vai ao encontro dos resultados apresentados na literatura, em que a resina epóxi é altamente recomendada a ser utilizada na interface madeira e fibra (CARVALHO, 2005; DONADON, 2016; ISSA; KMEID, 2005; RIBEIRO, 2018).

Por meio da comparação dos dados das Tabelas 6 e 7, também é possível notar que os valores médios de resistência, atingidos no ensaio, com o plano no reforço de Vectran foram superiores aos valores médios de resistência da madeira, tanto para o reforço com adesivo EPI como para o adesivo PU, o que indica que esses adesivos se apresentam como possíveis de serem utilizados como matriz para as fibras Vectran, porém, recomenda-se avaliar esses adesivos com o teste de delaminação para determinar a limitação de seu uso. O adesivo EPI por ter apresentado uma variabilidade que permeia alguns valores de resistência da madeira (Figura 24), recomenda-se seu dimensionamento com coeficientes de redução de resistência de cerca de 0,90, como sugerido por Ribeiro (2018). Já o adesivo PU, para sua aplicação com o *Pinus elliottii* e Vectran, apresentou, mesmo com sua variabilidade (Figura 24), valores superiores aos obtidos com a madeira e linha de cola, sendo o adesivo mais recomendado para essa aplicação em conjunto com o adesivo epóxi, verificado em Donadon (2016).

Figura 29 – Valores médios e variabilidade das resistências ao cisalhamento dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

5.2. Caracterização por compressão paralela às fibras

Para esta pesquisa, o lote de madeira *Pinus elliottii* foi caracterizado pelo ensaio de 15 amostras retiradas das vigas, por compressão paralela às fibras, em conformidade com norma brasileira NBR7190 (ABNT, 1997). Pelos dados obtidos nos ensaios e pelas Equações 12 e 13, apresentadas em seções anteriores, foram calculados os valores resistência e módulo de elasticidade paralelo às fibras, sendo esses apresentados na Tabela 8.

Os valores obtidos no ensaio para a caracterização do lote estão em conformidade com os valores sugeridos no anexo E da NBR7190 (ABNT, 1997), que apresenta valor médio de resistência à compressão de 40,4 MPa e módulo de elasticidade de 11889 MPa, valores respectivamente cerca de 19% e 20,5% maiores que aqueles da amostra dessa pesquisa, mas dentro da variação obtida no ensaio, validando-se, assim, a caracterização feita.

Tabela 8 – Dados de resistência e módulo de elasticidade, paralelo às fibras, obtidos por meio de ensaio padronizado de compressão

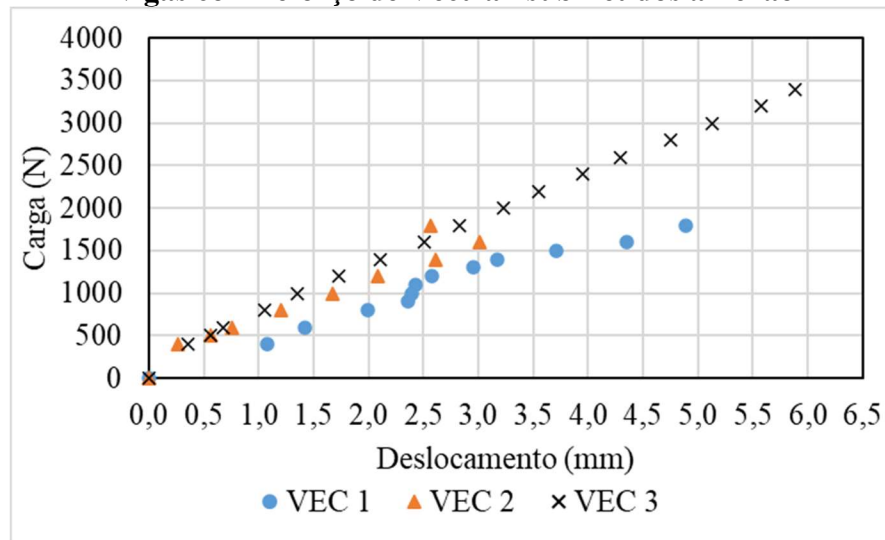
Amostra	f_{c0} MPa	E_{c0} MPa
1	40,14	11765
2	33,82	9756
3	39,10	11905
4	38,76	11628
5	38,56	8929
6	34,22	7843
7	44,46	12500
8	35,53	10101
9	35,68	9302
10	34,77	9581
11	26,54	9249
12	22,62	9581
13	31,96	11841
14	25,42	7143
15	26,17	6695
MÉDIA	33,85	9854,50
DP	6,25	1794,38
CV	18,5%	18,2%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

5.3. Caracterização por flexão

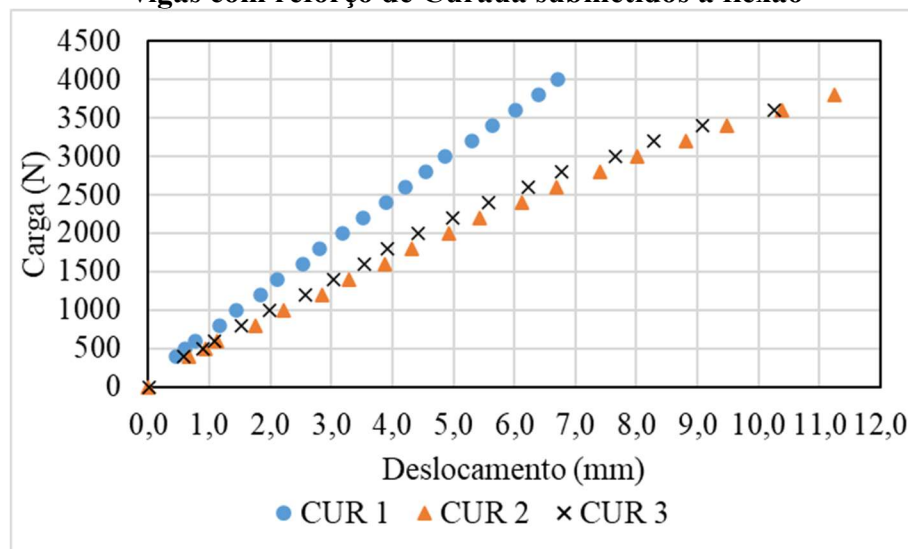
Tal como foi realizado nas caracterizações anteriores, seguindo os padrões da norma brasileira (ABNT NBR 7190-1997), também foram realizados ensaios de flexão, porém, com as dimensões dos corpos de prova adaptadas às amostras usadas nesta pesquisa. Os corpos de prova extraídos das vigas foram identificados de acordo com sua viga de origem, recebendo o mesmo nome. Os resultados obtidos foram separados por categoria de reforço e são apresentados nas Figuras 30 a 32.

Figura 30 – Resultados de força por deslocamento de corpos de prova retirados das vigas com reforço de Vectran submetidos à flexão



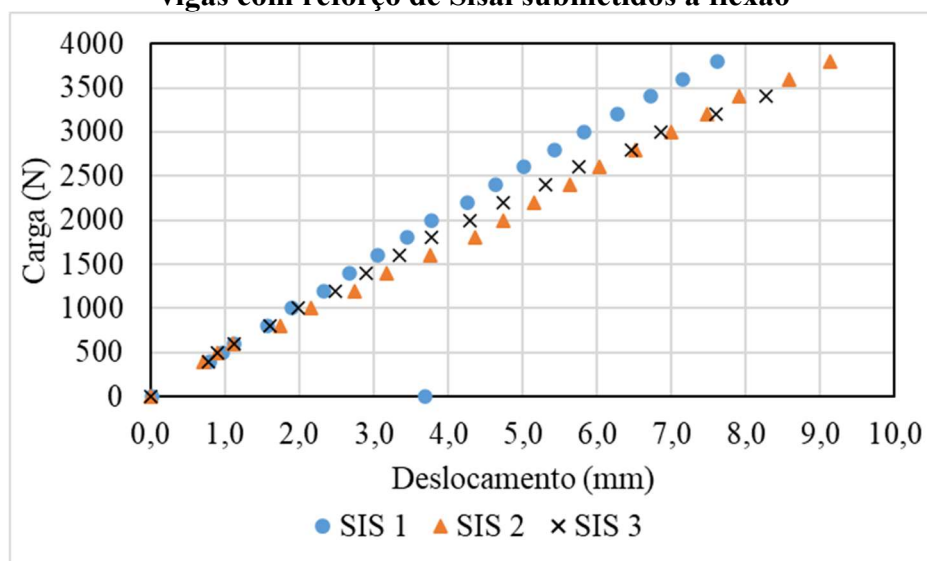
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 31 – Resultados de força por deslocamento de corpos de prova retirados das vigas com reforço de Curauá submetidos à flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 32 – Resultados de força por deslocamento de corpos de prova retirados das vigas com reforço de Sisal submetidos à flexão



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Por meio das Equações 4 e 6, apresentadas em seções anteriores, e dos dados dos ensaios (Figuras 26 a 28), foi possível calcular os valores do módulo de elasticidade (E_m) e de ruptura (f_m), sendo estes dados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados de módulo de elasticidade e resistência de corpos de prova de madeira *Pinus elliotti*

Amostra	f_m MPa	E_m MPa
VEC1	40,78	8113
VEC2	78,75	10986
VEC3	88,59	11719
SIS1	80,16	10817
SIS2	66,09	8716
SIS3	73,13	8789
CUR1	84,38	12408
CUR2	66,09	7031
CUR3	53,44	7533
Média	70,16	9568
D. Pad.	15,41	1946
Var.	22%	20%

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Comparando os valores obtidos no ensaio de caracterização por compressão (Tabela 8) com os valores obtidos no ensaio de flexão (Tabela 9), é possível notar que os módulos de elasticidade médios nos dois ensaios se aproximam. Esse resultado era esperado, apesar de advirem de ensaios diferentes. No entanto, os valores de resistência à compressão e do módulo de resistência à flexão (a tração de um modo geral induz o resultado) apresentam uma grande discrepância. Apesar de ser esperado esses valores diferentes, tal amplitude para as resistências foi elevada, cerca de duas vezes, observando que para essa relação, os dados da NBR7190/97 resultam em 1,65 vezes.

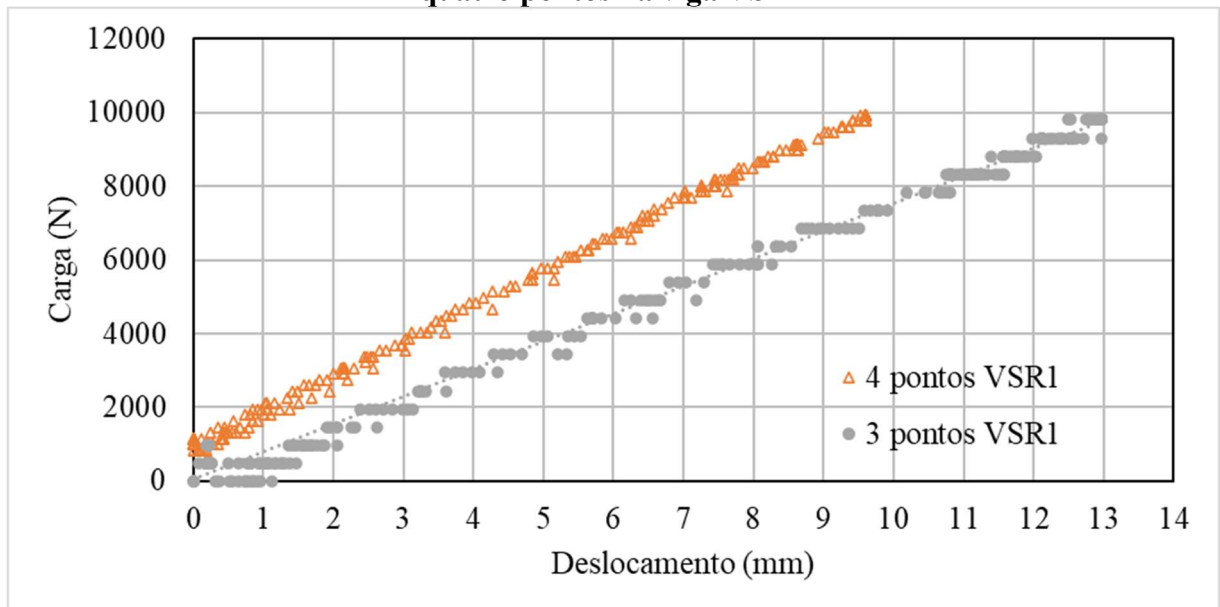
5.4. Ensaio de vigas em escala real

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o ensaio de flexão das vigas em escala real, sem reforço e reforçadas com fibras Vectran, Sisal e Curauá, bem como as devidas análises dos resultados com relação aos valores obtidos em seções anteriores.

5.4.1. Ensaio de flexão Vigas sem reforço

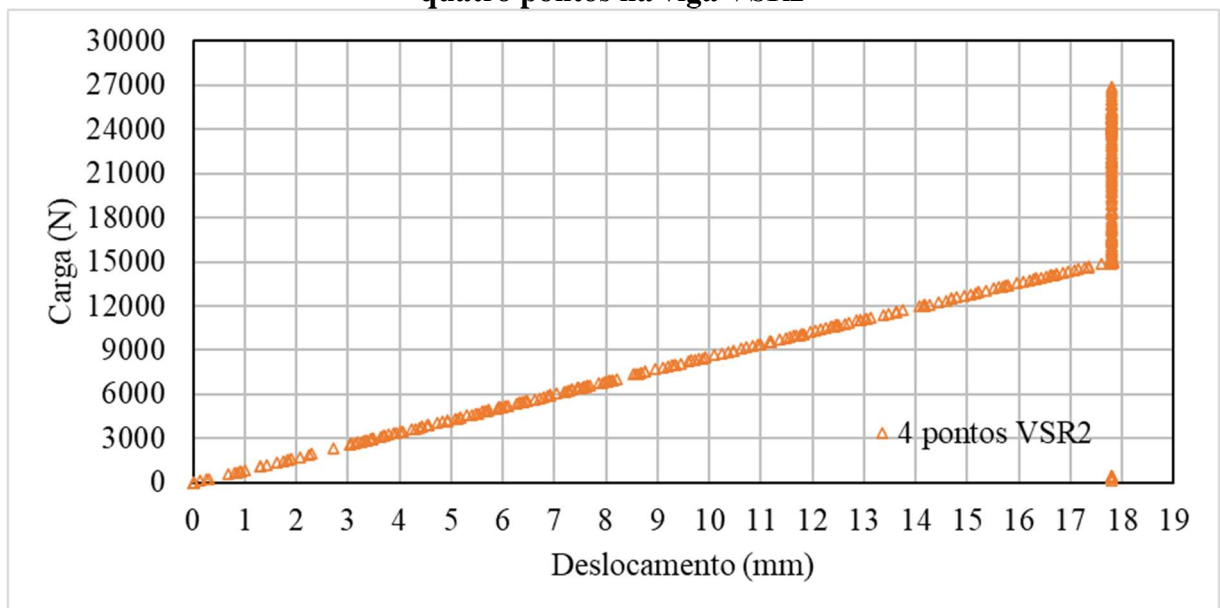
As vigas em escala real VSR1 e 3 foram submetidas ao ensaio de flexão de três pontos, enquanto as vigas VSR1 e 2 foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos, como demonstrado na seção de metodologia. As vigas VSR2 e VSR3 foram levadas até a ruptura, porém, para não danificar os equipamentos transdutores de deslocamento, os mesmos foram retirados após atingir mais de 50% da força prevista de ruptura. Os resultados de deslocamentos foram obtidos pelo LVDT posicionado na região central da viga (Figura 13) e apresentados com sua força correspondente por meio das Figura 33 a apresentadas a seguir.

Figura 33 – Dados de carregamento e deslocamentos obtidos no ensaio de flexão a três e quatro pontos na viga VSR1



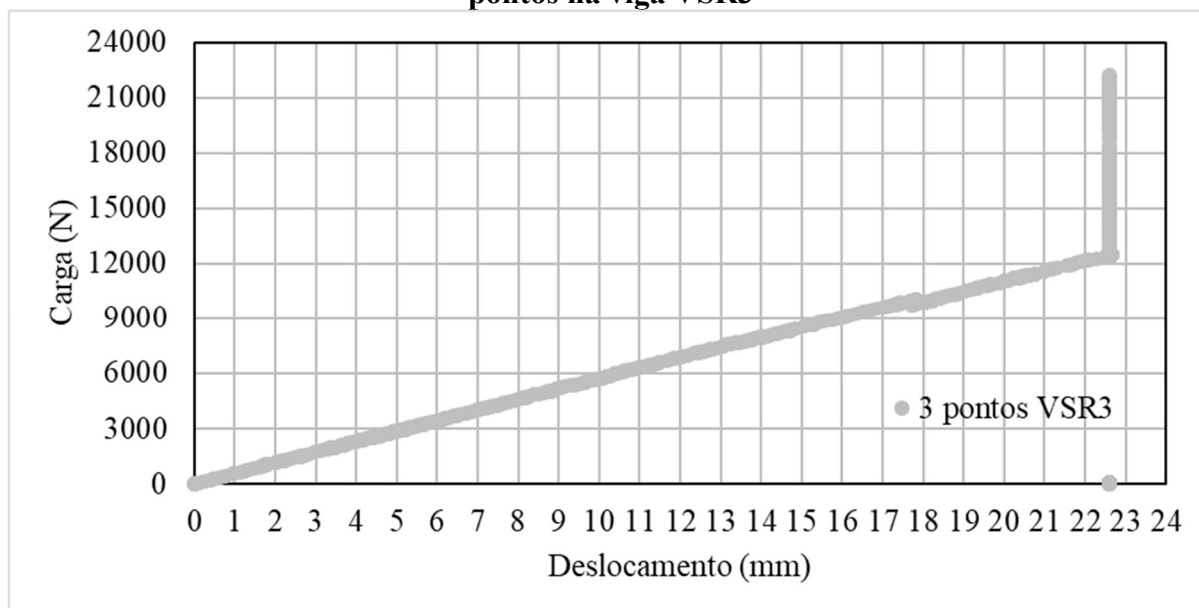
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 34 – Dados de carregamento e deslocamentos obtidos no ensaio de flexão a quatro pontos na viga VSR2



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 35 – Dados de carregamento e deslocamentos obtidos no ensaio de flexão a três pontos na viga VSR3



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Por meio das Equação 4, para o ensaio de flexão a três pontos, e a Equação 5, para os ensaios a quatro pontos, foram calculados os valores de módulo de elasticidade das vigas sem reforço e, por meio da Equação 6, os valores de resistência foram calculados para as vigas que atingiram a ruptura.

Considerando-se as equações anteriormente citadas, os resultados apresentados na Figura 29 indicam, que para a viga VSR1, módulo de elasticidade de 12508 MPa pelo ensaio de três pontos e 13421 MPa para o ensaio de quatro pontos. Para a viga VSR2, os resultados da Figura 30 indicam o módulo de elasticidade de 11459 MPa em flexão a quatro pontos. Por fim, os resultados da viga VSR3, apresentados na Figura 31, indicam um módulo de elasticidade de 9613 MPa em ensaio de três pontos. Portanto, as vigas em escala real apresentaram um valor médio de elasticidade de 11850MPa e um desvio padrão de 1623 MPa. Para os valores de resistência à flexão, as vigas VSR2 e VSR3, que apresentaram valores de forças de ruptura de 26860 N e 22210 N respectivamente, exibiram valores de resistência de 43 MPa e 53 MPa respectivamente. Os resultados de rigidez (EI) calculados com as equações citadas são apresentados na Tabela 10, sendo esses valores-base referência para a análise das vigas reforçadas.

Tabela 10 – Resultados de rigidez obtidos nos ensaios de flexão das vigas sem reforço

Amostra	Ensaio	EI N.mm ² .10 ⁹
VSR 1	3 Pontos	314,7
	4 Pontos	337,7
VSR 2	3 Pontos	-
	4 Pontos	296,9
VSR 3	3 Pontos	240,9
	4 Pontos	-
Média		297,6
Desvio		41,3
CV		13,9%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A análise dos resultados no módulo de flexão (E) das vigas em escala real em relação aos obtidos nos ensaios de corpo de prova, Tabela 11, indica que, como esperado, a seleção de lamelas e seu correto posicionamento na seção da viga proporciona um melhor aproveitamento das propriedades da madeira do lote caracterizado. Permite, dessa maneira, a obtenção de um material final com propriedades mecânicas melhores do que a madeira serrada isolada.

Tabela 11 – Módulo de elasticidade médio e desvio padrão amostral da madeira em diferentes ensaios

	E _i (MPa)	D. PAD (MPa)
Flexão Escala Real	11850	1623
Flexão corpo de prova	9568	1946
Compressão corpo de prova	9854	1794

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já a análise das resistências convencional na flexão (f_i) média obtidas nos ensaios de escala real e corpos de prova, Tabela 12, demonstrou que o valor médio obtido com o ensaio em escala real se situou entre os valores obtidos nos ensaios de compressão e flexão de corpo de prova, o que indica um melhor aproveitamento das diversas resistências presentes nas lamelas, como se espera para uma peça composta por lamelas como o MLC.

Tabela 12 – Resistência última média e desvio padrão amostral da madeira em diferentes ensaios

	f_i (MPa)	D. PAD (MPa)
Flexão Escala Real	48,3	7,4
Flexão corpo de prova	70,2	15,4
Compressão corpo de prova	33,9	6,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Da mesma forma, os modos de ruptura observados nos ensaios das vigas VSR2 e VSR3 (Figura 36 e Figura 37), ocorreram de forma frágil. Apesar da viga VSR3 ter apresentado plastificação na região superior, os modos de ruptura condizem com os esperados para vigas sem reforço.

Figura 36 – Modo de ruptura da viga sem reforço VSR2



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 37 – Modo de ruptura da viga sem reforço VSR3



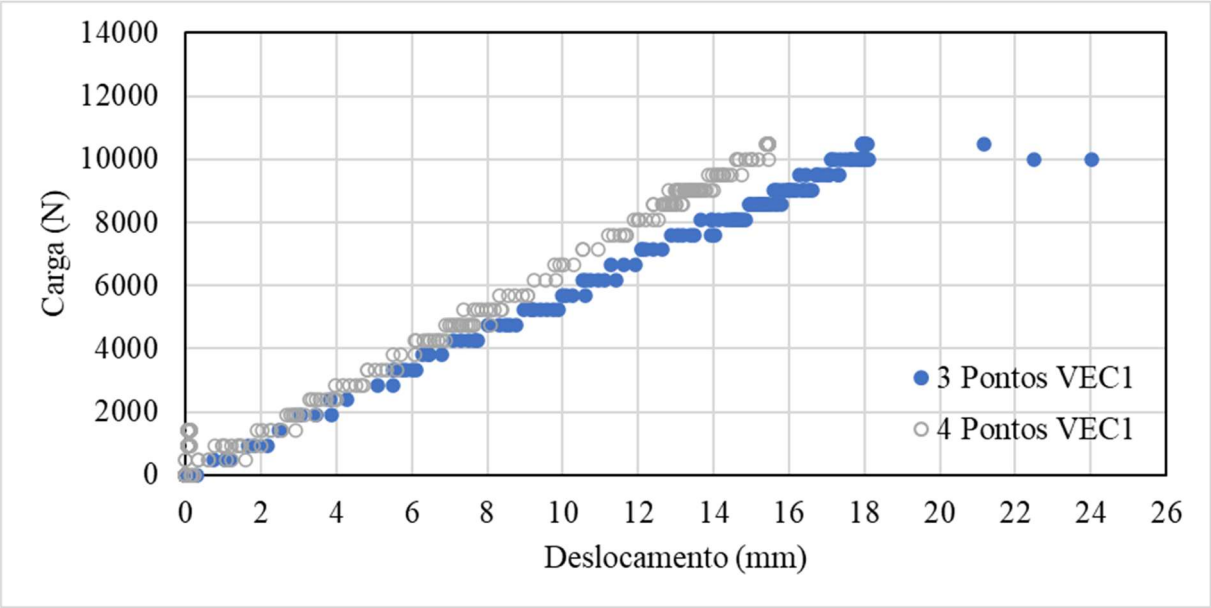
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Como previsto e descrito no início desta pesquisa, os ensaios em escala real apresentaram dados diferentes dos corpos de provas, pois levam em consideração as variáveis que, em corpos de prova isentos de defeitos, não estariam presentes, como nós e mudança de inclinação de fibra, demonstrando assim, a importância da realização de ensaios neste formato.

5.4.2. Vigas reforçadas com Vectran

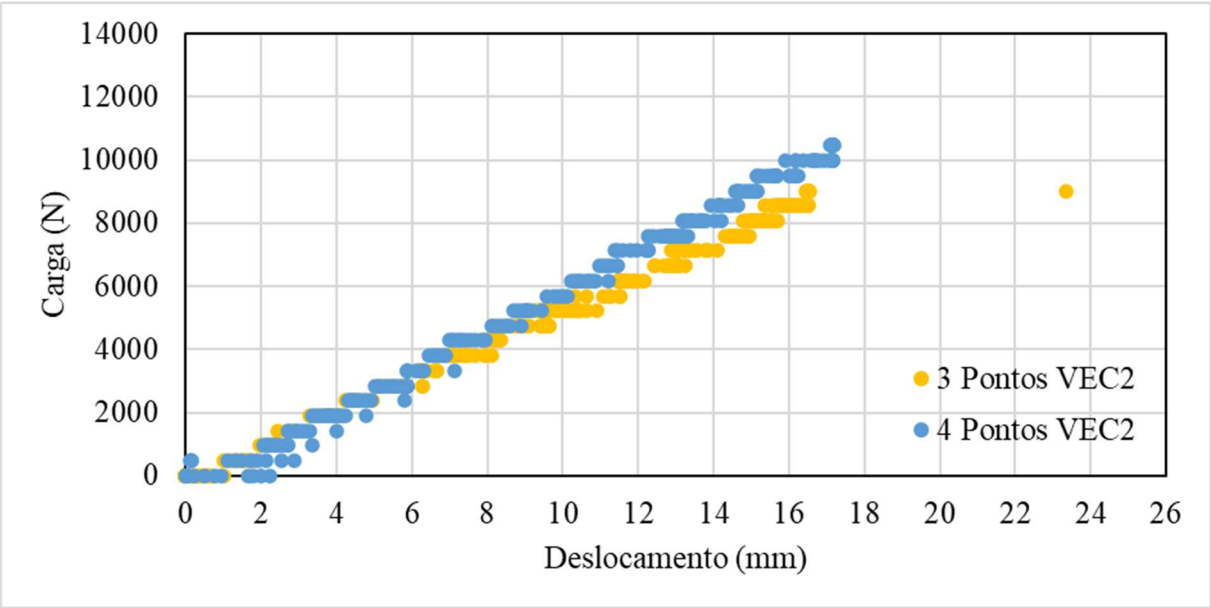
Os ensaios das vigas reforçadas com Vectran seguiu os protocolos determinados e utilizados anteriormente com as vigas sem reforço, assim, os ensaios das vigas puderam ser comparados como referência às vigas sem reforço. Os resultados coletados nos ensaios resultaram nas correlações de força e deslocamento dos apresentados nas Figura 38 a Figura 40.

Figura 38 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Vectran VEC1



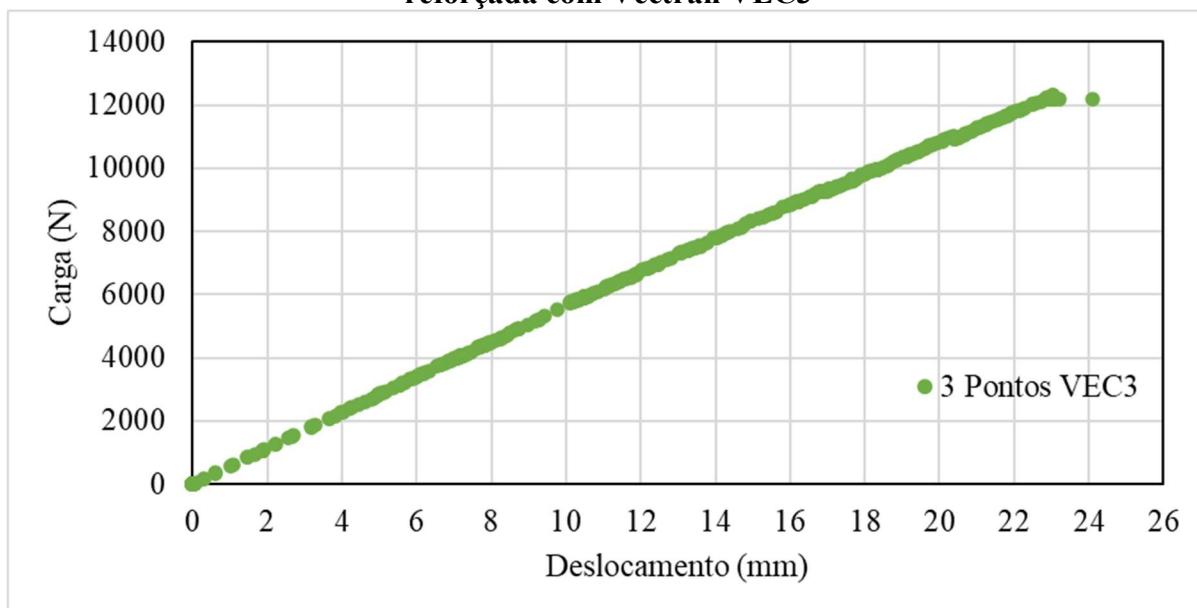
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 39 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Vectran VEC2



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 40 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Vectran VEC3



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As vigas VEC1, VEC2 e VEC3 foram submetidas a flexão até atingir a ruptura, em que esses limites de força foram respectivamente, 20440N, 19010N e 21500N, que, pela Equação 6, foram calculados os valores de resistência para as vigas, e esses resultados apresentados na Tabela 13. Também foram calculados para as vigas os valores de rigidez para cada viga pelas Equações 4 e 5, sendo esses resultados também apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Tabela resumo de dados de ruptura, resistência e rigidez, coletados nos ensaios de flexão das vigas reforçadas com Vectran

Amostra	Ensaio	$F_{rup.}$ N	f_m	EI $N.mm^2.10^9$
VEC 1	3 Pontos	20440	48,83	223,7
	4 Pontos			235,5
VEC 2	3 Pontos	19010	45,64	221,7
	4 Pontos			220,6
VEC 3	3 Pontos	21500	51,45	227,8
Média			48,64	225,9
Desvio			2,91	6,05

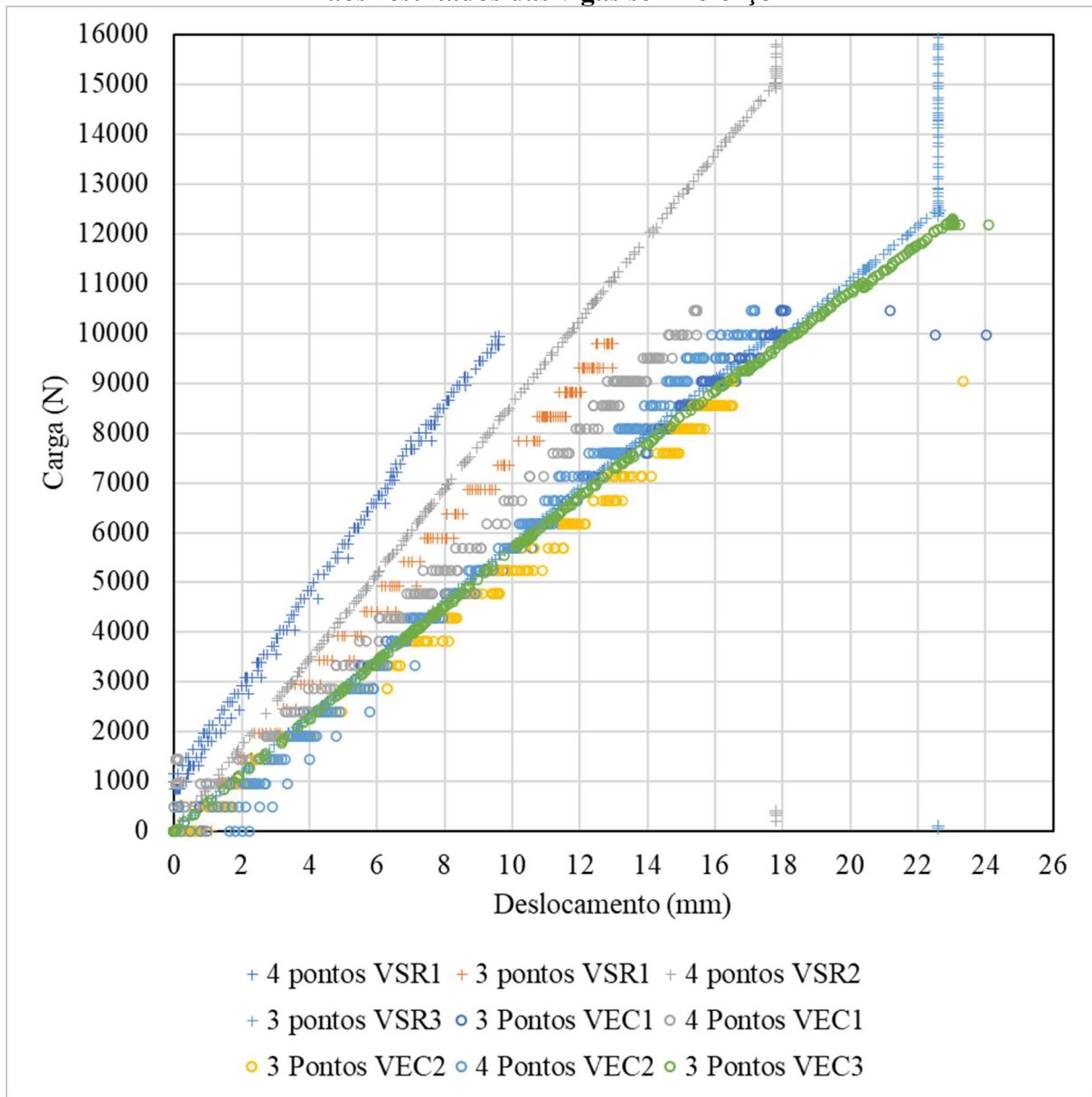
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A comparação entre as rigidezes obtidas entre os ensaios de três e quatro pontos para a viga VEC1 apresentou uma diferença de 5,02% enquanto para a viga VEC2 essa diferença

foi de 0,47%, sendo possível entender que o efeito da cortante no ensaio está de acordo com Souza (2013), sendo bem menor que 10%.

A comparação dos valores obtidos de resistência e rigidez das vigas reforçadas com Vectran, Tabela 13, com as vigas de referência sem reforço, Tabela 10 a 12, demonstra que as vigas Vectran apresentaram uma redução de rigidez de 24,1% e, conseqüentemente, apresentando deslocamentos maiores que as vigas sem reforço, como demonstra a Figura 34. Esse comportamento não era esperado para uma viga reforçada. Já os valores de resistência se aproximaram aos valores obtidos nos ensaios de flexão com uma variação de 1% de diferença entre os valores médios. Porém, como observado em trabalhos anteriores, foi observado uma redução da variabilidade da rigidez em 85%.

Figura 41 – Comparação dos ensaios de flexão da vigas reforçadas com Vectran frente aos resultados das vigas sem reforço



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Apesar dos ensaios de cisalhamento, realizados com as amostras da viga de Vectran apresentarem resistência de colagem semelhante à resistência da madeira, o comportamento estrutural das vigas observado nos ensaios de flexão, em que os valores obtidos foram inferiores e se pressupõem que tenham sido causados devido a pequenos deslocamentos ocorridos na região de interface da madeira com reforço, induzindo a um comportamento de conexão semirrígida. Apesar disso, a teórica foi realizada ainda sob a ótica de uma conexão rígida (colagem perfeita), em que não ocorre esses pequenos deslocamentos, por não ser possível fazer

os estudos necessários para uma abordagem semirrígida no tempo de duração desta pesquisa. Portanto, a abordagem semirrígida fica recomendada a ser realizada em trabalhos futuros.

Adicional à análise da rigidez, foi observado uma redução da variabilidade da rigidez de $41,3 \text{ N.mm}^2(.10^9)$ das vigas sem reforço para $6,05 \text{ N.mm}^2(.10^9)$, correspondendo a uma redução da variabilidade em 85,3%.

As rupturas observadas nas vigas com reforço de Vectran restringiram-se, exclusivamente, a rupturas plásticas, apresentando grandes deformações antes de atingir um estado de ruptura frágil do elemento. Também foi observado que, mesmo após a ruptura do elemento em madeira, as fibras possibilitaram a estabilidade do mesmo, impedindo o colapso dos apoios (Figuras 38 a 40). Além disso, foi constatado que, no ensaio de flexão da viga VEC3, não ocorreu ruptura frágil do elemento, sendo a seção deformada por plastificação até esta atingir metade da seção transversal do elemento, sendo então, interrompido o ensaio (Figura 40).

Figura 42 – Viga VEC1 em seu estado de ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 43 – Viga VEC 2 em seu estado de ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 44 – Viga VEC3 em seu estado de ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

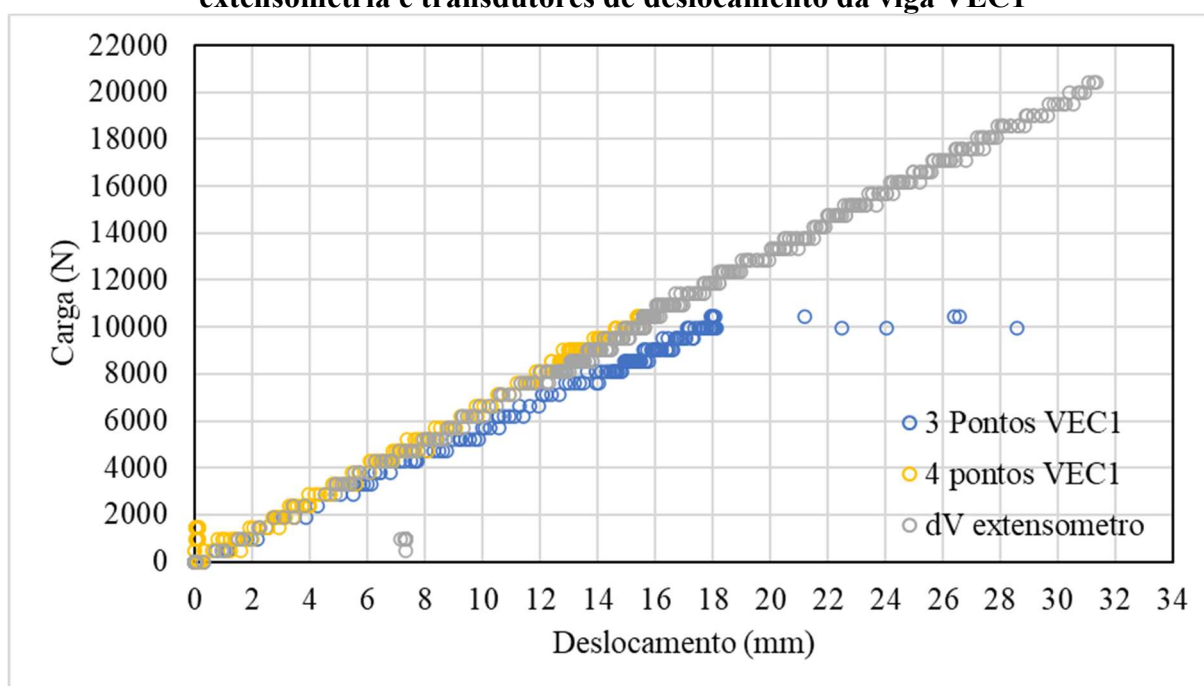
5.4.2.1. Deslocamento via extensometria de vigas com Vectran

A utilização dos extensômetros para se determinar os deslocamentos verticais na ruptura das vigas reforçadas com Vectran foi um recurso necessário, uma vez que os transdutores de deslocamento foram retirados durante o ensaio para se prevenir a danificação do equipamento.

Como descrito no Item 4.2.1.1.1, o cálculo pelos transdutores considerou o raio de curvatura formado durante a flexão e levando a deformações nas vigas, como demonstram as Equações 7 a 9, levando ao final o cálculo do deslocamento vertical no centro do vão pela Equação 10.

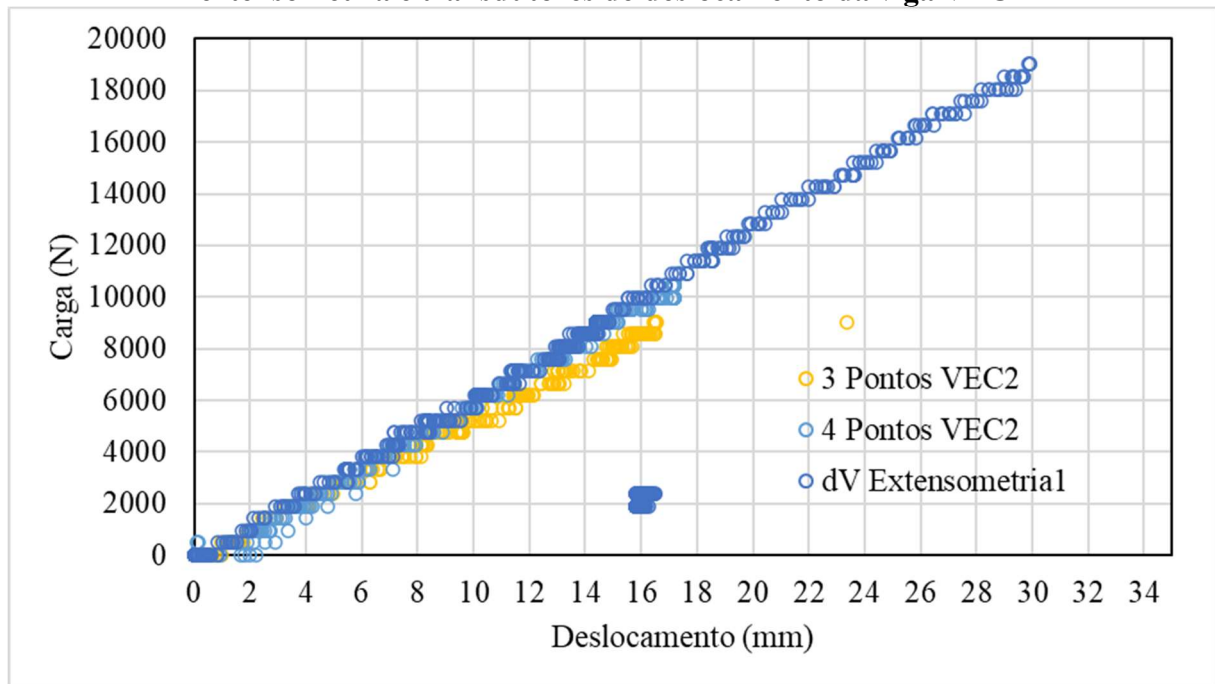
Os resultados calculados de deslocamentos para as leituras obtidas nos extensômetros são apresentados nas Figura 45 a Figura 47, a seguir.

Figura 45 – Resultados de deslocamento por carregamento por meio da análise de extensometria e transdutores de deslocamento da viga VEC1



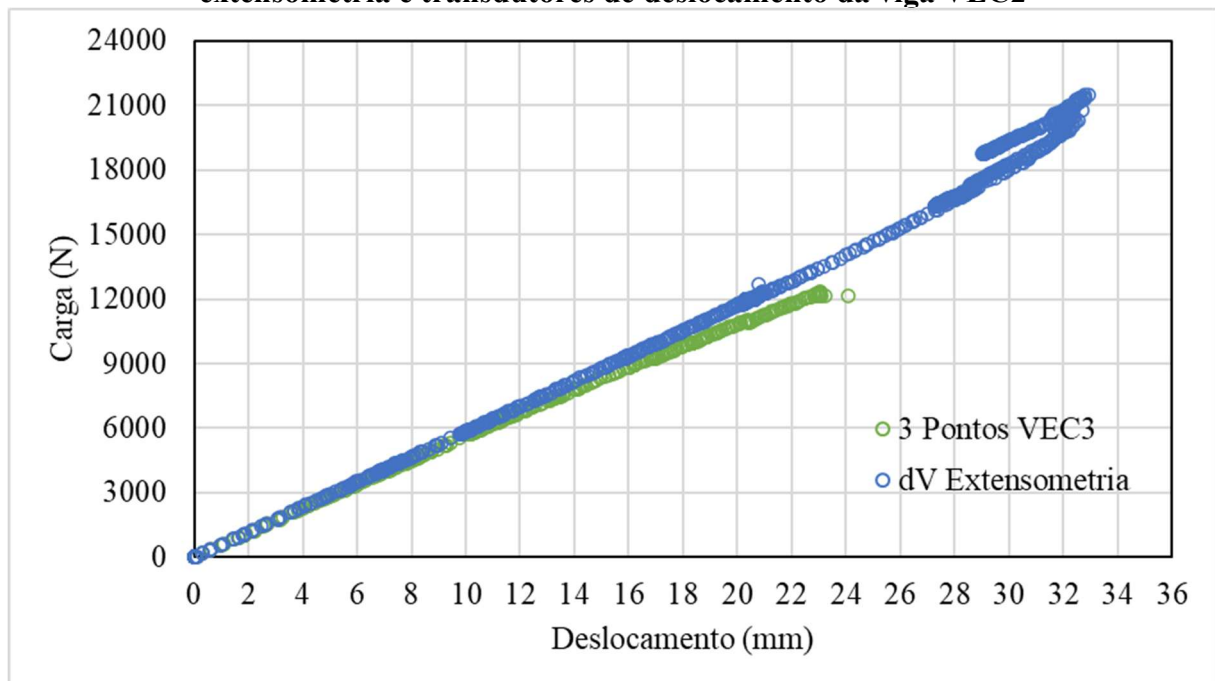
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 46 – Resultados de deslocamento por carregamento por meio da análise de extensometria e transdutores de deslocamento da viga VEC2



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 47 – Resultados de deslocamento por carregamento por meio da análise de extensometria e transdutores de deslocamento da viga VEC2



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por meio das figuras é possível constatar que a curva dos deslocamentos, pela extensometria, aproximou-se das curvas obtidas pelos transdutores de deslocamentos para todas as vigas reforçadas com Vectran. Essa aproximação ocorreu de forma mais efetiva quando se

compara com a curva obtida no ensaio de quatro pontos (Figuras 38 e 39). Tomando-se uma força de referência na curva de transdutor e comparando com o valor calculado pelo extensômetros, para a mesma força, se identifica que, para os ensaios de quatro pontos, a diferença não passa de 1 mm enquanto para os ensaios de três pontos a diferença ficou entre 2,2 mm e 2,6 mm, representando 4% para os ensaios de quatro pontos e até 18% para o ensaio de três pontos, como demonstra a Tabela 15.

Tabela 14 – Valores comparativos de deslocamentos entre métodos de aquisição para as vigas reforçadas com Vectran

Amostra	Força	Δ_{vt}	Δ_{ve}	Dif	Dif
	N	mm	mm	mm	%
vec1 3p	10000	18	15,6	2,4	15
vec1 4p	10000	15	15,6	0,6	4
Vec2 3P	9000	17	14,4	2,6	18
vec2 4p	9000	15	14,4	0,6	4
VEC3	12000	23	20,8	2,2	11

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

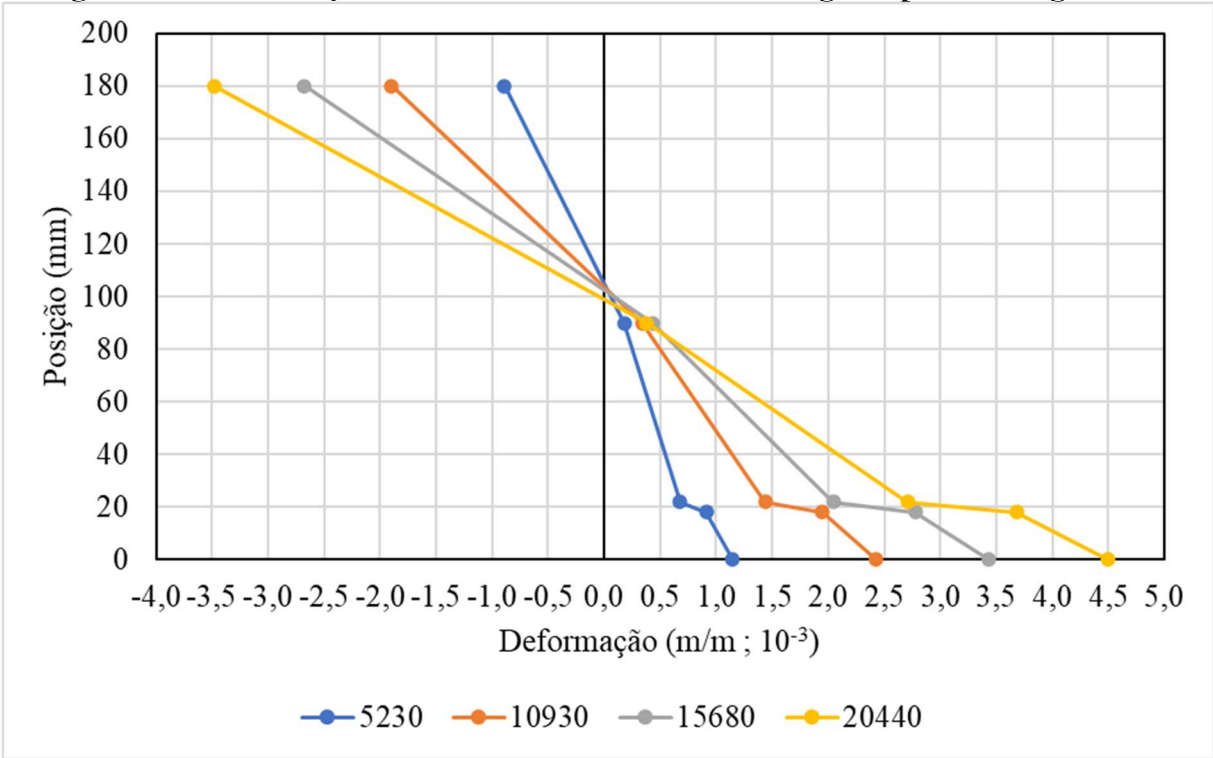
Δ_{vt} Deslocamento vertical via transdutores de deslocamento; Δ_{ve} deslocamento vertical via extensometria.

Com isso, é possível estimar que, no momento da ruptura, as vigas haviam sofrido um deslocamento vertical de 31,1 mm para a VEC1, 29,9 mm para a VEC2 e 32,2 mm para a VEC3.

5.4.2.2. Tensões e deformações para as vigas Vectran

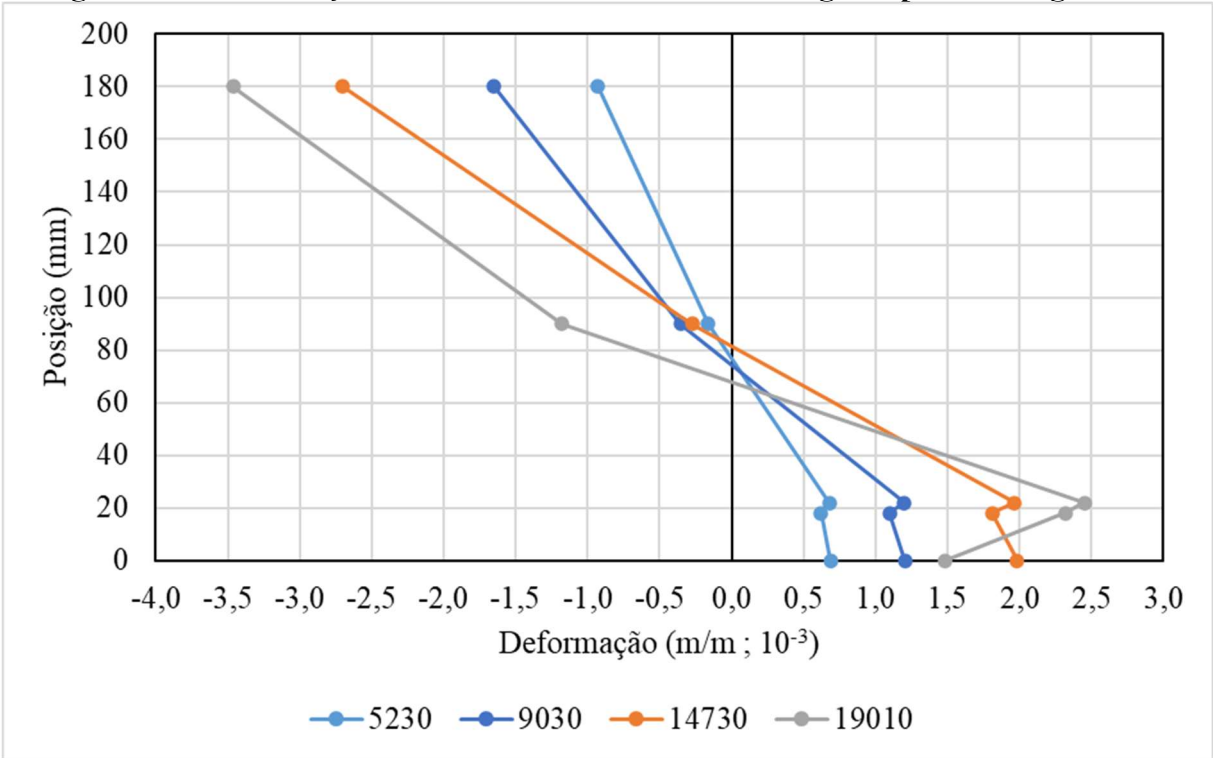
O monitoramento das deformações por extensômetros na seção transversal das vigas reforçadas foi analisada em uma variação de carregamento de 5000 N sendo os dados apresentados a seguir.

Figura 48 – Deformações medidas no sentido axial ao longo do perfil da viga VEC1



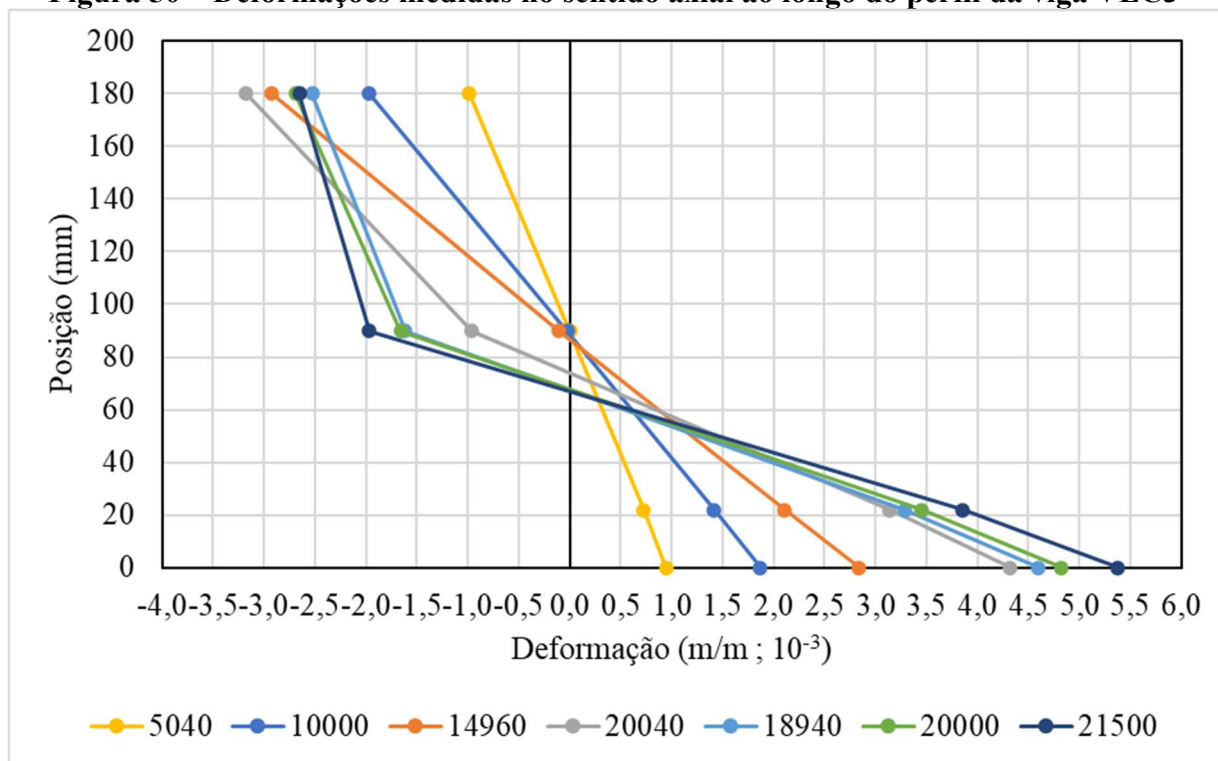
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 49 – Deformações medidas no sentido axial ao longo do perfil da viga VEC2



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 50 – Deformações medidas no sentido axial ao longo do perfil da viga VEC3



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

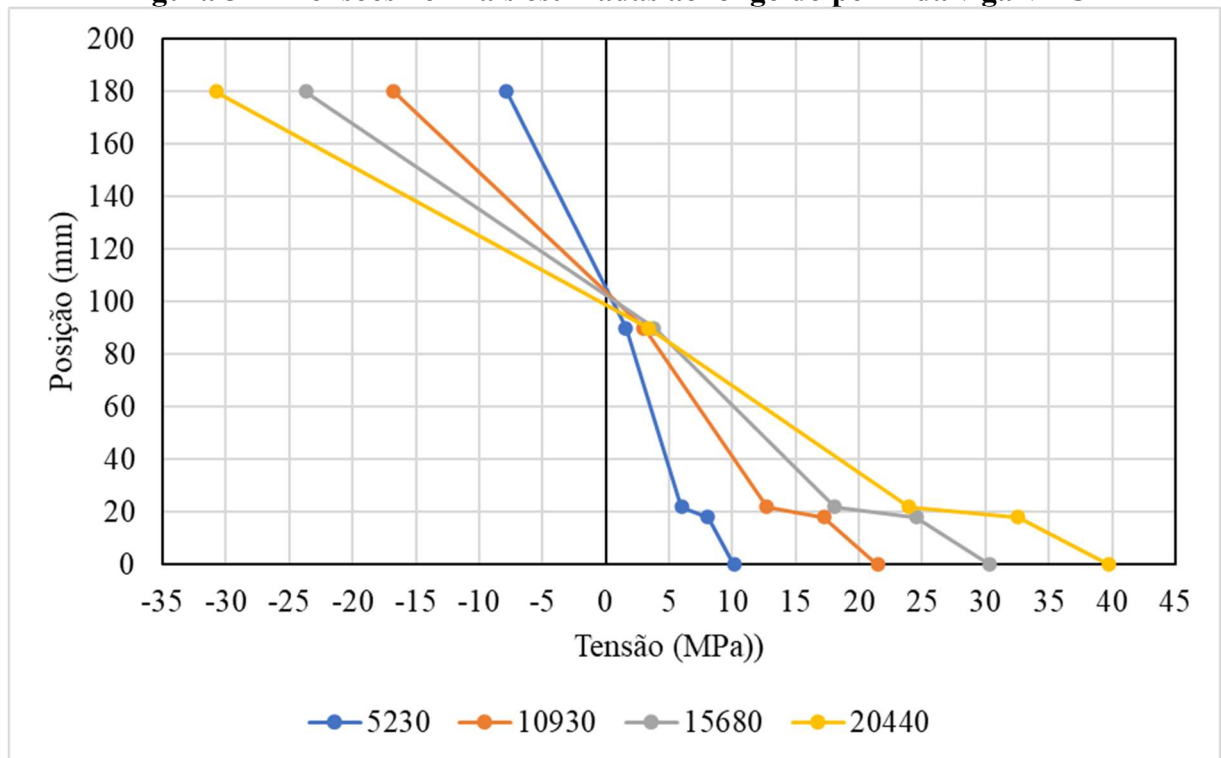
Como pode ser observado nas Figuras 46 a 48, a última lamela das vigas VEC 1 e VEC2 apresentaram deformações destoantes do perfil das demais deformações na seção do perfil, indicando um comportamento semirrígido da viga, devido a presença do reforço.

O reforço de Vectran apresenta uma atuação mais efetiva com o aumento do carregamento atuante na viga, pois o comportamento das deformações das vigas, podem ser observados nas Figuras 45 e 48, o reposicionamento da altura da linha neutra a medida que as forças ficam elevadas, indicando assim uma redistribuição dos esforços, comportamento esse também observado por Donadon (2016) e Victor (2018).

Já nas Figuras 46 e 49, podem ser observados uma não linearidade no perfil de deformação nas regiões comprimidas das vigas. Esse comportamento, também observado por Donadon (2016), demonstra que a região comprimida atingiu o limite de tensões, iniciou o processo de plastificação da região. Portanto, a aplicação do reforço de Vectran fez com que ocorresse uma redistribuição de esforço na seção e controlou a ruptura do elemento, levando a uma ruptura dúctil e mais segura. Esse resultado verificado demonstra a efetividade do reforço das fibras de Vectran.

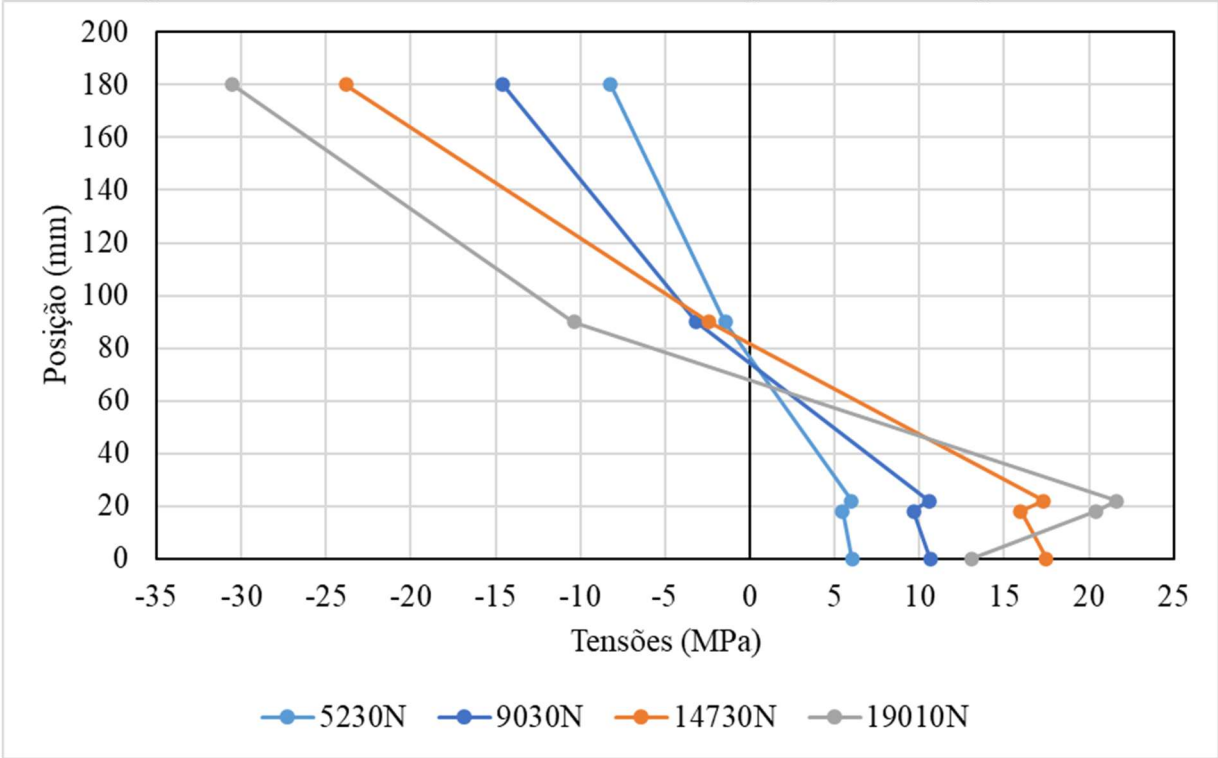
A seguir nas Figura 51 a Figura 53, são apresentados os diagramas de tensões normais atuantes na madeira, calculados pela Equação 11 e os dados obtidos da caracterização da madeira.

Figura 51 – Tensões normais estimadas ao longo do perfil da viga VEC1



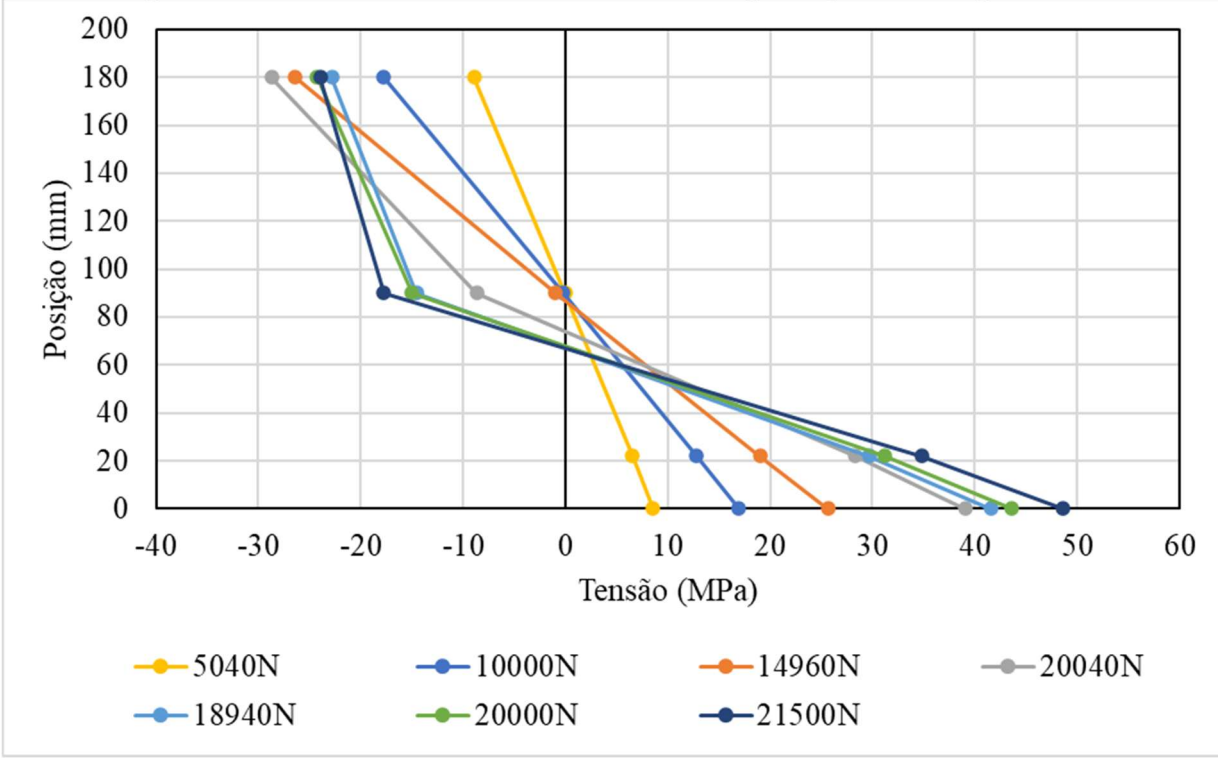
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 52 – Tensões normais estimadas ao longo do perfil da viga VEC2



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 53 – Tensões normais estimadas ao longo do perfil da viga VEC3



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

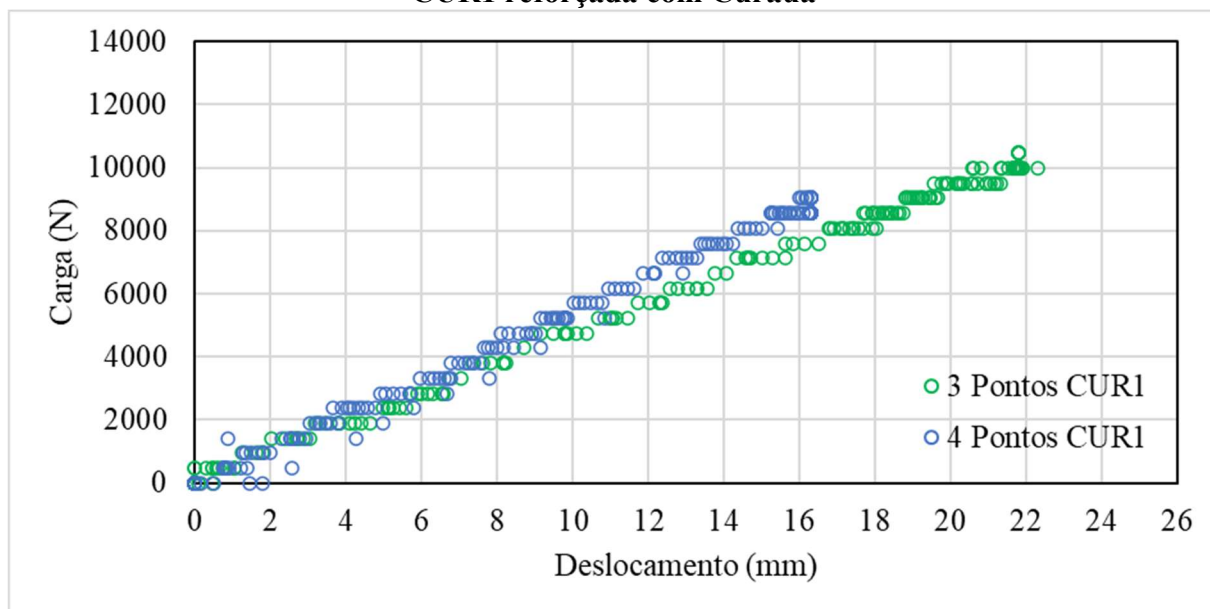
A análise de Tensões apresentadas nas Figuras 47 a 49 demonstra valores inferiores aos calculados por meio da flexão do elemento reforçado, porém, mais condizentes aos resultados obtidos nos ensaios de compressão. Indicando que a aplicação do reforço em vigas de madeira pode elevar, substancialmente, a resistência dos elementos.

Portanto, as fibras Vectran, mesmo apresentando deficiência de aderência, utilizando os adesivos comumente empregados na produção de vigas lameladas coladas, ainda apresentou a alteração do modo de ruptura observado por Donadon (2016), demonstrando a efetividade do uso desse material como PRF.

5.4.3. Vigas Reforçadas com Curauá

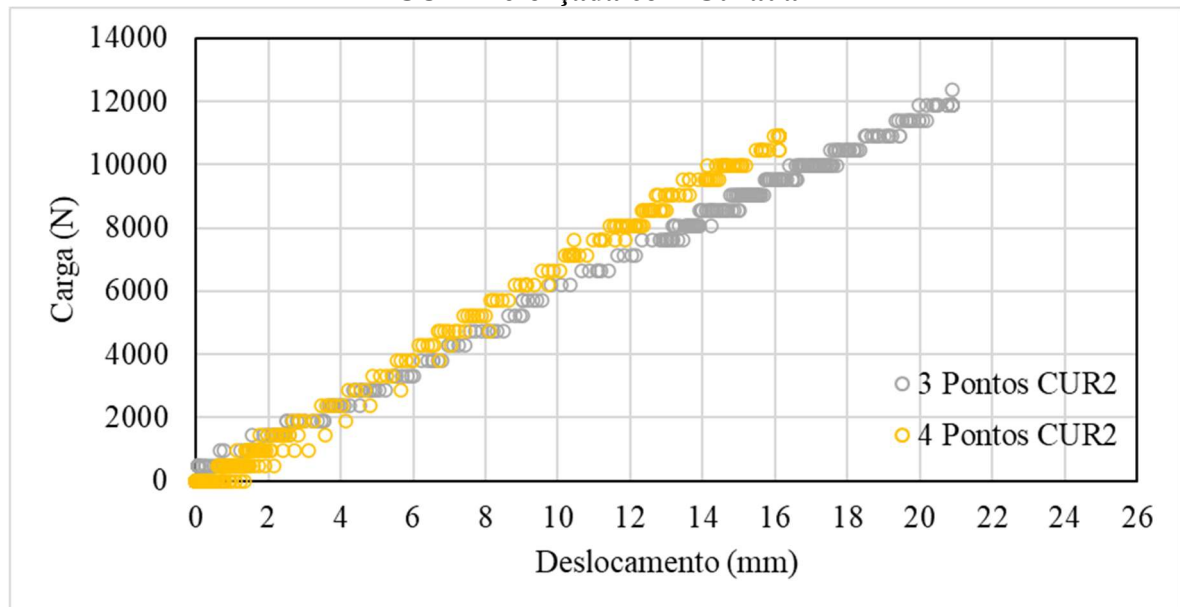
Os ensaios das vigas reforçadas com Curauá, também seguiram os protocolos determinados no capítulo de métodos e utilizados anteriormente com as vigas sem reforço e com Vectran, de forma que os ensaios das vigas pudessem ser comparados com as referências, às vigas sem reforço. Os dados coletados nos ensaios resultaram nas correlações de força e deslocamento apresentados nas Figuras 50 a 52.

Figura 54 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga CUR1 reforçada com Curauá



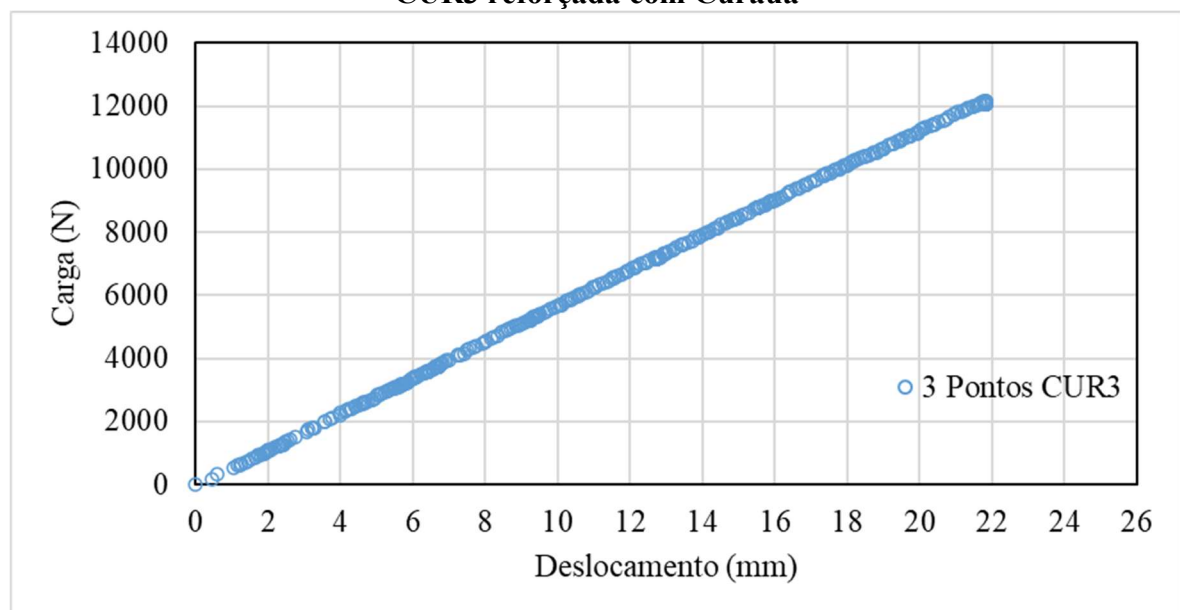
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 55 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga CUR2 reforçada com Curauá



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 56 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga CUR3 reforçada com Curauá



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As vigas CUR1, CUR2 e CUR3 foram submetidas a flexão até atingir a ruptura, em que as forças limites atingidas foram, respectivamente, 16630N, 22810N e 13580N, em que, pela Equação 6, foram calculados os valores de resistência para as vigas, sendo esses dados apresentados na Tabela 15. Também foram calculados, para as vigas, os valores de rigidez (EI) para cada viga pelas Equações 4 e 5, sendo esses dados também apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resumo de resultados de ruptura, resistência e rigidez, coletados nos ensaios de flexão das vigas reforçadas com Curauá

Amostra	Ensaio	Rup. N	fm MPa	EI N.mm².10 ⁹
CUR 1	3 Pontos	16630	40,25	192,22
	4 Pontos			199,61
CUR 2	3 Pontos	22810	55,11	246,04
	4 Pontos			246,57
CUR 3	3 Pontos	13580	32,81	232,11
	4 Pontos			-
Média			42,72	223,31
Desvio			11,35	25,81

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao comparar a rigidez obtida com os ensaios de três e quatro pontos, a viga CUR1 apresentou uma diferença entre seus valores obtidos de 3,70%, enquanto a viga CUR2 apresentou um valor de 0,22% (ΔEI_1 , Tabela 16). Valores esses que corroboram com o estudo de Souza (2013), indicando que os valores estando abaixo de 10%, a influência da cortante pode ser desprezada.

Quando comparado os valores de rigidez das vigas reforçadas (Tabela 15) com os valores médios obtidos para as vigas sem reforço (Tabela 11), percebe-se um decréscimo de resistência de 17,31% a 35,4% (ΔEI_2 , Tabela 16). Os valores obtidos não são os esperados, uma vez que, com o acréscimo de elemento de reforço, seja esperado um aumento da rigidez. Porém, com a análise das vigas reforçadas com Curauá em seu estado de ruptura, que pode ser observado nas Figuras 50 a 52, é possível deduzir que a queda da rigidez se originou de uma deficiência do reforço, associado com uma deficiência da colagem do mesmo.

Ademais, os modos de ruptura notados para as vigas com reforço de Curauá não diferem dos obtidos com elementos sem reforço (Figuras 31 e 32), não sendo constatado rupturas plásticas, nem sequer grandes deformações antes de uma ruptura frágil. Desse modo, pode ser caracterizado como rupturas usuais observadas em vigas de madeira lamelada colada. Nesse contexto, também foi observado que, para todos os casos de reforço com o Curauá, ao atingir a ruptura, o reforço também sofreu ruptura (Figuras 52 a 54).

Tabela 16 – Comparação dos valores de rigidez entre métodos de ensaio e vigas não reforçadas

Amostra	Ensaio	E.I. $10^9.N.mm_2$	ΔEI_1 %	ΔEI_2 %
VSR _m	-	297,55		
CUR 1	3P	192,22	3,70	35,40%
	4P	199,61		
CUR 2	3P	246,04	0,22	17,31%
	4P	246,57		
CUR 3	3P	232,11		21,99%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 57 – Região do reforço da viga reforçada CUR1 após ruptura



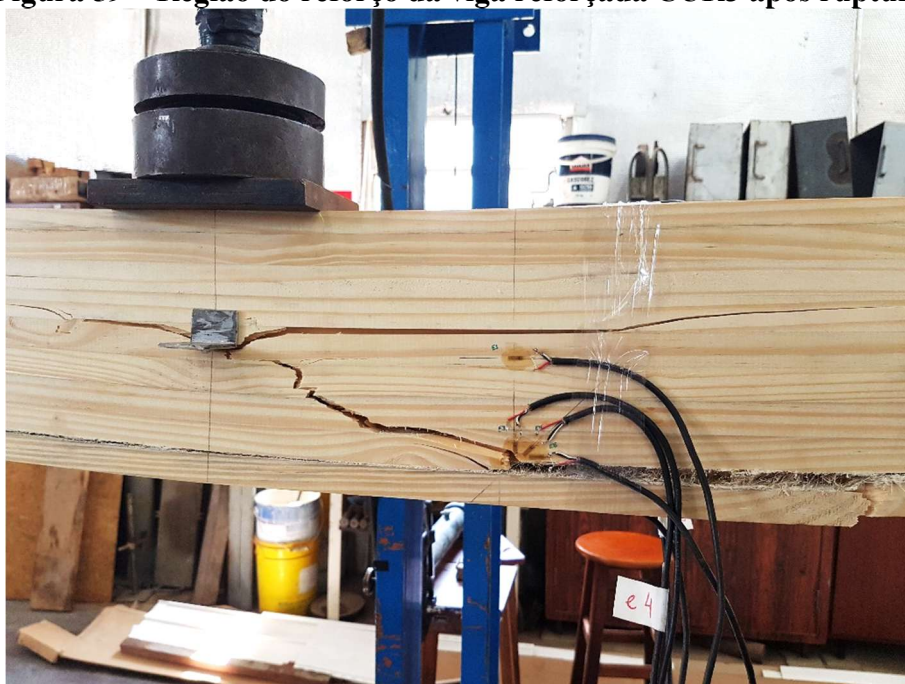
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 58 – Região do reforço da viga reforçada CUR2 após ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

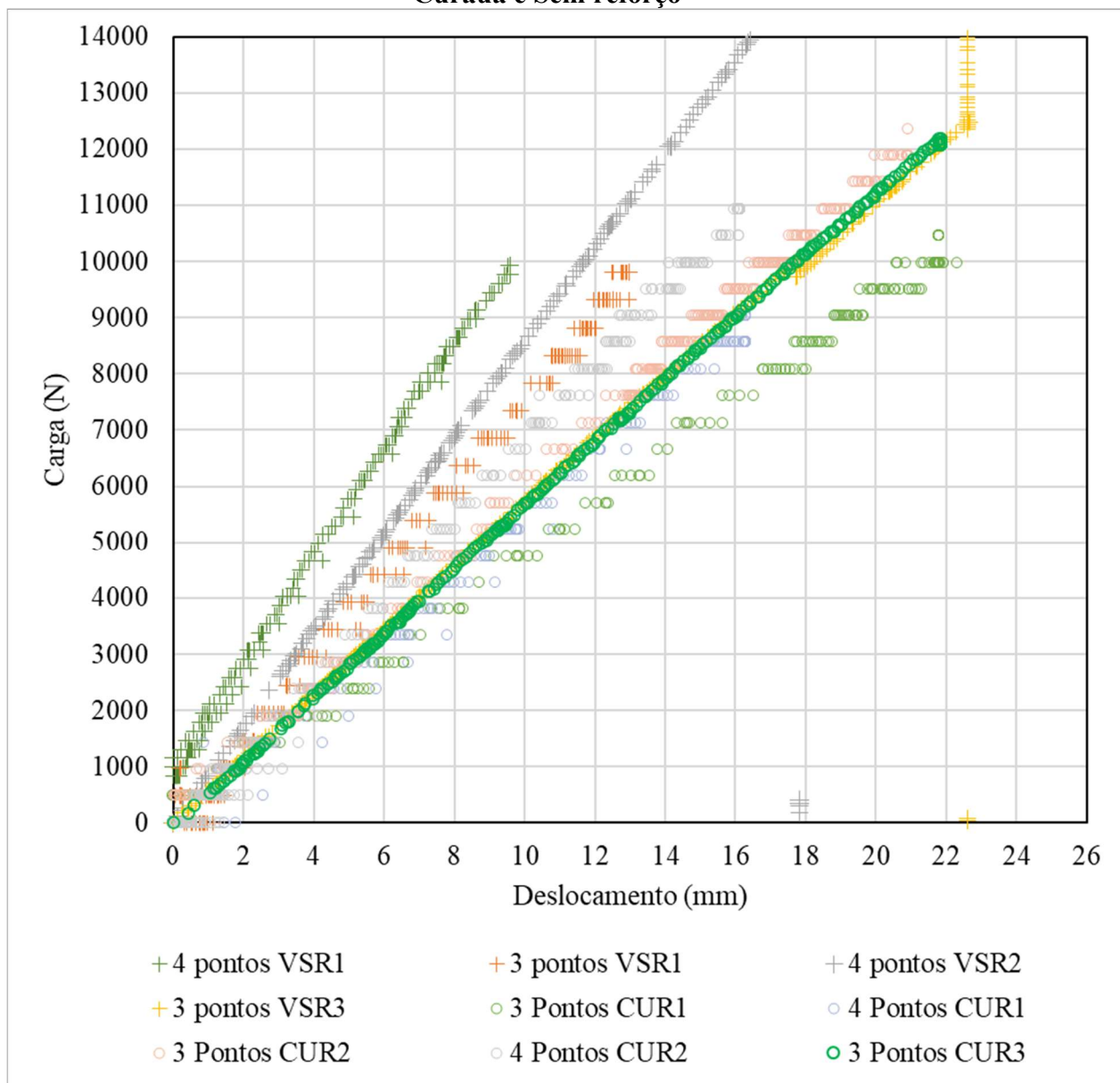
Figura 59 – Região do reforço da viga reforçada CUR3 após ruptura



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A perda de rigidez nas vigas, utilizando a malha de Curauá como reforço, pode ser visualizada pela comparação do comportamento das vigas com e sem reforço, e pelas curvas de Força x Deslocamento (Figura 55). Essa análise torna visível que, para as vigas reforçadas, os deslocamentos verificados foram maiores que o deslocamento sofrido para a viga sem reforço.

Figura 60 – Deslocamento no meio do vão do ensaio de flexão de vigas com reforço de Curauá e Sem reforço



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

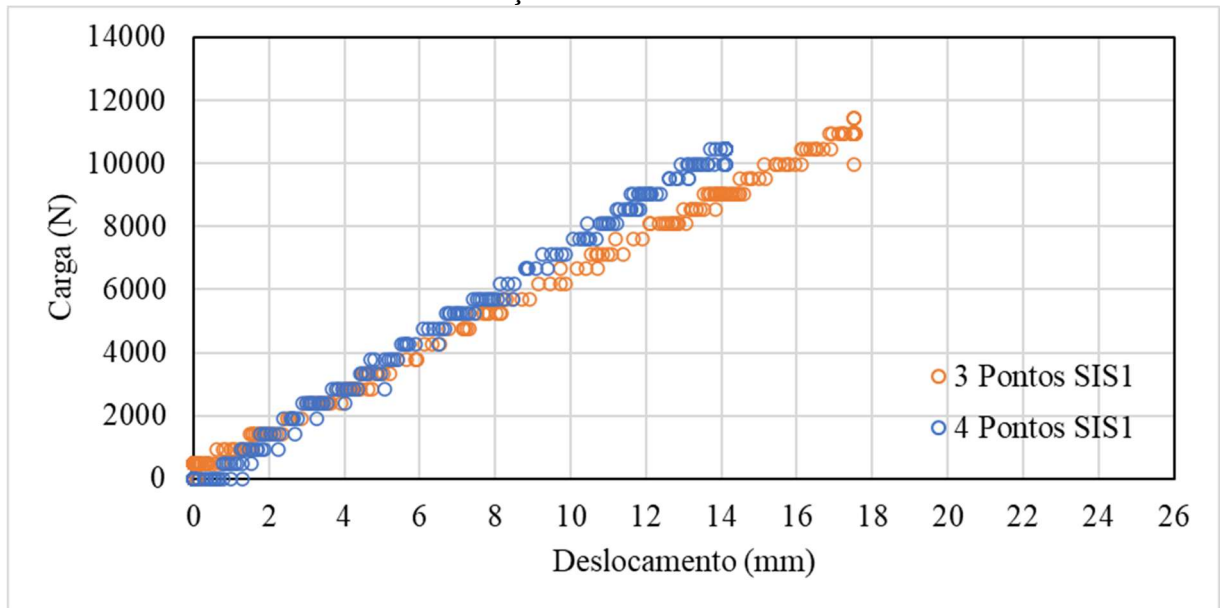
Portanto, as análises dos resultados obtidos nos ensaios das vigas reforçadas com Curauá indicam que, apesar das propriedades mecânicas da fibra indicarem ser uma opção viável a se utilizar como PRF, a aplicação adotada não se mostrou eficaz.

5.4.4. Viga reforçada com Sisal

Assim como em seções anteriores, os ensaios das vigas reforçadas com Sisal, seguiu os protocolos previamente determinados e utilizados anteriormente com as vigas sem reforço,

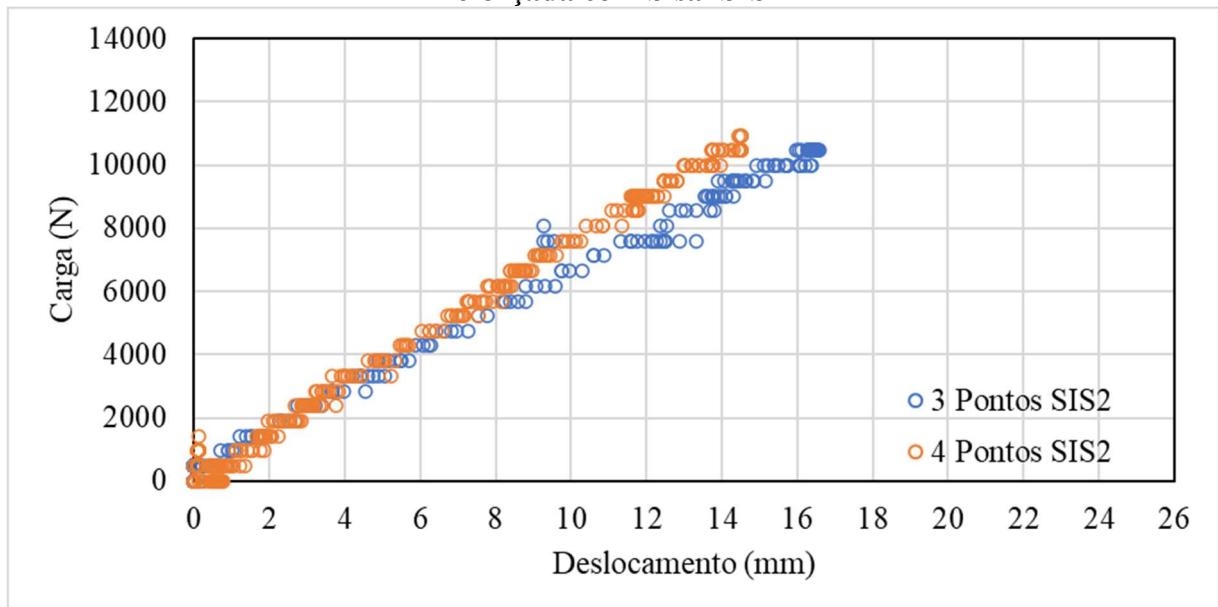
para que os ensaios das vigas pudessem ser comparados como referência às vigas sem reforço. Os resultados coletados nos ensaios resultaram nas correlações de força e deslocamento dos apresentados nas Figura 61 a Figura 63.

Figura 61 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Sisal SIS1



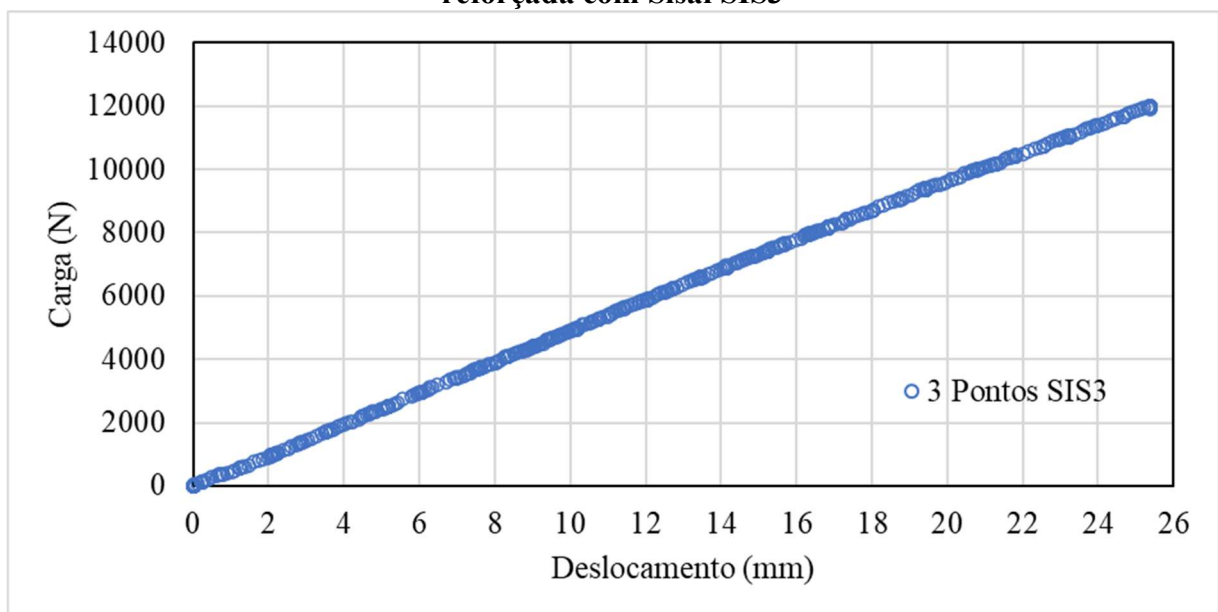
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 62 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Sisal SIS2



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 63 – Força por deslocamento no meio do vão obtidos no ensaio de flexão da viga reforçada com Sisal SIS3



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As vigas SIS1, SIS2 e SIS3 foram submetidas a flexão até atingir a ruptura, em que esses limites de força foram, respectivamente, 20910 N, 20440 N e 20220 N, que, por meio da Equação 6 foram calculados os valores de resistência para as vigas, sendo esses resultados apresentados na Tabela 17. Também foram calculados os valores de rigidez para cada viga pelas Equações 4 e 5, sendo esses resultados também apresentados nessa tabela.

Tabela 17 – Resumo de resultados de ruptura, resistência e rigidez, coletados nos ensaios de flexão das vigas reforçadas com Sisal

Amostra	Ensaio	$F_{rup.}$ N	f_m MPa	E.I. N.mm ² .10 ⁹
SIS1	3 Pontos	20910	50,18	257,22
	4 Pontos			255,00
SIS2	3 Pontos	20440	49,32	253,49
	4 Pontos			255,03
SIS3	3 Pontos	20220	48,56	197,58
	4 Pontos	-	-	-
Média			49,35	243,66
Desvio			0,81	25,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao comparar a rigidez obtida com os ensaios de três e quatro pontos, a viga SIS1 apresentou uma diferença entre seus valores obtidos de 0,86%, enquanto a viga SIS2 apresentou um valor de 0,61% (ΔEI_1). Portanto, como visto em seções anteriores, esses valores corroboram com o estudo de Souza (2013), indicando que os valores estando abaixo de 10%, a influência da cortante pode ser desprezada.

Quando comparado os valores de rigidez das vigas reforçadas (Tabela 17) com os valores médios obtidos para as vigas sem reforço (Tabela 11), percebe-se um decréscimo de resistência de 13,55% a 33,60% (ΔEI_2). Consequentemente, os valores obtidos não condizem com a hipótese esperada, uma vez que, com o acréscimo de elemento de reforço, seja pressuposto um aumento da rigidez. Porém, com a análise das vigas reforçadas com Sisal em seu estado de ruptura, que pode ser observado nas Figuras 50 a 52, é possível deduzir que a queda da rigidez se originou de uma deficiência do reforço, associado com uma deficiência de sua colagem.

As rupturas observadas durante os ensaios das vigas com reforço de Sisal são apresentados nas Figura 64 a Figura 70, em que apresentaram fratura completa do elemento da forma frágil, modo de ruptura comum em vigas não reforçadas e diferente do observado por Donadon (2016).

A viga SIS1 apresentou uma ruptura frágil predominante em tração (Figura 65) e um ponto específico de empenamento de fibras, devido a compressão na região superior com predominância de compressão. Também foi observado um deslocamento do reforço de Sisal

aplicado (Figura 66), o que corrobora com a hipótese de que a perda de rigidez ocorreu devido à baixa interação adesivo/reforço/madeira.

A viga SIS2 apresentou dois estágios de ruptura, sendo o primeiro com ruptura somente da lamela inferior da viga (Figura 67) e uma pequena queda de força durante o ensaio, perceptível nos dados apresentados na Figura 62 na região com deslocamento de 12 mm para o ensaio de três pontos, e um segundo estágio em que ocorre a ruptura frágil e toda a seção da viga apresenta fratura (Figura 68). Da mesma forma com o observado na viga SIS1, a viga SIS2 também apresentou o deslocamento do reforço de Sisal (Figura 69).

A viga SIS3, diferente das vigas SIS1 e SIS2, apresentou, em pequeno grau, uma ruptura plástica, porém, também apresentou as características de uma ruptura frágil, com a seção inteiramente fraturada, como pode ser observado na Figura 70.

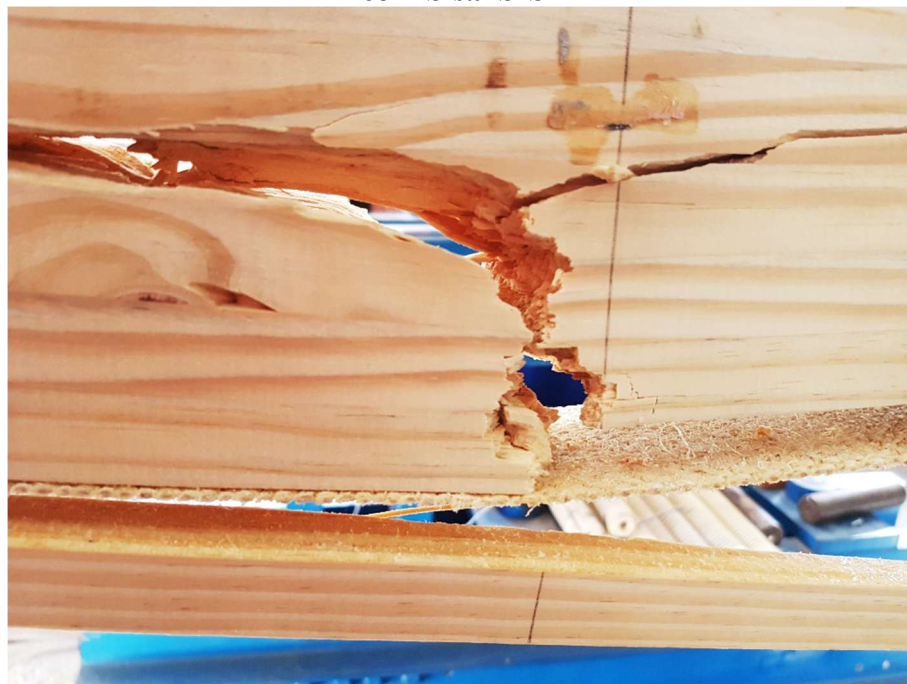
O modo de ruptura difere como observado entre a viga SIS3 e as vigas SIS1 e SIS2, aliado ao não deslocamento do reforço de Sisal na viga SIS3, indicando que o adesivo PU, utilizado no reforço das vigas de referência 3, foi mais eficiente que o adesivo PVA. No entanto, ainda assim, muito aquém do comportamento observado na viga com reforço de Vectran e PU (VEC3) e do comportamento do reforço de Sisal com adesivo epóxi relatado por Donadon (2016).

Figura 64 – Viga reforçada com Sisal SIS1 após a ruptura em ensaio de flexão a três pontos



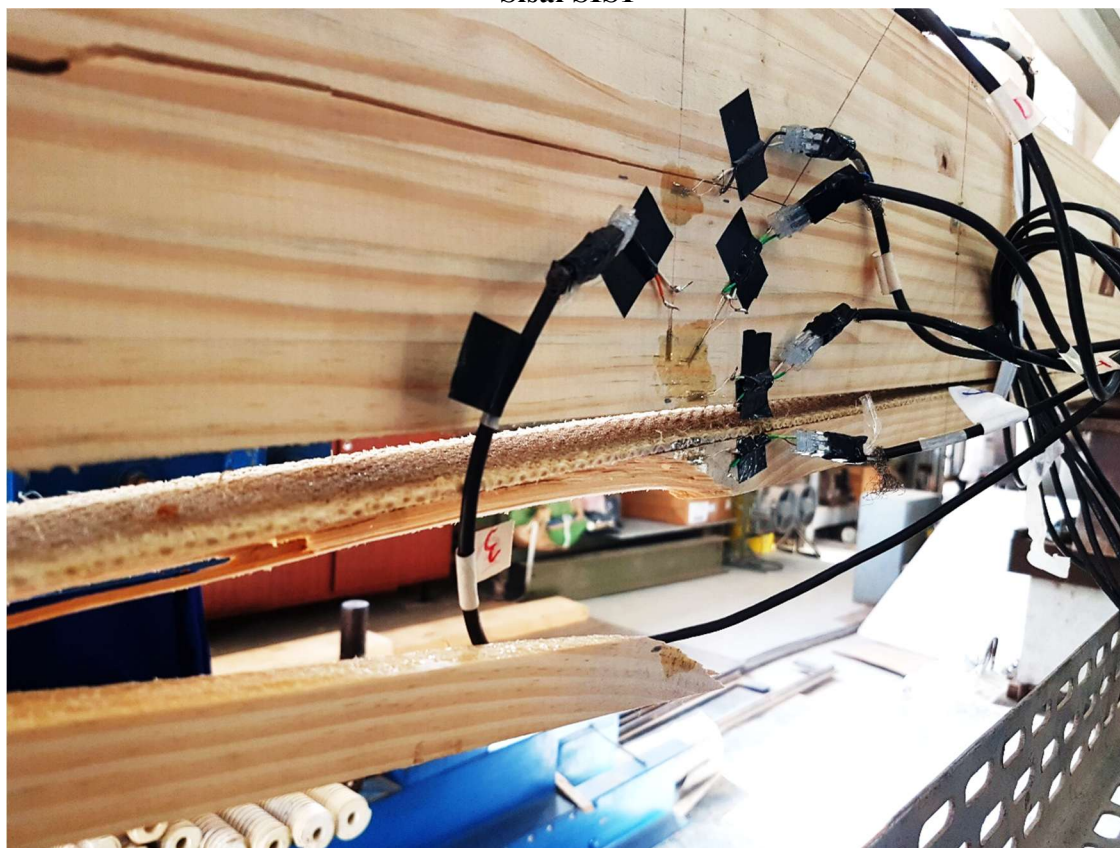
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 65 – Detalhe da fratura de predominância de tração ocorrida na viga reforçada com Sisal SIS1



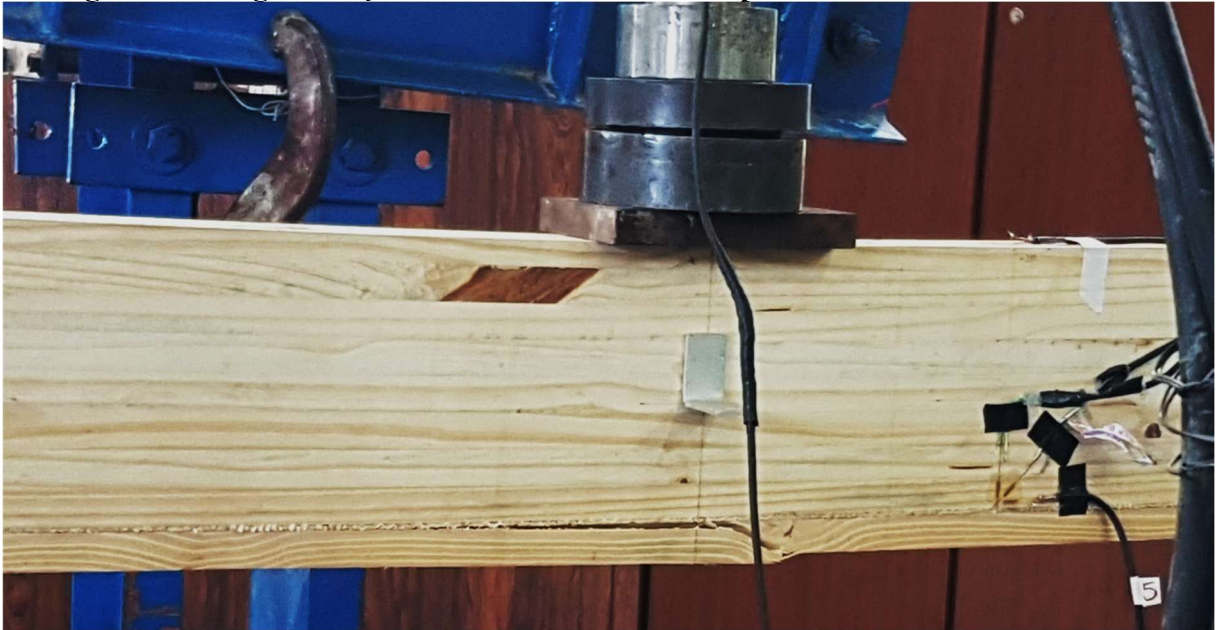
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 66 – Detalhe do deslocamento do reforço após ruptura da viga reforçada com Sisal SIS1



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 67 – Viga reforçada com Sisal SIS2 com ruptura inicial da lamela inferior



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 68 – Viga reforçada com Sisal SIS2 na segunda ruptura com colapso do elemento



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 69 – Deslocamento do reforço da viga reforçada com Sisal SIS2



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 70 – Viga reforçada com Sisal SIS3 após ruptura com fratura por toda seção

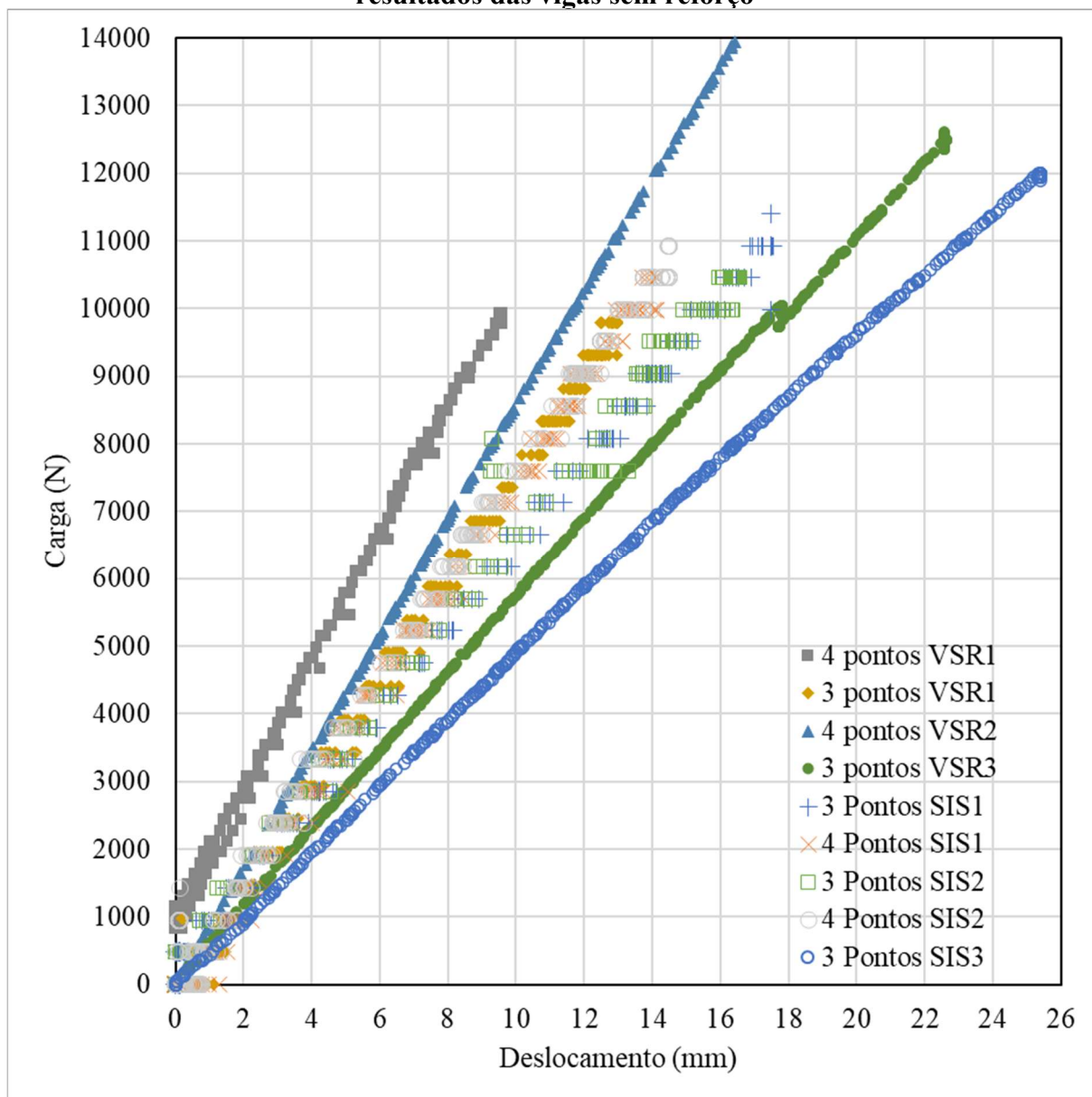


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

A perda de rigidez nas vigas, utilizando a malha de Sisal como reforço, pode ser visualizada quando comparado o comportamento das vigas com e sem reforço, por meio das curvas de Força x Deslocamento (Figura 71). Essa análise torna visível que, para as vigas

reforçadas, os deslocamentos verificados foram maiores que o deslocamento sofrido para a viga sem reforço, demonstrando de forma visual a perda de rigidez ocorrida nas vigas reforçadas.

Figura 71 – Comparação dos ensaios de flexão da vigas reforçadas com Sisal frente aos resultados das vigas sem reforço



Portanto, de acordo com os resultados obtidos, entende-se, de um modo geral, que a aplicação do reforço com os adesivos PVA e PU não se demonstrou efetivo, levando as vigas reforçadas a perderem resistência, sem o ganho de um modo de ruptura plástico esperado nesse tipo de viga.

5.5. Análise numérica

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por intermédio das simulações numéricas, bem como a análise desses resultados correlacionando com aqueles obtidos nos ensaios experimentais.

A simulação numérica das vigas reforçadas se restringiu apenas para as vigas com o reforço de Vectran, uma vez que nas vigas reforçadas com fibras de Sisal ou de Curauá, como apresentado na análise experimental, não foram verificadas contribuições efetivas desses reforços aplicados.

Como parâmetro de entrada nas análises numéricas das vigas reforçadas foram levados em consideração os módulos de elasticidade dos compósitos, calculados a partir das Equações 1, 2 e 3 e os valores das propriedades físicas e mecânicas apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5, sendo esses resultados calculados e apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Fração dos volumes de fibra e adesivo utilizado no compósito e módulo de elasticidade calculado

	V_f	V_a	E_c MPa
CUR1 e CUR2	0,75	0,25	23398
VEC1 e VEC2	0,65	0,35	50219
SIS1 e SIS2	0,87	0,13	32942
CUR3	0,67	0,33	20650
VEC3	0,57	0,43	43047
SIS3	0,8194	0,1806	30907

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018).

V_f é o volume de fibra calculado; V_a é o volume de adesivo calculado; E_c é o módulo de elasticidade do compósito calculado.

5.5.1. Teste da malha

A verificação da malha, como explicado na seção 4.2.5, ocorreu em duas etapas, sendo a primeira um teste de qualidade pelo próprio recurso do programa e a segunda pelo teste de convergência.

O primeiro teste da malha em que foi verificada a análise *element quality*, recurso do próprio programa para quantificar em número a uniformidade dos elementos gerados, foi realizado para as malhas de tamanho de elementos de 20 mm, 10 mm e 5 mm. A análise *element quality* verificou a forma global dos elementos gerados para cada peça ou sólido simulada e discretizada, ou seja, a lamela de madeira inferior ao reforço, o reforço de fibra, corpo de

madeira acima do reforço e placa metálica utilizada como atuador de esforço. Os resultados obtidos com o primeiro teste são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados do recurso *element quality* gerado pelo programa ANSYS

Malha	Recurso	Global	Lam. inf	Corpo	Placa	Reforço
20 mm	<i>Element quality</i>	0,9883	0,9893	0,9899	0,9374	0,9222
	Desvio padrão	1,63E-02	1,36E-05	8,85E-06	3,90E-05	9,09E-02
10 mm	<i>Element quality</i>	0,9974	0,9981	0,9977	0,9712	0,9222
	Desvio padrão	6,83E-03	2,77E-07	1,68E-05	5,33E-05	9,09E-02
5 mm	<i>Element quality</i>	0,9990	0,9988	0,9990	0,9988	0,9222
	Desvio padrão	2,21E-03	-nan(ind)	2,21E-06	-nan(ind)	9,09E-02

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os resultados apresentados na Tabela 19 demonstram que a verificação pelo recurso *element quality* para os três tamanhos de malha, em que a qualidade desta por ser considerada suficiente, uma vez que o valor médio se encontra próximo de 1 e o desvio padrão se encontra menor do que 0,1.

Já na Tabela 20, estão apresentados os valores obtidos com a análise de convergência pelo método GCI, considerando os três tamanhos de malha, 20 mm, 10 mm e 5 mm, calculado pelas Equações 15 a 18.

Tabela 20 – Resultados do teste de convergência de malha utilizando as variáveis de deformação e deslocamentos para as malhas de 20 mm, 10 mm e 5 mm

Índices das equações	Parâmetros-chave					
	E0	E2	E1	LVDT1	LVDT2	LVDT3
r	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
f ₃	14,1860	14,2050	-0,5488	8,5259	9,9992	8,5258
f ₂	14,1870	14,2710	-0,5506	8,5258	9,9996	8,5279
f ₁	14,2710	14,3710	-0,5529	8,5451	10,0010	8,5451
p	-6,3923	-0,5995	-0,3927	-7,5925	-1,8074	-3,0339
f _{h0}	14,243	14,338	-0,552	8,539	10,001	8,539
Fs	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500
ε ₂₃	0,0070%	0,4625%	0,3251%	-0,0012%	0,0040%	0,0246%
ε ₁₂	0,5886%	0,6958%	0,4250%	0,2259%	0,0140%	0,2013%
ε 13	0,5956%	1,1551%	0,7488%	0,2247%	0,0180%	0,2259%
GCI 23	-0,0001	-0,0170	-0,0171	0,0000	-0,0001	-0,0004
GCI 12	-0,0074	-0,0256	-0,0223	-0,0028	-0,0002	-0,0029
R	1,0059	1,0070	1,0043	1,0023	1,0001	1,0020

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

r é a razão entre as dimensões das malhas; Φ_i o resultado do ponto determinado chave calculado na simulação; p é o índice de convergência do método; ϵ é o erro relativo entre os resultados de duas malhas; GCI é índice de convergência entre as duas malhas; R Razão entre os índices GCI.

Como é possível verificar na Tabela 20, o teste de convergência GCI com três tamanhos de malha, 20 mm, 10 mm e 5 mm apresentaram convergência, uma vez que o valor R se encontra próximo de 1, indicando que a diferença de resultados obtidos entre malhas não apresenta valores substanciais, menores que 1%. Portanto, todos os tamanhos utilizados se apresentaram com qualidade, sendo assim, a malha com maior dimensão (20 mm) foi definida a ser utilizada para as simulações, uma vez que o tempo de simulação e consumo computacional são menores.

5.5.2. Validação dos modelos

A validação do modelo adotado para a simulação do elemento de madeira foi realizada por meio de uma comparação com os dados obtidos nos ensaios experimentais de vigas sem reforço em escala real. As propriedades utilizadas, apresentadas na Tabela 21, foram derivadas desses ensaios experimentais. Além disso, a bi-linearidade foi incorporada ao

modelo, ajustando o módulo de elasticidade para o módulo secante, com uma redução média de 28,68% do módulo, conforme identificado no trabalho de Donadon *et al.* (2020).

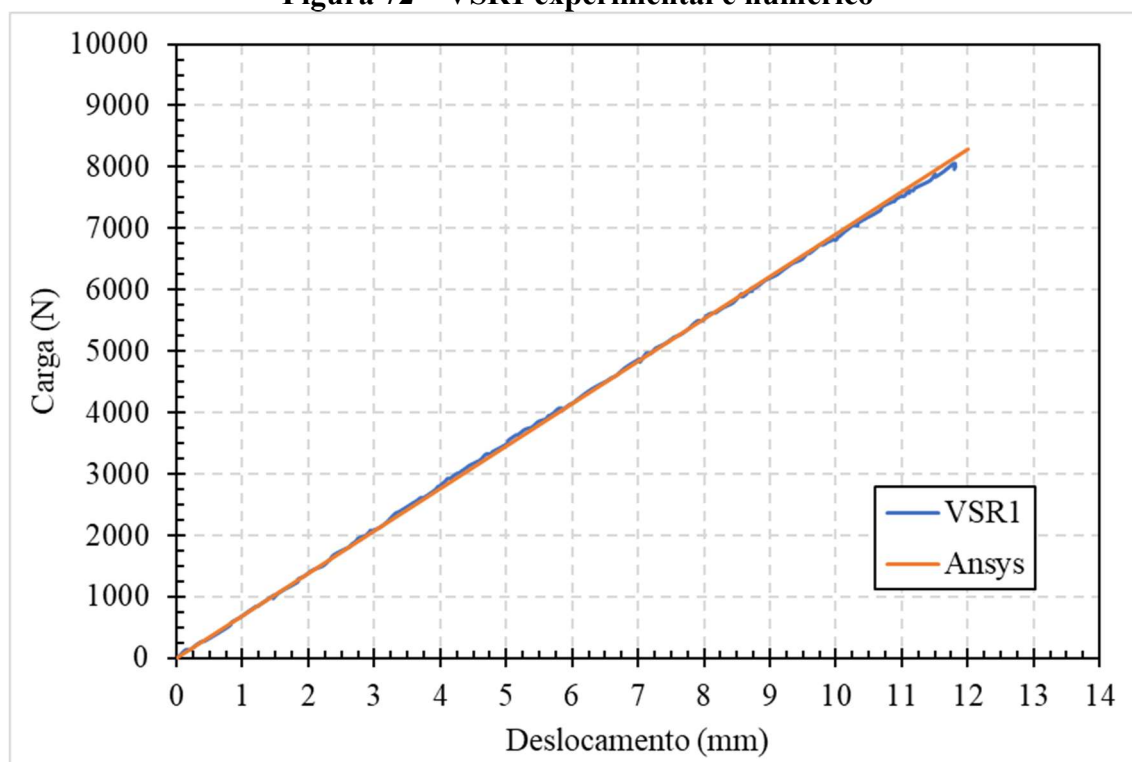
Tabela 21 – Módulo de elasticidade na fase elástica até 50% da tensão de ruptura e módulo secante utilizados na simulação das vigas sem reforço

Ensaio	E_e	E_{sec}
	MPa	MPa
VSR3 3 pontos	8759	6493,9
VSR3 4 pontos	9147	6781,5
VSR2 3 pontos	11448	8487,2
VSR24 pontos	11981	8882,7
VSR1 3 pontos	11407	8457,2

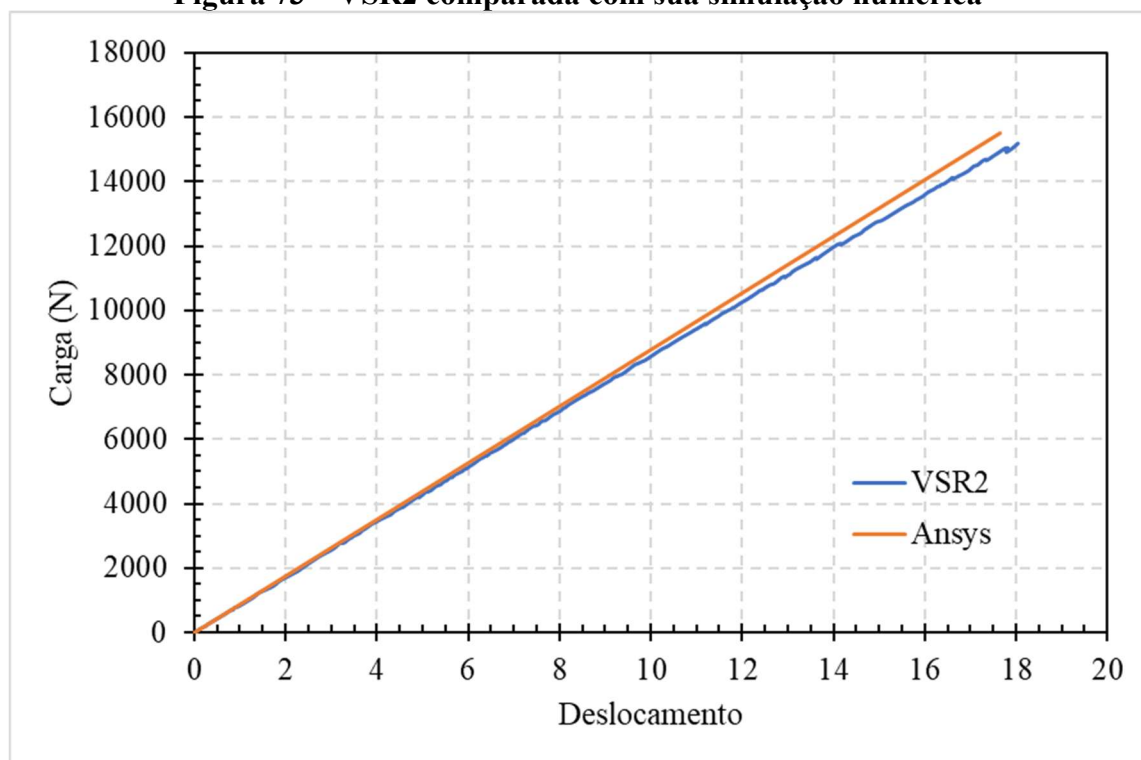
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os resultados da simulação numérica das vigas sem reforço, comparados com os dados obtidos nos ensaios experimentais são apresentados nas Figura 72 a Figura 74.

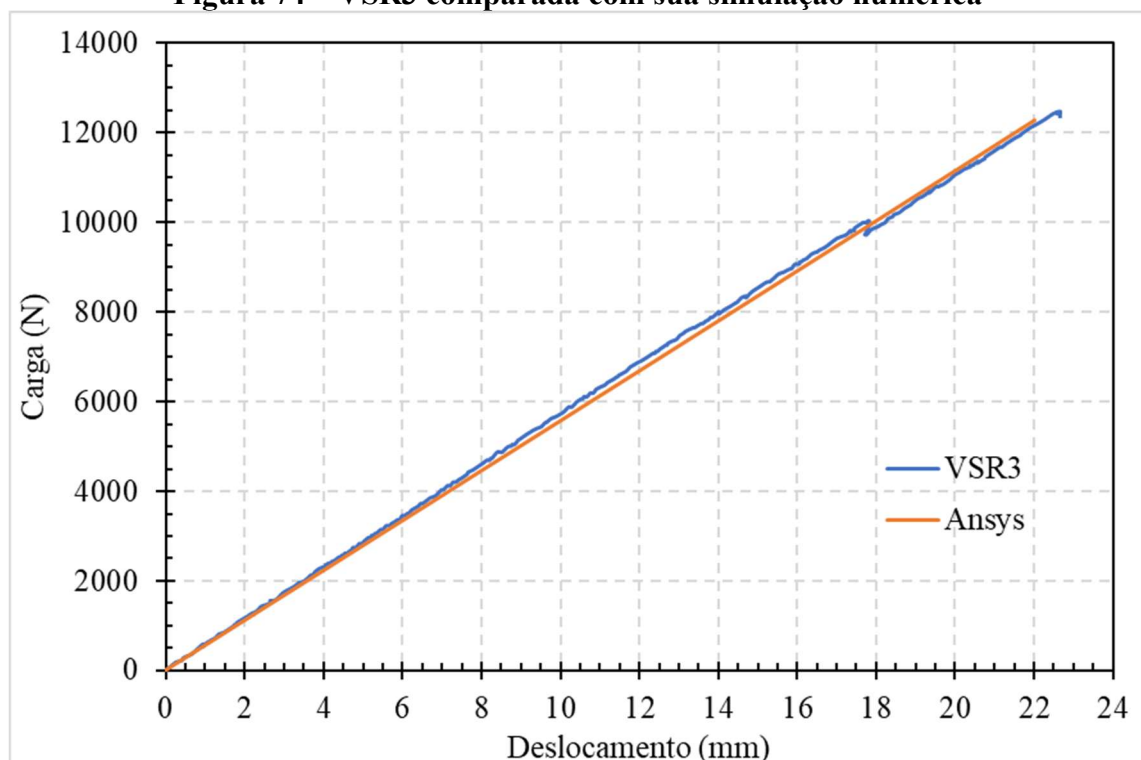
Figura 72 – VSR1 experimental e numérico



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 73 – VSR2 comparada com sua simulação numérica

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 74 – VSR3 comparada com sua simulação numérica

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Por meio da comparação dos dados apresentados nas figuras é possível notar que a simulação numérica das vigas VSR, com as situações de contorno impostas, convergem para os dados obtidos experimentalmente, apresentando ao final da fase elástica, uma diferença variando de 0,87% a 3,41%, como apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 – Erro numérico experimental na fase elástica

Viga	Experimental		Numérico		Δd^* %
	Força (N)	Deslocamento (mm)	Força (N)	Deslocamento (mm)	
VSR1	7880,4	11,4	7880	11,5	-0,87%
VSR2	13940	16,436	13946,2	15,894	3,41%
VSR3	12271	22,22	12271	22	1,00%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

*Diferença entre os deslocamentos experimental e numérico dividido pelo valor experimental.

Considerando que as propriedades de rigidez das vigas VSR apresentaram um coeficiente de variação de 13,9% (Tabela 10), e que as propriedades obtidas nos ensaios de caracterização tiveram coeficientes de variação de 18,2% (

Tabela 8) e de 20% (Tabela 9), além do fato de a norma ABNT NBR 7190-1 (2022) ou a versão de 1997 estabelecer um coeficiente de variação igual a 18% para as propriedades de um lote homogêneo e relativos a efeitos normais, pode-se concluir que a variação observada entre o modelo numérico e os dados experimentais é muito baixa, indicando uma convergência satisfatória do modelo numérico em relação ao experimental

5.5.3. Análise numérica de vigas com Vectran

Após a validação eficaz do modelo numérico, conforme discutido no subcapítulo anterior, e tendo sido constatada a convergência satisfatória entre os resultados simulados e os dados experimentais das vigas sem reforço, o modelo foi utilizado para a próxima etapa da análise. Nessa fase, foi focada a simulação das vigas reforçadas com fibras, incorporando as novas propriedades mecânicas introduzidas pelo reforço.

Para essa etapa foram utilizados os dados das propriedades do reforço de fibra (Tabela 18) e os dados de caracterização da madeira das vigas reforçadas com Vectran calculados com a bi-linearidade considerada no modelo apresentado na Tabela 23. A modelagem buscou capturar os efeitos do reforço de fibra sobre o comportamento estrutural das vigas, permitindo uma comparação direta com os resultados obtidos nas vigas sem reforço e as vigas reforçadas ensaiadas experimentalmente.

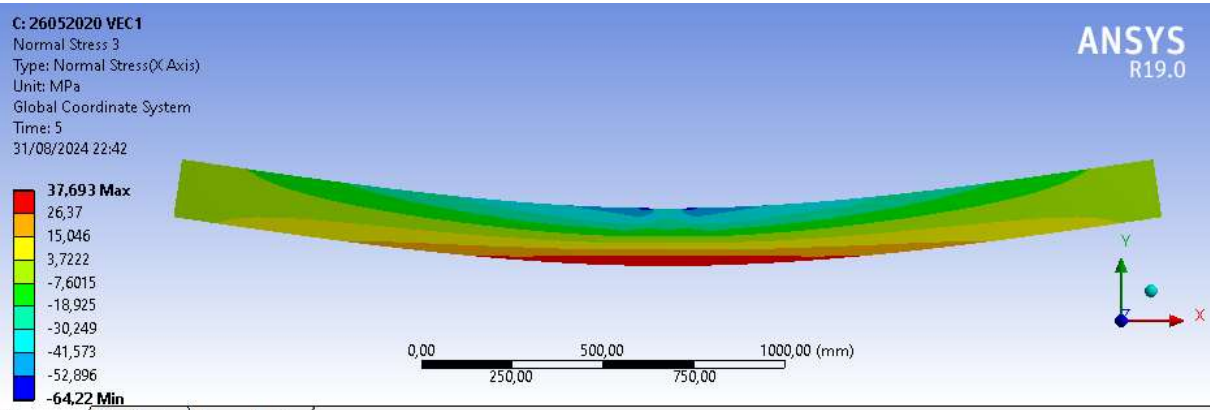
Tabela 23 – Propriedades mecânicas de elasticidade para a fase elástica e módulo secante para a fase plástica do modelo bi-linear das vigas da série VEC

Vigas	E_m MPa	E_{sec} MPa
VEC1	8113	6014,8
VEC2	10986	8145,0
VEC3	11719	8688,0

Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

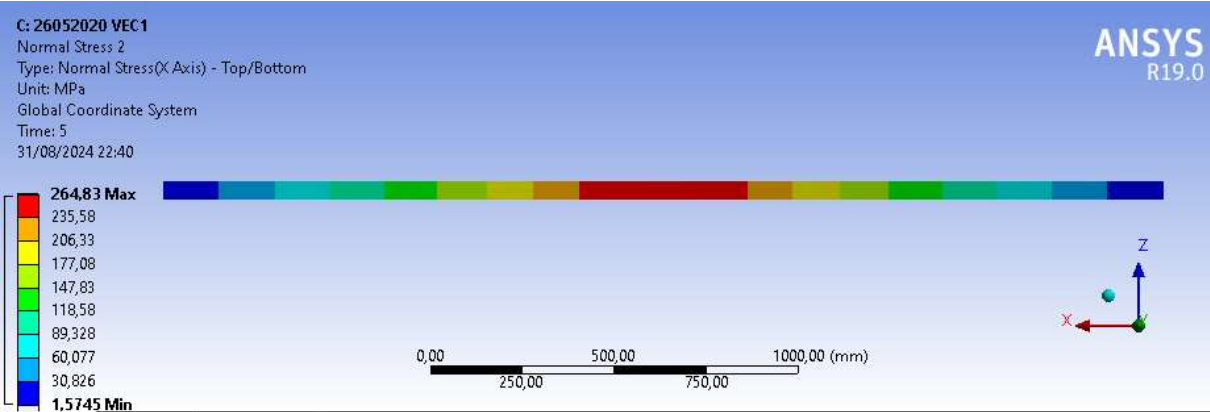
Os resultados das simulações das vigas reforçadas com Vectran, utilizando os dados detalhados anteriormente, são mostrados nas Figura 75 a Figura 86, e são discutidos posteriormente.

Figura 75 – Tensões normais atuantes (MPa) na região L_{sup} do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC1



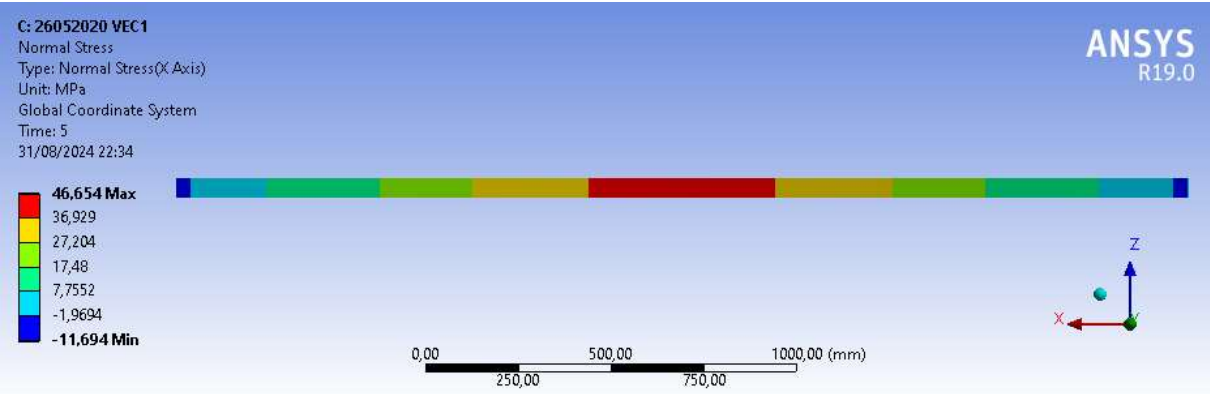
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 76 – Tensões normais atuantes (MPa) nas fibras Vectran do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC1



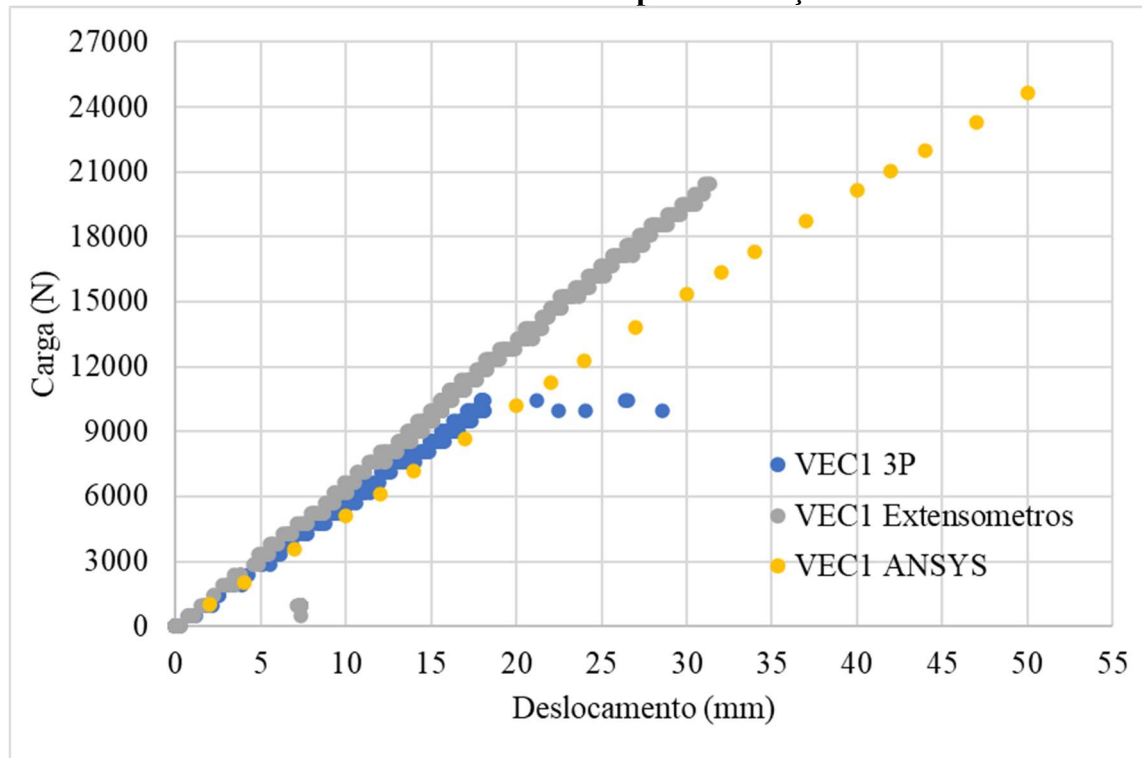
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 77 – Tensões normais atuantes (MPa) na região Linf do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC1



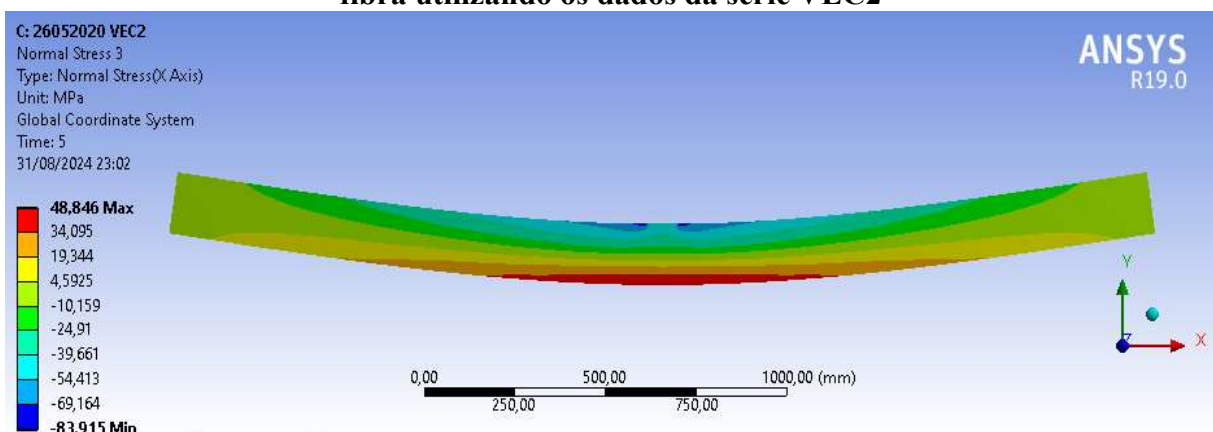
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 78 – Curvas de deslocamento por carregamento da série VEC1 apresentando os dados experimentais associados com os dados de deslocamento calculados via extensometria e os dados obtidos pela simulação numérica



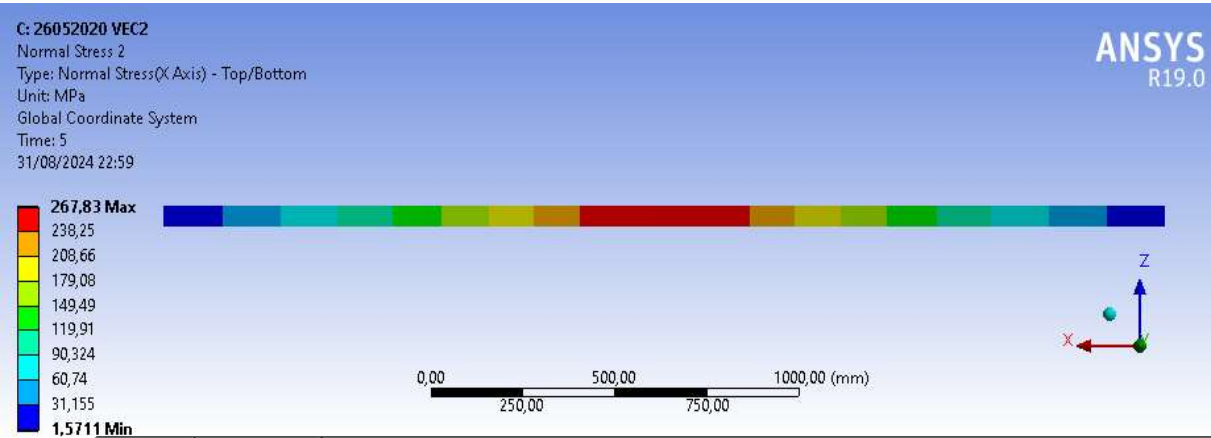
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 79 – Tensões normais atuantes (MPa) na região Lsup do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC2



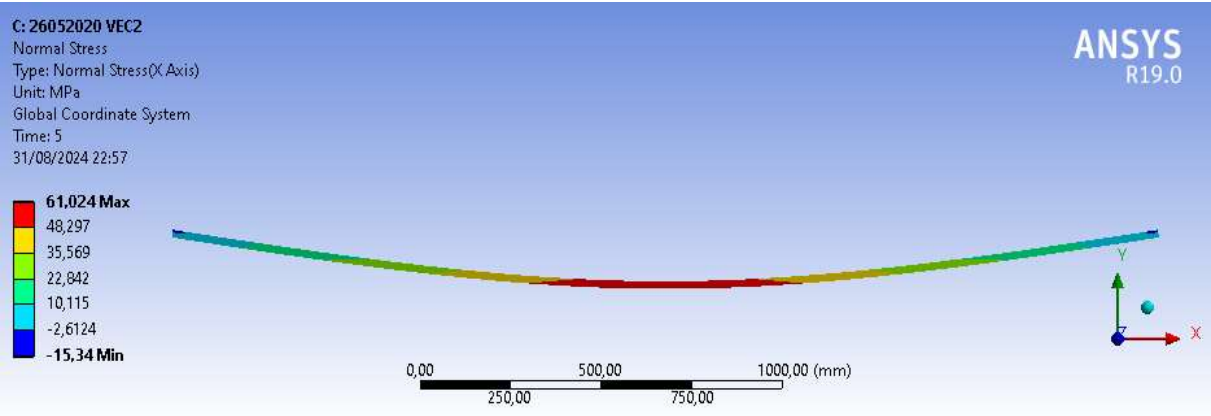
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 80 – Tensões normais atuantes (MPa) nas fibras Vectran do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC2



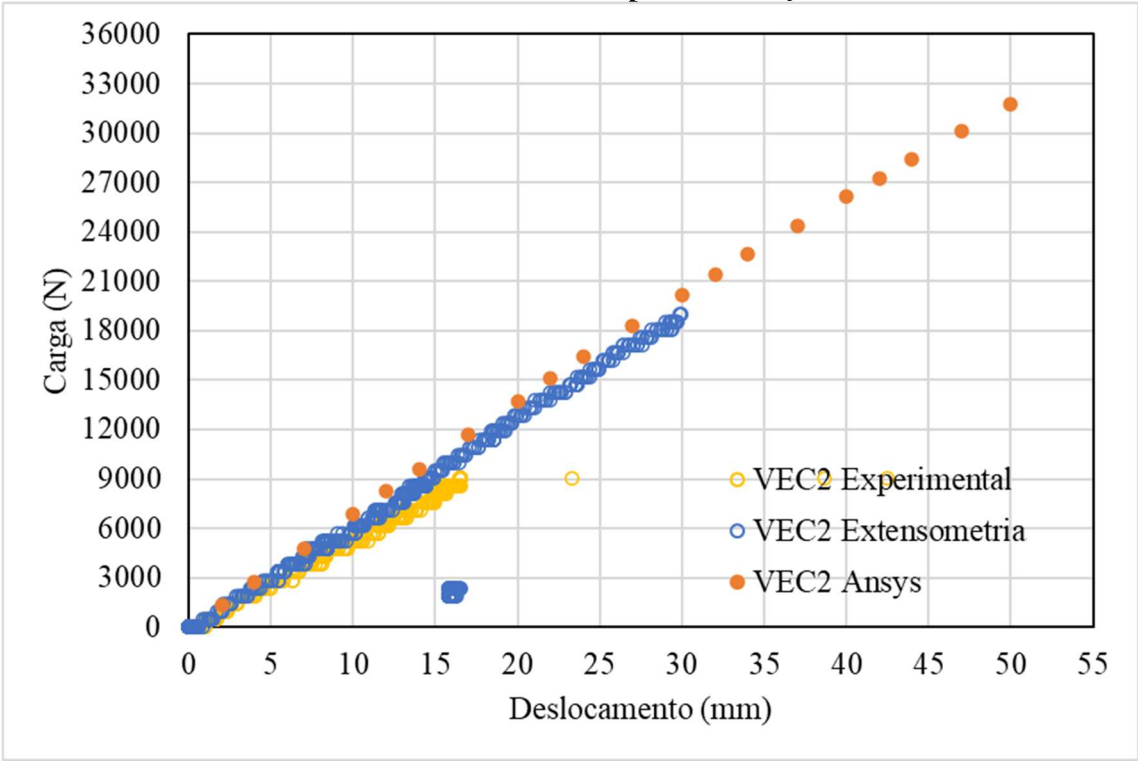
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 81 – Tensões normais atuantes (MPa) na região Linf do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC2



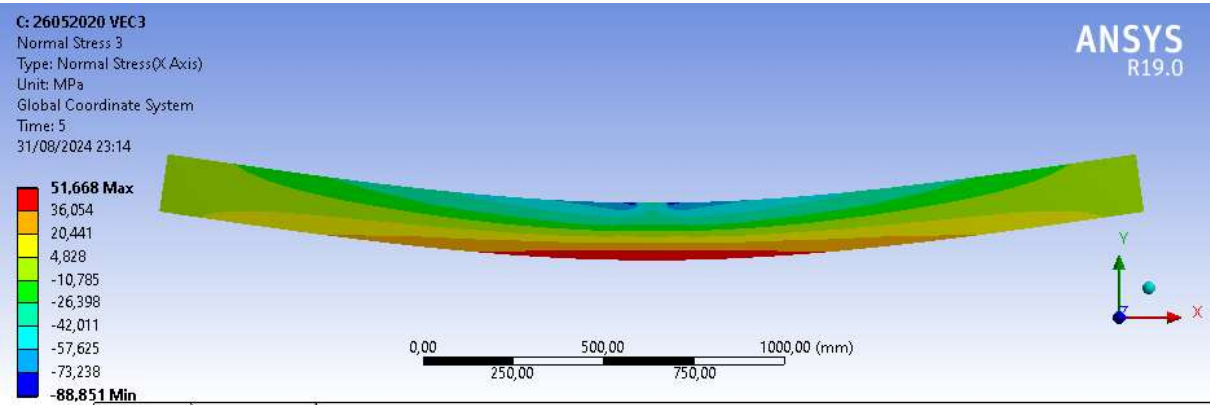
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 82 – Curvas de deslocamento por carregamento da série VEC2 apresentando os dados experimentais associados com os dados de deslocamento calculados via extensometria e os dados obtidos pela simulação numérica



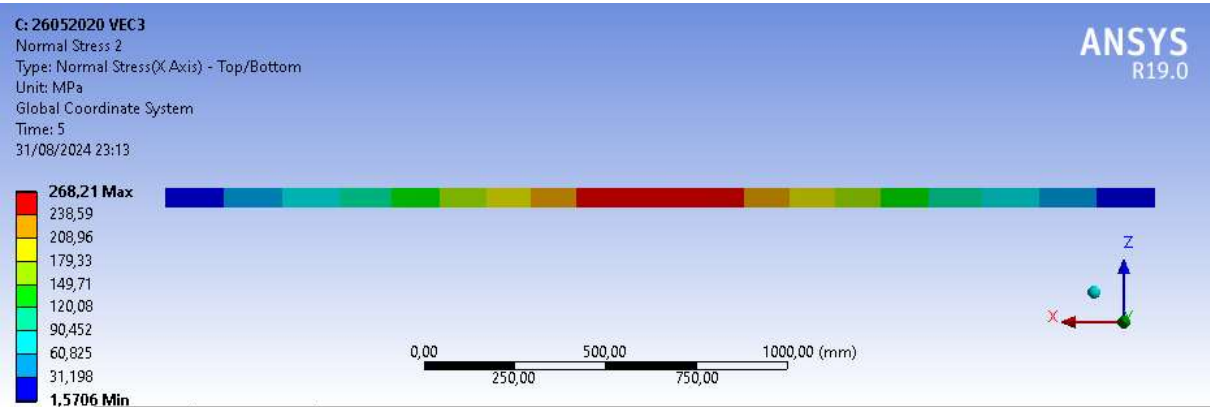
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 83 – Tensões atuantes na região Lsup do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC3



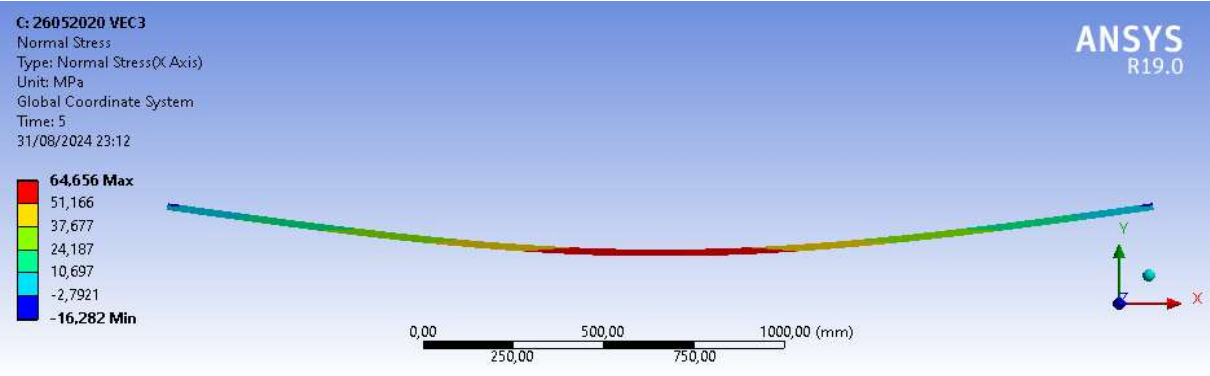
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 84 – Tensões atuantes nas fibras Vectran do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC3



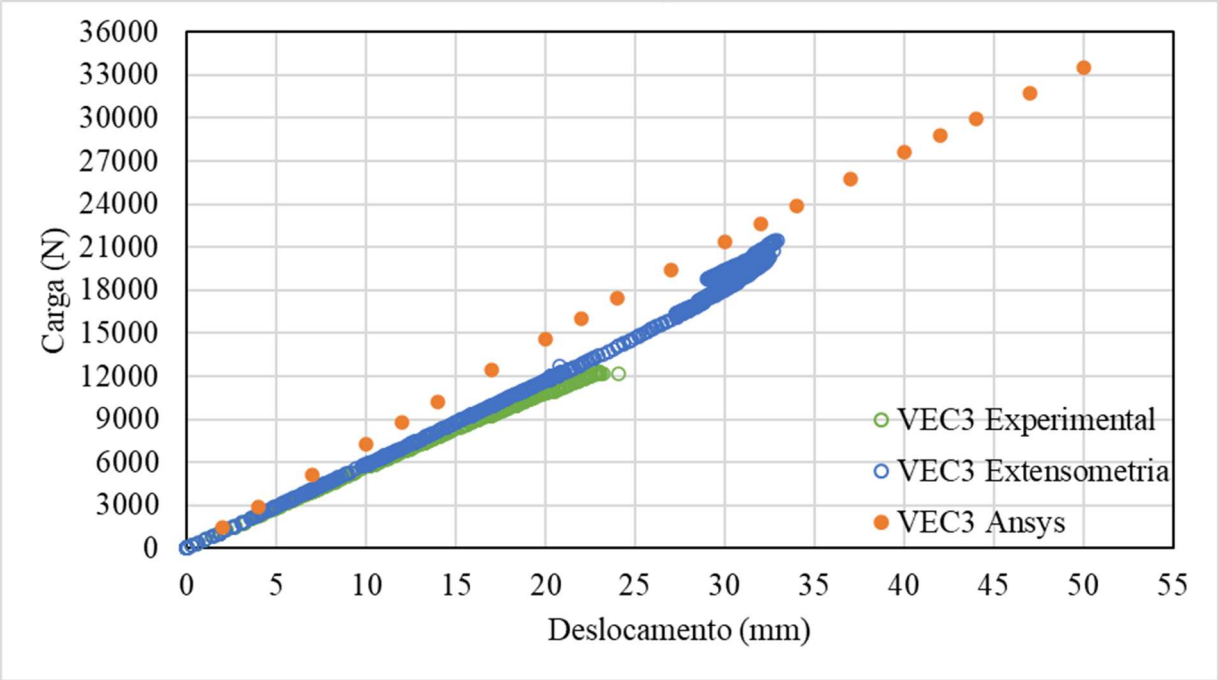
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 85 – Tensões atuantes na região Linf do modelo reforçado com fibra utilizando os dados da série VEC3



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 86 – Curvas de deslocamento por carregamento da série VEC1 apresentando os dados experimentais associados com os dados de deslocamento calculados via extensometria e os dados obtidos pela simulação numérica



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 24 – Dados comparativos das curvas experimental numérico e extensômetros relacionando força e deslocamento

Viga	Situação	Força (N)	Deslocamentos (mm)		
			Experimental	Extensômetros	Numérico
VEC1	Elástica	8689,1	16,00	13,8	17
	Plástica	18060	-	27,27	35,56
VEC2	Elástica	8080	15,00	13,53	11,78
	Plástica	18060	-	28,81	26,57
VEC3	Elástica	12040	22,00	20,48	16,48
	Plástica	18140	-	30,19	25,09

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Analisando os dados apresentados das Figura 76 a Figura 86 e nos dados apresentados na Tabela 24, é possível observar que as simulações indicaram uma tendência de aderência para a força correspondente acerca de 50% da força máxima e, posteriormente a essa força, as tendências não foram conclusivas. Isso se deve à interferência nos dados experimentais, o que impede uma afirmação definitiva sobre a eficácia do modelo para as vigas reforçadas. Dessa forma, torna-se necessário realizar mais simulações e coletar dados

experimentais adicionais para validar, adequadamente, o modelo e confirmar sua aplicabilidade em cenários envolvendo reforços.

6. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo compreender o comportamento de compósitos de fibras sintéticas de Vectran e naturais de Sisal e Curauá, quando utilizados como reforço estrutural em peças de madeira lamelada colada, com o uso de madeira de espécie de reflorestamento.

Os seguintes achados científicos são apresentados como resultados desta pesquisa:

- embora o uso de reforços de Sisal e Curauá esteja alinhado com a tendência de utilização de materiais renováveis e ecológicos, os resultados obtidos demonstraram que esses materiais não foram eficientes em melhorar, significativamente, o desempenho mecânico das vigas. Porém, o reforço com as fibras Vectran demonstrou melhor eficiência, mesmo com baixa gramatura, sugerindo que esse material possui um promissor potencial para aplicação como reforço estrutural. Esses achados indicam a necessidade de novos estudos focados em otimizar o uso das fibras Vectran, com o objetivo de explorar plenamente suas capacidades como reforço, enquanto se buscam alternativas para melhorar a eficiência dos materiais naturais como o Sisal e o Curauá;
- o modelo numérico gerou resultados que indicam que o desenvolvido convergiu de maneira satisfatória para os dados experimentais para as vigas de madeira sem reforço no regime elástico e plástico. Isso confirma a viabilidade do modelo para simular o comportamento estrutural de vigas de madeira. No entanto, a análise dos dados apresentados para as vigas sem reforço, revela que as simulações não foram totalmente conclusivas. A interferência observada nos dados experimentais sugere que ainda existem fatores não completamente capturados pelo modelo, o que limita a capacidade de afirmar, com certeza, a eficácia do modelo para vigas reforçadas com fibras. Tais fatores estão associados com o real conhecimento e validação das propriedades mecânicas utilizadas na análise numérica, influência dos adesivos na composição das peças, presença de descontinuidades nas peças, como nós e inclinação da grã da madeira, entre outras;
- os resultados indicam que os adesivos PVA e PU, comumente utilizados na fabricação de vigas de madeira laminada colada (MLC), não foram eficazes em garantir uma adesividade satisfatória quando aplicados aos reforços de Sisal e Curauá. Isso levou a uma perda significativa de rigidez nas vigas reforçadas,

resultando em maiores deformações, comparadas às vigas sem reforço. Entretanto, o adesivo PU demonstrou um potencial promissor, especialmente com o reforço de Sisal, uma vez que não houve deslocamento observado. Isso sugere que o PU pode ser uma alternativa viável para o reforço de vigas, desde que sejam realizados novos estudos focados na adesividade para assegurar a completa impregnação da malha de fibra. Esses estudos futuros são essenciais para otimizar o desempenho estrutural das vigas reforçadas e garantir a eficácia do reforço de fibras naturais em aplicações práticas;

- o reforço com fibras de Vectran, apesar de apresentar uma queda na rigidez, demonstrou uma boa interação com os adesivos PVA e PU, tanto nos ensaios de cisalhamento quanto no ensaio de flexão em vigas de escala real. Esses resultados indicam que tanto o PVA quanto o PU podem ser considerados como matrizes viáveis na confecção de PRF (polímero reforçado com fibra), embora ainda apresentem desempenho inferior ao observado com o uso do adesivo epóxi. Esses achados corroboram com a literatura existente, que destaca a resina epóxi como altamente recomendada para a interface entre madeira e fibra, conforme indicado por estudos anteriores (CARVALHO, 2005; DONADON, 2016; ISSA; KMEID, 2005; RIBEIRO, 2018). Portanto, este trabalho reforça a superioridade da resina epóxi na maximização da adesividade e desempenho estrutural em compósitos de madeira e fibra sintética, em especial, fibras Vectran, sugerindo que seu uso continue sendo prioritário em aplicações práticas.

7. Recomendação de trabalhos futuros

Como observado neste trabalho, ainda existem muitas lacunas no entendimento do reforço de vigas de madeira laminada colada com fibras sintéticas e naturais. Portanto, são recomendados os seguintes trabalhos futuros:

- avaliar a adesividade das matrizes PU, PVA e epóxi com as fibras antes da realização dos ensaios de flexão, visando uma melhor compreensão da interação entre os materiais;
- estudar o impacto de diferentes gramaturas de fibra Vectran como reforço, explorando sua influência na rigidez e resistência das vigas; e
- desenvolver e validar modelos numéricos para a simulação de vigas reforçadas, permitindo uma análise mais precisa e preditiva do comportamento estrutural desses sistemas.

8. Referencias

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7190 - Projetos De Estrutura De Madeira**. Rio de Janeiro, RJ: Abnt, 1997.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7190 - Projetos De Estrutura De Madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Abnt, 2022a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7190 - Projetos De Estrutura De Madeira - Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Abnt, 2022b.

AMAYA, M. L. C. **Reforço de emendas dentadas com compósitos de fibras em peças de madeira**. [s.l.] EESC / USP, 2013.

ANSYS, INC. **ANSYS Meshing user's guide**. 2024.

ASME. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.

BALSEIRO, A. M. R. Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP. Dissertação (mestrado). Reabilitação do patrimônio edificado. Faculdade de engenharia da universidade do Porto. Porto - PT, 2007, 144p.

BECHTOLD, I. H. Cristais líquidos: Um sistema complexo de simples aplicação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 3, p. 333-342, 2005.

BERTOLINE, C. A. A. **ESTUDO TEÓRICO DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA REFORÇADAS POR FIBRAS SINTÉTICAS**. Dissertação de mestrado. Campinas, 2015.

BERTOLINE, C. A. A. et al. Analysis of Fiber Reinforced Laminated Timber Beams. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 100–109, 2016.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

BRASIL, C. N. D. M. A.-C. **Resolução nº406 de 02 de fevereiro de 2009**. Brasília. Diário Oficial da União, 2009.

CALIL JUNIOR, C.; LAHR, F.A.R.; BRAZOLIN, S. Madeiras na Construção Civil. In: *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007, v.2, p. 1149-1179.

CALIL JR, C. et al. **Estrutura de madeira - Projetos, Dimensionamentos e exemplos de cálculo**. [s.l.] LTC, 2021.

CAMPBELL, F. C. **Structural composite materials**. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010.

CARIA, D. F. A. **A madeira como elemento de sustentabilidade na construção.** Dissertação Mestrado—[s.l.] Universidade de Lisboa, 2021.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira.** Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2 maio 2005.

CHANDRASEKHAR, S. *Liquid Crystals.* Cambridge University Press, 1992, 460 p.

CUNHA, A. B. DA; MATOS, J. L. M. DE. Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. **CERNE**, v. 17, n. 4, p. 593–600, dez. 2011.

CUNHA, J.; SOUZA JUNIOR, D. A. Avaliação estrutural de peças de madeira reforçadas por fibras de carbono. *Engenharia Civil UM (Braga)*, 2004, n.20, p. 71-81.

CUPERTINO, L. F. Modelagem do módulo de young em nanocompósitos através de inteligência computacional. Dissertação (Mestrado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-RIO. Rio de Janeiro, 2009, 82p.

DAVIS, G. The performance of adhesive systems for structural timber. *Journal Adhesion and adhesives*. *Journal of adhesion and adhesives*, V. 17, N. 3, P. 247-255, 1997.

DONADON, B. F. **ESTUDO DE VIGAS DE MADEIRA DE REFLORESTAMENTO LAMINADAS COLADAS REFORÇADAS POR FIBRAS.** Dissertação de mestrado. Campinas, 2016.

DONADON, B. F. et al. Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. **Engineering Structures**, v. 202, p. 109818, jan. 2020.

DWIVEDI, Abhishek e KUMAR, Prem. Study of Characteristic of Natural Fiber Reinforced Polymer (NFRP) Composites : A Review. *International Journal for Scientific Research & Development*, v. 3, n. 04, p. 544–549, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Circular Técnica 123: Cultivo do sisal no Nordeste Brasileiro. Campina Grande- PB, 2008, 24p.
EN 1995-1-2, E. S. **Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design.** 2014.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). National Bridge Inventory (NBI): Material Type of Structure by State, 2014. Disponível em:
<<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/material.cfm>> Acesso em: 19 de mai. 2015.

FIGUEROA, M. J. M.; DE MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. v. 9, n. 4, p. 157–174, dez. 2009.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais—São Carlos: Universidade de São Paulo, 19 abr. 2002.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. Tese de Doutorado. São Carlos, 2005.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**, v. 44, n. 8, p. 1431–1440, 2011a.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**, v. 44, n. 8, p. 1431–1440, out. 2011b.

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

FRANKLIN Adhesives & Polymers. ReacTITE EP-925. Colombus, USA, 2015.

GIBSON, R. F. Principles of composite Material mechanics. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011, e.3, 683p.

GRØSTAD, K.; PEDERSEN, A. Emulsion Polymer Isocyanates as Wood Adhesive: A Review. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 24, n. 8–10, p. 1357–1381, jan. 2010.

GUSTAVSSON, L.; PINGOUD, K.; SATHRE, R. Carbon Dioxide Balance of Wood Substitution: Comparing Concrete- and Wood-Framed Buildings. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, n. 3, p. 667–691, maio 2006.

HERNANDEZ, P. et al. Life-Cycle Assessment of Buildings. Em: **Handbook of Energy Efficiency in Buildings**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 207–261.

ICIMOTO, F. H. **Dormentes de Madeira Lamelada Colada (MLC) reforçados com tecidos de fibra de vidro**. Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais—São Carlos: Universidade de São Paulo, 17 ago. 2018.

INAUDI, D. et al. Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors. **Smart Materials and Structures**, v. 7, n. 2, p. 199–208, 1 abr. 1998.

INO, A. S. (ED.). **Projetar e construir com madeira**. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher, 2024.

ISSA, C. A.; KMEID, Z. Advanced wood engineering: glulam beams. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 99–106, mar. 2005.

JESUS, H. J. M. Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC). Dissertação (doutorado). Escola de engenharia de São Carlos. USP. São Carlos, 2000.

JOHNSON, H.; BLANKSVÄRD, T.; CAROLIN, A. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. **Materials and Structures**, v. 40, n. 1, p. 47–56, jan. 2007.

MACHADO, A. P.; VIAPOL. Manual de reforço das estruturas de concreto armada com fibras de carbono. 118p. Disponível em:
<<http://www.viapol.com.br/arquivo/502b74be2cb4106762dbc2d1ab73fe15.pdf>> Acesso em: out. 2014.

MACIEL, H. M. **Estudo da ecoeficiência mundial entre os anos de 1991 e 2012**. [s.l.] Appris Editora e Livraria Eireli - ME, 2020.

MARINELLI, A. L. ET. AL. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da Biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 2008, v. 18, n. 2, p.92-99.

MASCIA, N. T.; ALMEIDA, S. J. C.; ALVES, A. N. **AValiação Numérica de Peças de Madeira Laminada Colada com Reforço de Fibras em Situação de Incêndio**. Em: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA (CLEM 2019). Montevideo: Universidad de la República, 2019.

MASCIA, N. T.; DONADON, B. F.; VILELA, R. Glued Laminated Timber Beams Reinforced With Sisal Fibres. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, p. 390–397, 2019.

MENDONÇA, P. T. R. Materiais compostos e estruturas sanduíche: Projeto e análise. Barueri: Manole, 2005. 632p.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 27, n. 2, p. 163-174, 2006.

MONTEIRO, S. N. AQUINO, R. C. M. P. LOPES, F. P. D. Performance of curaua fibers in pullout tests. *Journal of materials science*, v.43, n.2, p. 489-493, 2008.

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; FERREIRA, A. S. Weibull analysis for the diameter dependence of the elastic modulus of curaua fibers. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 18, n. 1, p. 46–54, 2013.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Mars Exploration Rovers. 2003. Disponível em:
<http://mars.jpl.nasa.gov/mer/mission/tl_entry1.html>. Acessado em: out. 2014.

NEVES, P. H. L. **APLICAÇÃO DE MADEIRAS AMAZÔNICAS EM ELEMENTOS DE MADEIRA LAMELADA COLADA (MLC)**. [s.l.: s.n.].

PHARES, B. M. Evaluation of a timber bridge for the secondary road system using FRP-reinforced glulam girders. Forest Product Laboratory: Demonstration in progress. 2010. Disponível em:

<http://www.fpl.fs.fed.us/products/publications/specific_pub.php?posting_id=17955&header_id=p>. Acesso em: fev. 2014.

PIVA PELLIS, B. **Desempenho mecânico de vigas de madeira laminada colada armada confeccionadas com adesivo poliuretânico**. Mestre em Engenharia Agrícola—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 31 jul. 2015.

RAFTERY, Gary M. e HARTE, Annette M. e RODD, Peter D. Bond quality at the FRP-wood interface using wood-laminating adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 29, n. 2, p. 101–110, 2009.

RAMAGE, M. H. et al. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333–359, fev. 2017.

RIBEIRO, A. B. **SOBRE O CISALHAMENTO NA INTERFACE MADEIRA E COMPÓSITO EM VIGAS LAMINADAS COLADAS DE MADEIRA REFORÇADAS POR FIBRAS**. Dissertação de mestrado. Campinas, [s.l: s.n.].

RITTER, M. A. **Timber Bridges: Design, Construction, Inspection and Maintenance**. Washington: Government Printing Office, 1990.

SCHOBBER, K. U. et al. FRP reinforcement of timber structures. **Construction and Building Materials**, v. 97, p. 106–118, 2015.

SCHWEITZER, R. Cultural dimensions: Wood as a building material – from the beginning to the 19th century. In: *Timber construction manual*. Birkhäuser - Germany: Publishers for Architecture, 2004, p. 24-29.

SHIGUE, E. K. **Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos**. Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia—São Carlos: Universidade de São Paulo, 10 set. 2018.

SILVA FILHO, L. C. P.; GARCEZ, M. R. Compósitos de engenharia de matriz polimérica. In: *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007, v.2, p. 1423-1464.

SILVA JUNIOR, O. G. Produção e Caracterização de compósitos à base de fibra de Curauá, Amido termoplástico e polietileno, utilizando-se a termografia. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Design, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 129p. 2013.

SILVA, M. E. R. D. et al. Caracterização física e mecânica de quatro espécies de madeira disponíveis no mercado madeireiro da região de Açailândia - MA e Imperatriz - MA. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. e416111032824, 6 ago. 2022.

SILVA, M. L. D. J. S. et al. Viabilidade do uso de madeira clonal de *Eucalyptus urophylla* de rápido crescimento para produção de madeira lamelada colada (MLC) com adesivo poliuretano à base de mamona. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 2, p. e20230073, 2023.

SILVA, R. V. AQUINO, R. M. F. Curaua fiber: a new alternative to polymeric composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v.27. p.103-112, 2008. Disponível em: <<http://jrp.sagepub.com/content/27/1/103>>. Acessado em: jul. 2014.

SOUZA, F. A. DE. **Efeito da força cortante nos deslocamentos de vigas de madeira sujeitas à flexão estática**. Mestre em Engenharia Civil—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 16 dez. 2013.

SOUZA, S. F. et al. The use of curaua fibers as reinforcements in composites. Em: **Biofiber Reinforcements in Composite Materials**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 700–720.

SPINACÉ, M. A. S. ET AL. Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: Sisal vs. Curauá. *Polímeros*, vol. 21, n. 3, p.168-174, 2011.

TOMCZAK, F. Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil. Tese (Doutorado em engenharia e ciência dos materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 135p. 2010.

TRAUTWEIN, L. M. Punção em lajes cogumelo de concreto armado: análise experimental e numérica. Tese (doutorado). Escola politécnica da Universidade de São Paulo. 277p. 2006.

UZEL, M. et al. Experimental investigation of flexural behavior of glulam beams reinforced with different bonding surface materials. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 149–163, jan. 2018.

VICTOR, R. S. ANÁLISE DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA REFORÇADAS COM FIBRAS NATURAIS E SINTÉTICAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE FLEXÃO. p. 107, 2018.

VILELA, R. **Desempenho estrutural de placas de Cross Laminated Timber submetidas à flexão**. Mestre em Engenharia Civil—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 30 jan. 2020.

VOLZ, M. et al. **Timber Construction Manual**. Basel: De Gruyter, 2012.

VOLZ, M. Fundamental: The Material. In: **Timber construction manual**. Birkhäuser - Germany: Publishers for Architecture, p. 31-46, 2004.

WEGENER, G.; ZIMMER, B. Fundamental: Building with wood is building for the future. In: **Timber construction manual**. Birkhäuser – Germany: Publishers for Architecture. p. 47-53, 2004.

9. ANEXO

Artigos publicados em periódicos sobre o tema.

1-VILELA, R.; MASCIA, N. T.; DONADON, B. F.; SORIANO, J. Mechanical performance analysis in bending of glulam beams reinforced with synthetic Vectran fibres. AMBIENTE CONSTRUÍDO (ONLINE), v. 23, p. 289-302, 2023.

2-VILELA, R.; MASCIA, N. T.; DONADON, B. F. Confiabilidade estrutural e simulação numérica de vigas de Madeira Lamelada Colada (MLC) reforçadas com fibra sintética. PRINCIPIA (JOÃO PESSOA), p. 1-13, 2021.

3-DONADON, B. F.; MASCIA, N. T.; VILELA, R.; TRAUTWEIN, L. M. Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. ENGINEERING STRUCTURES, v. 202, p. 109818, 2020.

4-MASCIA, N. T.; DONADON, B. F.; VILELA, R. Glued Laminated Timber Beams Reinforced With Sisal Fibres. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, v. 8, p. 390-397, 2019.

Obs.: Os artigos completos 1 e 2 estão inseridos neste anexo.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

1-MASCIA, N. T.; DONADON, B. F.; VIOLIN, G. R. GLULAM BEAMS REINFORCED WITH VECTRAN FIBERS: AN EXPERIMENTAL EVALUATION. In: 19o NOCMAT 2023, 2023, João Pessoa. Proceedings.... João Pessoa: IFBA, 2023. v. 1. p. 637-649.

2-DONADON, B. F.; VILELA, R.; MASCIA, N. T. Confiabilidade estrutural no dimensionamento de vigas de Madeira Lamelada Colada reforçadas com fibra sintética. In: XVII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2021, Florianópolis. Anais do 17º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. Florianópolis-SC: EBRAMEM, 2021. v. 1. p. 1-12.

3-VILELA, R.; Mascia, N.T.; DONADON, BRUNO FAZENDEIRO . AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA REFORÇADA COM FIBRAS VECTRAN. In: Congresso Latino-Americano de Estruturas de Madeira (CLEM 2019), 2019, Montevideu. Anais Montevideu: Universidad de la República), 2019. v. 1. p. 1-14.

4-MASCIA, N. T.; DONADON, B. F.; VILELA, R. GLUED LAMINATED TIMBER BEAMS REINFORCED WITH SISAL FIBRES. In: 2018 4th International

Conference on Architecture, Materials and Construction (ICAMC 2018), 2018, Barcelona. Proceedings.... Hong Kong: Hong Kong Chemistry Materials Society (CMS-HKCBES), 2018. v. 1. p. 1-1.

5-RIBEIRO, A.; VICTOR, R. S.; ALVES, A. N.; DONADON, B. F.; MASCIA, N. T. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE DESLOCAMENTOS VERTICAIS EM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA COM REFORÇO DE FIBRA SINTÉTICA. In: XVI EBRAMEM - Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira-III Congresso Latino-Americano de Estruturas de Madeira., 2018, São Carlos. Anais.... São Carlos: Set EESC USP, 2018. v. 1. p. 1-10.

6-DONADON, B. F.; Mascia, N. T.; Renato Saldanha Victor; TRAUTWEIN, L. M. AVALIAÇÃO DE FIBRAS NATURAIS DE CURAUÁ E SISAL PARA REFORÇO DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA. In: II Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira II Congresso Ibero-Latino-americano da Madeira na Construção, 2017, Junín. Anais..., 2017. v. 1. p. 1-12.

Observa-se que esta produção científica, assim como outras anteriores, foi vinculada ao grupo de pesquisa em estruturas de madeira da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FECFAU) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Este grupo de pesquisa abrange um conjunto de trabalhos que inclui oito pesquisas de iniciação científica (Andre Hakamada, Carolina Spíndola de Abreu Avancini, Felipe Abboud Truzzi Dini, Kesley Alves de Souza, Pedro Szloma Herr Zaterka, Raul Martini Mayer, Rodrigo Teixeira e Vitor Hugo de Oliveira Mello), dois trabalhos de conclusão de curso de graduação (Carlos Augusto Abade Bertoline e Raul Martini Mayer), uma tesi di laurea na Itália (Marta Longo) e cinco dissertações de mestrado (Aléxia Brandão Ribeiro, Bruno Fazendeiro Donadon, Carlos Augusto Abade Bertoline, Reinaldo Washington Moraes e Renato Saldanha Victor). Todos esses trabalhos estão relacionados ao estudo de peças estruturais de madeira engenheirada (MLC) reforçadas com fibras sintéticas e naturais.

Mechanical performance analysis in bending of glulam beams reinforced with synthetic Vectran fibres

Análise do desempenho mecânico de vigas de madeira lamelada colada reforçadas com fibras sintéticas de Vectran

Ramon Vilela; Nilson Tadeu Mascia; Bruno Fazendeiro Donadon; Júlio Soriano

Abstract

Synthetic fibres applied as reinforcement in glued laminated timber (glulam) intend to increase the mechanical performance of beams, changing the brittle to ductile mechanical behaviour of wooden beams. This paper investigates the experimental results of glulam beams reinforced with synthetic fibre subjected to bending and compares them with those obtained by both an analytical method and the numerical method using the Ansys® software. Glulam beams were produced with a low-grade strength class wood species (*Pinus elliottii*) glued with an adhesive of emulsion isocyanate polymeric and reinforced with Vectran® synthetic fibres, positioned on the bottom of the beam. This type of fibre is not yet widely used for structural reinforcement. A three-point bending test was performed for loading in the elastic regime of the glulam beams. The results obtained indicate acceptable approximations of vertical displacements and normal stresses due to the bending of the beam with eight layers of synthetic fabric, both favourable to structural safety, in addition to the significant increase in stiffness of glulam with the introduction of Vectran® fibre reinforcement.

Keywords: Glulam. Structural reinforcement. Bending test. Vectran fibres. Finite element method.

Resumo

O uso de fibras sintéticas como reforço em madeira lamelada colada (MLC) tem a finalidade de melhorar o desempenho mecânico de vigas, alterando o mecanismo de ruptura de frágil para dúctil. Este artigo tem por objetivo investigar resultados experimentais de flexão estática de vigas MLC reforçadas com fibras sintéticas e comparar com resultados obtidos tanto por método analítico quanto por numérico com o auxílio do software Ansys®. As vigas de MLC foram produzidas com *Pinus elliottii*, uma espécie de madeira de baixa resistência, colada com adesivos de emulsão polimérica de isocianato (EPI) e reforçadas com tecido de fibras sintéticas de Vectran® posicionado na face inferior da viga. Este tipo de fibra ainda não é largamente utilizado para reforço estrutural. Foi realizado ensaio de flexão a três pontos com carregamento no regime elástico das vigas de MLC. Os resultados obtidos mostram aproximações aceitáveis do deslocamento vertical e tensões normais devido à flexão da viga com reforço de oito camadas de tecido sintético, ambos a favor da segurança, além do expressivo aumento de rigidez da viga ao se introduzir o reforço de fibras de Vectran®.

Palavras-chave: MLC. Reforço estrutural. Ensaio de flexão. Fibras de Vectran. Método dos elementos finitos.

Introduction

The development of wood engineering technology significantly increased in the nineteenth century when Friedrich Otto Hetzer patented glued laminated timber (glulam), a structural piece comprising two or more wood laminations glued with waterproof adhesive that results in a high strength-to-weight ratio (ONG, 2015).

Glulam can be considered the evolution of lumber beams as the production process involves a more advanced technique, which distributes the natural defects of the wood more evenly in the piece, reducing the standard deviation of its physical and mechanical properties, and therefore increasing its bending strength (THORHALLSSON; HINRIKSSON; SNÆBJÖRNSSON, 2017). The laminations with their grains oriented along the length of the piece can be distributed in the cross-section to generate homogeneous or combined glulam, and in turn, straight, tapered, or curved pieces can be manufactured (BRITISH..., 1999; GAO et al., 2019).

Glulam elements also show significant potential for structural and architectural applications, as supported by numerous studies highlighting their differentials and excellent performances in theoretical, experimental, and numerical analyses (FIORELLI; DIAS, 2011; TIMBOLMAS et al., 2021).

Even with glulam showing improvement in some characteristics when compared with solid-sawn lumber, research on reinforcement has aimed at investigating the mechanical performance, focusing on the increase in stiffness and strength of low-grade glulam. According to Raftery and Kelly (2015), these findings show that reinforcement can contribute to the bending strength, decrease the standard deviation of the characteristic bending strength, and change the failure mode from brittle (tensioned region) to ductile rupture (compressed region).

Furthermore, the reinforcement arrangement in the beam is an important factor to consider, which can be applied internally or to edge faces of the cross-section (ŚLIWA-WIECZOREK et al., 2021) by surface groove seal, glued between the laminations, or by external bonding, each of which is used with different structural purposes.

Among the materials used for reinforcement in glulam beams, metallic and fibrous materials stand out. The first type shows high mechanical properties using steel bars and steel plates (PEIXOTO et al., 2021; WANG et al., 2021). In the second type of reinforcement materials, natural fibres of sisal and flax can be mentioned, which can be grown in abundance and with low processing costs (BORRI; CORRADI; SPERANZINI, 2013). Synthetic fibres have the

most diverse advantages of industrially produced materials as they are stable and can achieve high mechanical properties with thin fabrics. In the field of synthetic fibres, findings show the feasibility of using carbon fibre-reinforced polymers (RESCALVO et al., 2021; VAHEDIAN; SHRESTHA; CREWS, 2019) and glass fibre-reinforced polymers (SHAHIDUL ISLAM; SHAHNEWAZ; ALAM, 2021). Given the importance of using synthetic fibres to reinforce glulam beams and the challenge of seeking new materials, an experimental study used the Vectran® fibre-reinforced polymer composite (DONADON et al., 2020).

Considering the various options for reinforcing glulam beams to extrapolate the limits found in the tests and to give greater freedom in creating projects, computational modelling is an allied technology for innovations in this field of structural engineering. Uzel et al. (2018) evaluated the behaviour of glulam beams reinforced with fibreglass, steel, and aluminium nets, which were glued between two laminations. These researchers used Ansys software, with wood laminations represented by solid elements (SOLID45) and the bonding surfaces of the laminations modelled by contact and target pairs (CONTA174, TARGE170), which resulted in higher rigidity than the experimental results and with mean value differences of 14%. İşleyen et al. (2021) performed a finite element simulation with ABAQUS software to evaluate the behaviour of glulam beams reinforced with CFRP with wood laminations discretized by an 8-node hexahedron element (C3D8R) and adopted linear elastic-perfectly plastic and linear-elastic models in compression and tension, respectively. The CFRP was discretized by 4-node elements (S4R) using the linear elastic model, and its contact with the laminations was perfectly adopted.

Some analytical or numerical methods can be used to analyse and design reinforced glulam beams. This work involved an experimental procedure where glulam beams reinforced with synthetic Vectran® fibre were subjected to bending. The results were then evaluated using both the analytical model of the transformed section method and numerical analysis by the finite element method (FEM) using the ANSYS® Workbench software.

Materials and methods

Materials

To achieve the objectives of this research, the experimental procedures were conducted in three steps: first, wood boards were classified and selected to produce the glulam beams; second,

unreinforced glulam beams were characterized; and finally, beams reinforced with Vectran® synthetic fibres glued with emulsion polymer isocyanate (EPI) were experimentally tested.

The wood species used in this study was *Pinus elliottii* sourced from reforestation, and its origin in Brazil was not provided by the supplier. The wood boards were dried to less than 12% and classified by density. The denser boards were used for the external layers, while the less dense ones were utilised for the internal layers.

From this, three prototype glulam beams were produced, each with a length of 3000 mm and comprising nine softwood laminations, each 20 mm thick. The cross-section of each glulam beam totalled 180 mm in height and 53 mm in width.

Table 1 shows the physical and mechanical properties of each analysed beam. The numbers assigned to beams RG4, RG6, and RG8 are associated with the number of layers of reinforcement applied in the 2nd step of the experimental procedure.

The fabric used as reinforcement was produced from Vectran® fibres obtained from the melt spinning of a liquid crystal polymer (LCP) (KURARAY, 2022). This product has not been used for reinforcement purposes thus far but represents a successful application in other engineering areas, such as aerospace and military areas, safety materials and protective apparel, and industrial applications such as cables and composites. The density of the fibre is 1400 kg/m³, its longitudinal modulus of elasticity is 50.16 GPa, and the tensile strength is 2850 MPa (DONADON et al., 2020). The reinforcements were applied to the bottom of the beam in the tension stress region.

The adhesive used to glue the layers of fibre reinforcement to the bottom of the glulam beams was the bicomponent of emulsion polymer isocyanate (EPI) produced from ReacTITE EP-925 and Hardener 200. The first component is a polyvinyl acetate emulsion adhesive and its reagent is a polymeric MDI. The product has a density of 1280 kg/m³ and a longitudinal modulus of elasticity of 4 GPa (FRANKLIN..., 2022).

To determine the physical properties of the reinforcement, the volume theory for composites was used to calculate the specific volume of fibre (V_f), according to Equation 1 (CAMPBELL, 2010).

$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{W_f/\rho_f + W_a/\rho_a} \quad \text{Eq. 1}$$

Where:

V is the volume;

f and a are the fibre and adhesive indexes, respectively; and

W and ρ are the mass and specific mass, respectively.

The specific volume of adhesive can be determined considering a 5% void volume, according to Huang and Talreja (2005). Thus, Equation 2 provides the parameter required for reinforcement.

Table 1 – Density and elastic properties of glulam beams*

Beam	Density (kg/m ³)	EL (MPa)	ET (MPa)	ER (MPa)	GLT (MPa)	GLR (MPa)	GTR (MPa)
RG4	664.4	11,783.0	589.2	981.9	790.8	841.7	84.2
RG6	605.1	13,752.5	687.6	1,146.0	923.0	982.3	98.2
RG8	520.8	8,841.1	442.1	736.8	593.4	631.5	63.2
Mean	596.8	11,458.9	572.9	954.9	769.1	818.5	81.9
Std. D.	72.16	2,471.70	123.58	205.97	165.89	176.55	17.65
C.V. (%)	12.09	21.57	21.57	21.57	21.57	21.57	21.57

Note: *the subscript indexes represent the wood's orthotropic directions: L for longitudinal (parallel to grain), T for tangential, and R for radial.

$$X_c = X_f V_f + X_a V_a \quad \text{Eq. 2}$$

Where X is the parameter to be determined, such as the longitudinal modulus of elasticity (E_c) or specific mass (ρ_c).

Table 2 presents the specifications of the reinforcement applied in each beam.

Experimental bending tests

Characterization of the glulam beams

Pinus elliottii was used, and the modulus of elasticity (MOE) was obtained by a three-point bending test. The MOE parallel to the grain is determined from the vertical displacement considering the effects of bending and shear, according to Equation 3.

$$\delta = \frac{Pl^3}{48EI} + \frac{\kappa Pl}{4GA} \quad \text{Eq. 3}$$

Where:

δ represents the difference between the displacements corresponding to 50% and 10% of the maximum applied load;

P the difference between the loads at 50% and 10% of the maximum load;

l the span;

E ($= E_L$) the MOE parallel to grain;

I the cross-sectional moment of inertia of the beam;

A the cross-sectional area; G the shear modulus; and

κ the shape factor.

Considering the shape factor for rectangular sections $\kappa = 1.2$ and adopting the correlation $G = E/14$ (GAGNON; PIRVU, 2011), the modulus of elasticity is written as Equation 4.

$$E = \frac{P}{\delta} \left(\frac{l^3}{48I} + \frac{21l}{5A} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

Thus, the modulus of elasticity was obtained experimentally, according to NBR 7190 (ABNT, 1997), and the other elastic constants were determined from the correlations established by Bodig and Jayne (1993) and Mascia and Vanalli (2012) for softwood species.

Reinforcement glulam beams

The three-point bending test was conducted to obtain the displacements and the normal stress of the Glulam beam reinforced with synthetic fibre to compare it with the analytical and numerical results. Figure 1 shows the equipment used in the bending test, including the distributed load in a length of 100 mm, five strain gauges used 200 mm apart from the beam centre, and one transducer (LVDT). To avoid possible errors due to physical or geometric eccentricities around the beam axes, the supports were increased with a metal device that restricted the displacements in the y-axis and the rotation around the beam's longitudinal axis.

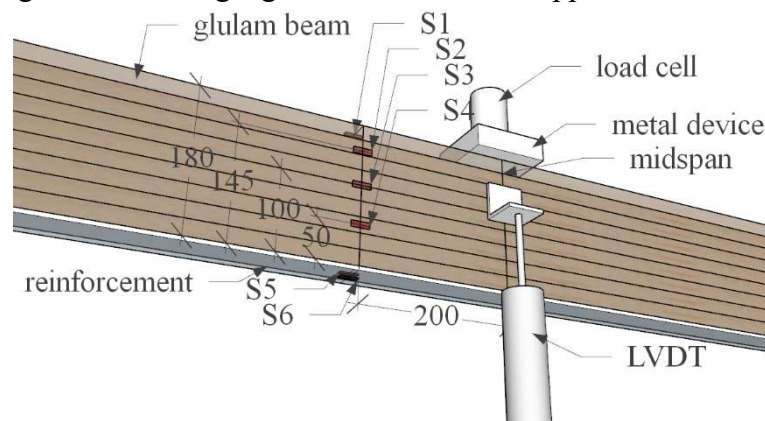
The data of the transducers and the load cell and strain gauge were collected by a data acquisition system and tabulated as a function of time. The sampling rate was 1 second. The load application device consisted of an open frame anchored at four points with a capacity of 300 kN and a load cell with a capacity of 150 kN. The load was applied by a hydraulic jack with a pump.

Table 2 – Elastic properties of Glulam beams*

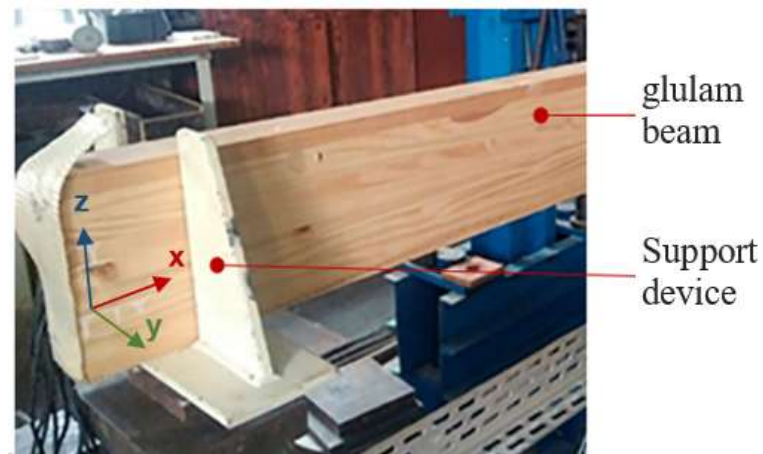
Beam	Number of layers		Fibre mass	Adhesive mass (kg)	ρ_c	E_c
------	------------------	--	------------	--------------------	----------	-------

		Thickness reinforcement (mm)	(kg)		(kg/m ³)	(MPa)
RG4	4	3.0	0.88	0.87	841.65	84,17
RG6	6	6.0	1.32	1.20	982.32	98,232
RG8	8	9.0	1.76	1.42	631.51	63,151

Figure 1 – Strain gauge, transducers, and support of the beams



(a) Position of strain gauge and LVDT



(b) Support device

The first step of the test was to characterize the longitudinal modulus of elasticity of the glulam beam, where a load of approximately half of its ultimate load was applied. This load was estimated from a previous test. At this stage, the beam was only equipped with the transducer T1, which allowed the measurement of vertical displacements in the midspan of the beams. The transducer resolution was set as 4 μm .

Analytical method

Calculating the normal stresses in a specific strain gauge is possible by applying the relationship between stress σ and strain ε , according to Equation 5.

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Eq. 5}$$

Where:

σ is the estimated stress;

E is Young's modulus according to the characterization of the beams (Table 1); and

ε is the strain.

By the equilibrium of forces, Equation 6 gives the bending moment acting at the position of strain gauge.

$$M(x) = \frac{Px}{2} \quad \text{Eq. 6}$$

Where:

M is the bending moment;

P is the load applied at the midspan; and

x is the distance in the x-axis between the strain gauge and nearest support.

To determine the effective bending stiffness EI_{ef} of the reinforced beam, the transformed section is employed where the fibre width is multiplied by η , defined by Equation 7.

$$\eta = \frac{E_f}{E_{w,0}} \quad \text{Eq. 7}$$

Where:

η is the transformation factor of the fibre section width;

E_f is the modulus of elasticity of the fibre; and

$E_{w,0}$ is the longitudinal modulus of elasticity of the wood.

Equation 8 determines the centroid in the z-axis.

$$z_{CG} = \frac{b_w h_w \bar{z}_w + \eta b_f h_f \bar{z}_f}{A_w + \eta A_f} \quad \text{Eq. 8}$$

Where:

z_{CG} is the centroid of the overall section;

b is the width;

h is the height $\bar{z}$ distance on the z-axis of the centroid of the section and the origin;

A is the cross-sectional area; and

w and f are the indexes for wood and fibre, respectively.

Thus, Equation 9 determines the effective bending stiffness EI_{ef} as follows:

$$EI_{ef} = E_w \left(\frac{b_w h_w^3}{12} + A_w d_w^2 \right) + \eta E_w \left(\frac{b_f h_f^3}{12} + A_f d_f^2 \right) \quad \text{Eq. 9}$$

Where d_w and d_f are the distances between the centroid of the total section z_{CG} and the centroid of each section (z_w and z_f), respectively.

To obtain a better fit of the results, the displacements due to the shear effect were considered. Thus, Equation 10 shows how to determine the effective shear stiffness GA_{ef} for a transformed section method (GAGNON; PIRVU, 2011).

$$GA_{ef} = \frac{e^2}{\left(\frac{h_1}{2G_1 b_1} \right) + \left(\sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{G_i b_i} \right) + \left(\frac{h_n}{2G_n b_n} \right)} \quad \text{Eq. 10}$$

Where e is the distance between the centres of gravity of the upper and lower layers;
 h_1 is the stiffness of the i-layer;
 G_i is the shear modulus of the i-layer;
 b_i is the width of the i-layer; and
 n is the last layer.

However, Equation 11 determines the normal stresses σ_i at a given point in a section due to bending.

$$\sigma_w(z) = E_w \frac{M}{EI_{ef}} z; \sigma_f(z) = \eta E_w \frac{M}{EI_{ef}} z \quad \text{Eq. 11}$$

Where z is the location in the z-axis of the analysed point.

For the numerical and analytical models, the fibre-adhesive composite was assumed to be an elastic isotropic material with Poisson's ratio $\nu = 0.3$. The orthotropic material model was used for wood, and Table 3 shows the elastic correlations necessary to develop the analyses.

Numerical analysis

In the ANSYS® simulation, the contact between all elements was considered bonded, therefore without relative displacement between them. The numerical model was discretized using the maximum element size of 10 mm, generating a mesh containing 34,260 SOLID185, 32,562 CONTA174, 32,562 TARGE170, and 30 SURF154 elements. This mesh configuration was used for the three simulated beams (ANSYS, 2018).

SOLID185 is a solid element used to model 3-D structures. This element comprises eight nodes with three degrees of freedom at each node, translated in the x, y, and z-directions (Figure 2).

The element has elastic, plasticity, hyperelasticity, creep, stress stiffening, large deflection, and large strain capabilities. This element was applied to simulate glulam beams.

TARGE170 is used to represent several 3-D target surfaces. In this model, the element was used to simulate the reinforcement at the bottom of the beam composed of Vectran® fibres.

CONTA174 was used in the model to represent contact between 3-D target surfaces and a deformable surface defined by this element (i.e., reinforcement to glulam beam).

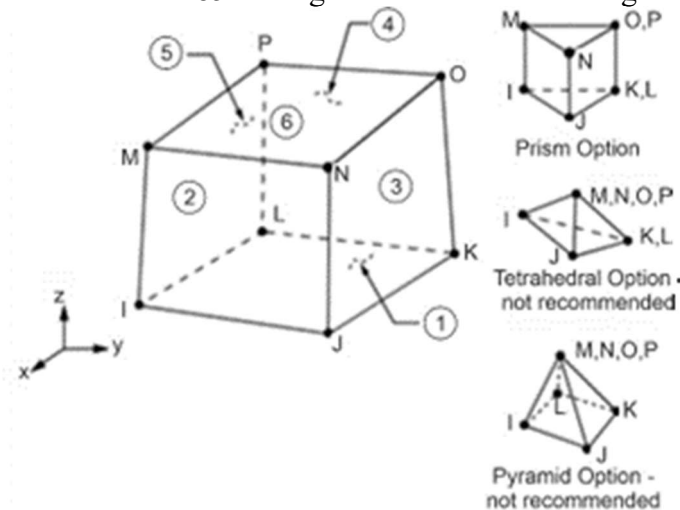
The load was applied on the element SURF154. The element comprises eight nodes and material properties. Figure 3 shows how duplicated triangular elements are used to form the element. Loading is carried out in the numerical model by 10 steps of equal 1.08 kN increments.

Table 3 – Correlations and Poisson's ratios for Pinus (BODIG; JAYNE, 1993)

Description	Correlations		
Long modulus of elasticity	$E_L/E_L = 1.00$	$E_L/E_T = 20.00$	$E_R/E_L = 12.50$
Shear modulus	$E_L/G_{LR} = 14.00$	$E_L/G_{LT} = 14.90$	$E_L/G_{RT} = 140.00$
Poisson's ratio	$\nu_{LR} = 0.37$	$\nu_{LT} = 0.42$	$\nu_{TR} = 0.45$

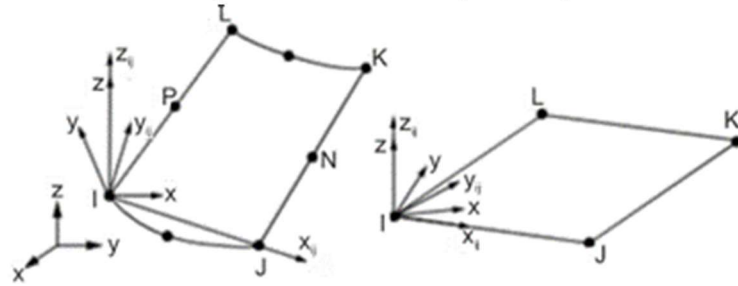
Note: *the subscript indexes represent the wood's orthotropic directions: L to longitudinal (parallel to grain), R to radial, and T to tangential.

Figure 2 – SOLID185 homogeneous structural solid geometry



Source: Ansys (2018).

Figure 3 – SURF154 geometry



Source: Ansys (2018).

Figure 4 shows the mesh discretization and boundary conditions of the numerical model simulated by ANSYS®.

Results and discussion

Vertical displacement

Figure 5 depicts the displacement results at the midspan of the RG8 beam for both nonreinforced and reinforced beams with eight layers of fibre cases, as obtained from experimental, analytical, and numerical methods. The experimental results of the nonreinforced beam show a deviation in the load level of approximately 2.00 kN, with a change in the inclination of the curve, indicating a reduction in stiffness. This behaviour was not observed in the experimental reinforced beam, which showed a more linear behaviour and a higher stiffness than the nonreinforced beam.

Table 4 presents a comparison of the displacement results of reinforced beams obtained through experimental, analytical, and numerical methods to RG8. The initial nonregular displacements of the experimental results were observed up to 2.02 kN. The numerical and analytical results show a linear pattern and a constant difference of 2.53% between them, demonstrating that the methods produce different results; however, they are very similar to each other.

Figure 6 shows the displacement results at the midspan of the RG6 beam. The nonreinforcement beam experimentally presented slightly more stiffness than the reinforced beam until approximately 6 kN; however, after this load level, the reinforced beam showed a higher stiffness.

Figure 4 – 3D modelling simulated by ANSYS®

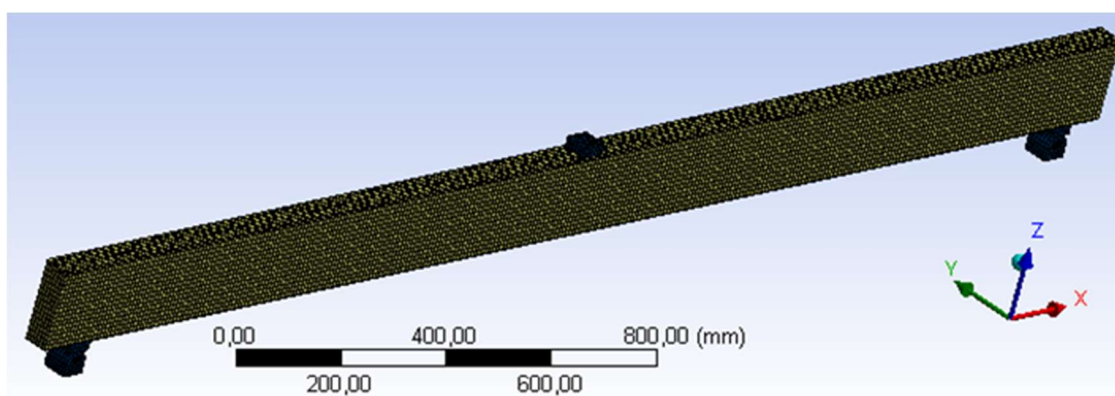


Figure 5 – Vertical displacements at the midspan of the RG8 beam

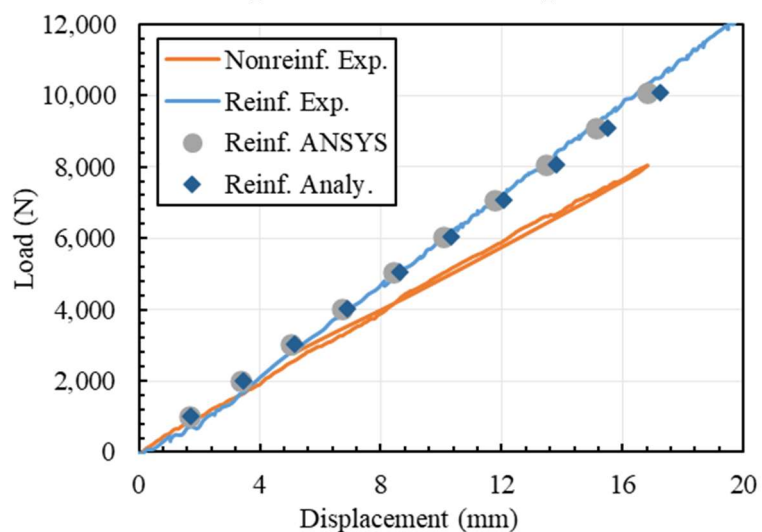
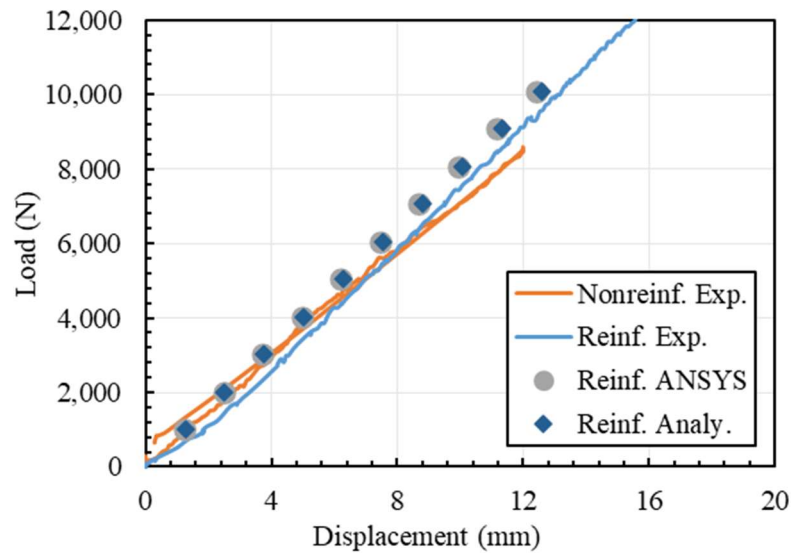


Table 4 – Comparison among the vertical displacements of RG8

Load (kN)	Vertical displacement (mm)			Difference (%)		
	Analytic	ANSYS	Experimental	Analytic/ Experimental	ANSYS/ Experimental	Analytic/ Numeric
1.01	1.72	1.68	2.35	-26.78	-28.63	-2.53
2.02	3.45	3.36	3.92	-12.05	-14.28	-2.53
3.02	5.17	5.04	5.47	-5.40	-7.79	-2.53
4.03	6.90	6.72	7.02	-1.79	-4.27	-2.53
5.04	8.62	8.40	8.64	-0.21	-2.73	-2.53
6.05	10.34	10.08	10.18	1.57	-1.00	-2.53
7.06	12.07	11.76	11.72	2.94	0.34	-2.53
8.06	13.79	13.44	13.40	2.94	0.33	-2.53

Figure 6 – Vertical displacements at the midspan of the RG6 beam



A comparison of the vertical displacement results for reinforced beams obtained by experimental, analytical, and numerical methods for RG6 is shown in Table 5. Initially, the experimental results showed nonregular displacements up to a load of 2.02 kN. As the load increased, the simulated methods more adequately represented the experimental results. The numerical and analytical results had a mean difference of 1.43%, indicating a negligible difference between these methods.

Figure 7 displays the results of the displacements at the middle span of the RG4 beam. The nonreinforcement beam presents a linear behaviour, whereas the reinforced beam experimentally shows a significant deflection point close to the 2.00 kN load, showing evidence of more rigidity than the nonreinforcement beam until the load level of 7.00 kN. In this case, the numerical and analytical results were closer to the nonreinforced beam than to the reinforced beam due to the nonlinear behaviour of the reinforced beam.

Table 6 presents a comparison of the vertical displacement results for RG4, which were obtained using experimental, analytical, and numerical methods. As with the previous comparisons, nonlinearity was observed in the initial loads, as observed by the difference between the linear methods and the experimental results. The numerical and analytical methods had a mean difference of 2.05%, indicating a slight discrepancy between them.

Finally, a comparison of displacements between loads of 2.00 kN and 8.00 kN was performed to observe the stiffness differences between the reinforced and nonreinforced beams, and Table 7 presents the results. This range of loads was selected to avoid initial nonlinear behaviour. The

comparison reveals that the addition of reinforcement significantly reduces the beam displacement by an average of 21.3%. Furthermore, Table 7 highlights that RG8 exhibits the most improvement in stiffness compared to its nonreinforced specimen, followed by the RG4 and RG6 beams.

Table 5 – Comparison among the vertical displacements of RG6

Load (kN)	Vertical displacements (mm)			Differences (%)		
	Analytic	ANSYS	Experimental	Analytic/Experimental	ANSYS/Experimental	Analytic/Numeric
1.01	1.26	1.24	1.94	-35.18	-36.11	-1.44
2.02	2.52	2.48	3.30	-23.84	-24.93	-1.43
3.02	3.77	3.72	4.58	-17.66	-18.84	-1.43
4.03	5.03	4.96	5.82	-13.55	-14.79	-1.43
5.04	6.29	6.20	7.05	-10.74	-12.02	-1.43
6.05	7.55	7.44	8.25	-8.51	-9.83	-1.43
7.06	8.81	8.68	9.49	-7.25	-8.58	-1.43
8.06	10.06	9.92	10.74	-6.33	-7.67	-1.43

Figure 7 – Vertical displacements at the midspan of the RG4 beam

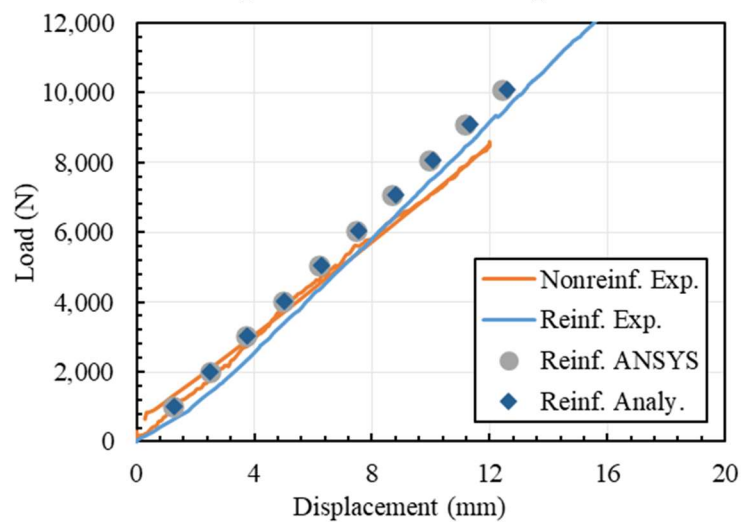


Table 6 – Comparison among the vertical displacements of RG4

Load (kN)	Vertical displacement (mm)			Difference (%)		
	Analytic	ANSYS	Experimental	Analytic/ Experimental	ANSYS/ Experimental	Analytic/ Numeric
1.01	1.54	1.50	2.27	-32.42	-33.80	-2.05
2.02	3.07	3.01	3.86	-20.50	-22.13	-2.05
3.02	4.61	4.51	5.38	-14.26	-16.01	-2.05
4.03	6.15	6.02	6.80	-9.69	-11.54	-2.05
5.04	7.68	7.52	8.15	-5.77	-7.70	-2.05
6.05	9.22	9.03	9.42	-2.13	-4.14	-2.05
7.06	10.75	10.53	10.60	1.42	-0.66	-2.05
8.06	12.29	12.04	11.71	4.98	2.83	-2.05

Table 7 – Comparison between displacements of nonreinforced and reinforced beams

Beam	Nonreinforced (mm)			Reinforced (mm)			Difference (%)
	P (kN) 2.00	P (kN) 8.00	Diff. (%)	P (kN) 2.00	P (kN) 8.00	Diff. (%)	
VG8	4.14	16.77	12.63	3.92	13.28	9.36	-25.86
VG6	2.76	11.32	8.56	3.41	10.67	7.25	-15.24
VG4	3.02	12.44	9.42	4.52	11.80	7.28	-22.72
Mean	3.31	13.51	10.20	3.95	11.92	7.97	-21.28
Std. Dev.	0.60	2.35	1.75	0.45	1.07	0.99	4.45
COV. (%)	18.06	17.38	17.16	11.43	8.99	12.39	20.94

Normal stress

Figure 8 depicts the normal stress measured and calculated for the RG8 beam at the strain gauge position under a load of 10.08 kN. The experimental results demonstrate nonlinear behaviour, indicating that the layers have variations in the values of their elastic characteristics, as seen in Section 2.1 of this article. The analytical and numerical results reveal acceptable convergence at the top and bottom of the cross-section, where the stresses are critical. Taking into account the experimental and analytical procedures, the differences at the top were 1.3%, and those at the bottom were 25.5%. Considering the experimental and numerical results, the stress differences were 12.7% and 10.1% at the top and bottom, respectively. These differences are in favour of structural security.

Figure 9 shows the normal stresses of the analytical and numerical results in the strain gauge positions of the RG6 beam to a load of 10.08 kN. The inclinations of the analytical and numerical stress paths are parallel to each other but differ significantly from the experimental results. This may indicate that stiffness, and consequently, the longitudinal modulus of elasticity of the analytical and numerical models, is different from that of the experimental model.

Considering both the experimental and analytical procedures, the compressive and tensile stress differences were 32.8% at the top and 71.6% at the bottom, respectively. When taking into account the experimental and numerical results, the stress variations were 41.0% and 54.6% at the top and bottom, respectively. In this case, despite the difference between the calculated critical normal stress and the measured stresses having increased safety, the proportion of this difference generates raw material waste. In this comparison, the position of neutral axes is relatively similar among all models.

Figure 10 shows the normal stress measured and analytical and numerical procedures at the strain gauge position of the RG4 beam for a load of 10.08 kN. The slopes of the analytical and numerical results are parallel to each other, different from the experimental results, and show a behaviour similar to the results of normal stresses for RG6. Considering both the experimental and analytical procedures, the discrepancies were 26.6% at the top and 35.5% at the bottom. Regarding the experimental and numerical results, the differences in stress were 32.3% and 21.2% at the top and bottom, respectively. Although the differences were in favour of safety, they should not be overlooked. It is noteworthy that the position of the neutral axes is quite similar among the models in this comparison.

Regarding the results for the RG8 beam, which contains a greater volume of synthetic fibres in its reinforcement, the experimental results corroborate those expected from the analytical model and the numerical model. The distribution of normal stresses along the height of the beam cross-section, in which the reinforcement fibres absorb most of the normal stresses instead of the wood fibres, demonstrates the effectiveness of the reinforcement. It can be observed that the load level of 10.08 kN has a relation of 201% between the tension in the reinforcement and in the wood fibres.

Figure 8 – Stress diagram in the cross-section at 200 mm from the load cell position of the RG8 beam

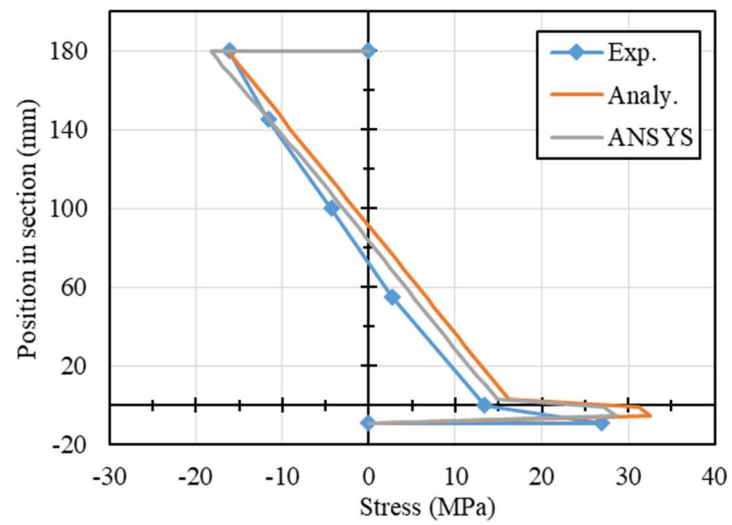


Figure 9 – Stress diagram in the cross-section at 200 mm from the load cell position of the RG6 beam

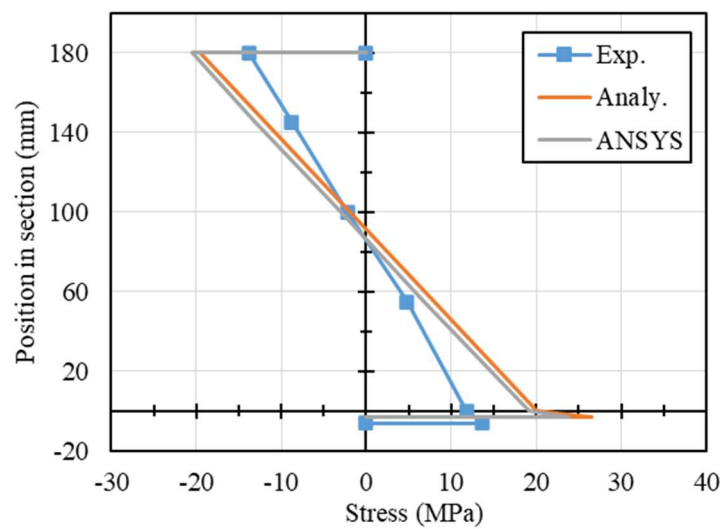
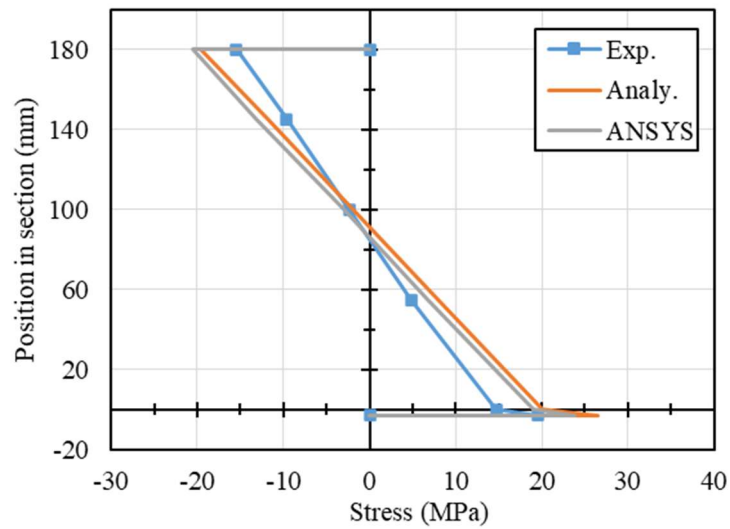


Figure 10 – Stress diagram in the cross-section at 200 mm from the load cell position of the RG4 beam



The disparities observed between the simulated and experimental results of the RG6 and RG4 beams demonstrate significant differences in critical stresses. In this case, using a larger number of specimens is advisable to gain a more in-depth understanding of this issue. A possible explanation for this problem is that it could be associated with the adoption of the mean modulus of elasticity instead of the specific elasticity modulus for each lamination. As the characterization of each lamination was conducted by density, this hypothesis was not tested in this study, but it can be suggested to enhance knowledge on the subject.

Conclusions

This paper aims to analyse the results of vertical displacements and normal stresses by experimental, analytical, and numerical procedures of glulam reinforced with synthetic fibres subjected to bending. These results with unreinforced beams were also compared.

The results indicate that numerical differences between the finite element and transformed section methods are acceptable considering the displacement and normal stresses, both lower than 3%.

The numerical and analytical models are not indicated to initial loads when considering all glued elements between the beams. To have compatibility between the experimental, analytical, and numerical models, the nonlinearity of fibre reinforcement behaviour due to the initial accommodation of the reinforcement is necessary.

Despite showing improved safety, the normal stresses obtained by the analytical and numerical models were not accurate compared with the normal stresses obtained by the experimental tests.

Based on the results obtained, for the adjustment of analytical and numerical models, in the next stage of the study of the mechanical performance of synthetic Vectran fibres interacting as reinforcement of glulam beams, the behaviour of non-linearity should be evaluated.

References

ANSYS. ANSYS workbench products release notes: ANSYS Workbench Release 19.2. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. Mechanics of wood and wood composites. New York: Krieger Pub Co, 1993.

BORRI, A.; CORRADI, M.; SPERANZINI, E. Reinforcement of wood with natural fibers. Composites Part B: Engineering, v. 53, p. 1–8, oct. 2013.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 1194: timber structures: glued laminated timber: strength classes and determination of characteristic values. Brussels, 1999.

CAMPBELL, F. C. Structural composite materials. Materials Park: ASM International, 2010.

DONADON, B. F. et al. Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. Engineering Structures, v. 202, p. 109818, jan. 2020.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally bonded: theoretical and experimental evaluation. Materials and Structures, v. 44, n. 8, p. 1431–1440, oct. 2011.

FRANKLIN INTERNATIONAL. ReacTITE EP 925 Wood Glue. Available: <http://www.franklinadhesivesandpolymers.com/Wood-Adhesives-International/Wood-Adhesives/Application/Laminating-Glue/ReacTITE-EP-925.aspx>. Access: 27 feb. 2022.

GAGNON, S.; PIRVU, C. CLT Handbook: cross-laminated timber. Quebec: FPInnovations, 2011.

GAO, S. et al. Mechanical Properties of Glued-Laminated Timber with Different Assembly Patterns. Advances in Civil Engineering, v. 2019, ID 9495705, jul. 2019.

HUANG, H.; TALREJA, R. Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites. *Composites Science and Technology*, v. 65, n. 13, p. 1964–1981, oct. 2005.

İŞLEYEN, Ü. K. et al. Behavior of glulam timber beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer strip for flexural loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 40, n. 17–18, p. 665–685, sep. 2021.

KURARAY. Vectran®: liquid Crystal Polymer Fiber technology: catalog. Available: <http://www.vectranfiber.com/>. Access: 27 feb. 2022.

MASCIA, N. T.; VANALLI, L. Evaluation of the coefficients of mutual influence of wood through off-axis compression tests. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 522–528, May 2012.

ONG, C. B. 7 - Glue-laminated timber (Glulam). In: ANSELL, M. P. (ed.). *Wood composites*. Bath: Woodhead Publishing, 2015.

PEIXOTO, L. S. et al. Bending behavior of steel bars reinforced Glulam beams considering the homogenized cross section. *Wood Material Science & Engineering*, p. 1–7, mar. 2021.

RAFTERY, G. M.; KELLY, F. Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. *Composites Part B: Engineering*, v. 70, p. 9–19, mar. 2015.

RESCALVO, F. J. et al. Improving ductility and bending features of poplar glued laminated beams by means of embedded carbon material. *Construction and Building Materials*, v. 304, p. 124469, oct. 2021.

SHAHIDUL ISLAM, M.; SHAHNEWAZ, M.; ALAM, M. S. Glass fiber reinforced Polymer (GFRP) retrofitting of timber I-Joists with opening and notch. *Structures*, v. 34, p. 804–826, dec. 2021.

ŚLIWA-WIECZOREK, K. et al. The Influence of CFRP Sheets on the Load-Bearing Capacity of the Glued Laminated Timber Beams under Bending Test. *Materials*, v. 14, n. 14, p. 4019, jan. 2021.

THORHALLSSON, E. R.; HINRIKSSON, G. I.; SNÆBJÖRNSSON, J. T. Strength and stiffness of glulam beams reinforced with glass and basalt fibres. *Composites Part B: Engineering, Composite Lattices and Multiscale Innovative Materials and Structures*, v. 115, p. 300–307, apr. 2017.

TIMBOLMAS, C. et al. Transformed-section method applied to multispecies glulam timber beams subjected to pure bending. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, p. 1–10, oct. 2021.

UZEL, M. et al. Experimental investigation of flexural behavior of glulam beams reinforced with different bonding surface materials. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 149–163, jan. 2018.

VAHEDIAN, A.; SHRESTHA, R.; CREWS, K. Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: full-scale experiments. *Composites Part B: Engineering*, v. 164, p. 377–389, 1 May 2019.

WANG, Y. et al. The bending-shear behaviors of steel reinforced fast-growing poplar glulam beams with different shear-span ratios. *Construction and Building Materials*, v. 300, ID 124008, sep. 2021.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) and National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the financial support given to enable this work to be carried out.

Editores do artigo: Marcelo Henrique Farias de Medeiros e Júlio Cesar Molina

Editor de seção: Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre – RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109818>

¹**Bruno F. Donadon** (donadon.bf@gmail.com), ^{2,*}**Nilson T. Mascia** (nilson@fec.unicamp.br), ³**Ramon Vilela** (ramonvilela@outlook.com), ⁴**Leando M. Trautwein** (leandromt@fec.unicamp.br)

^{1,2,3,4}**University of Campinas - UNICAMP**

School of Civil Engineering, Architecture and Urban Design

*Corresponding author

ABSTRACT

The growing interest in sustainable buildings has inspired the improvement of the timber structures in the construction market. As a raw material, wood may present natural defects that can cause changes in its mechanical properties, such as strength reduction, as well as brittle failure under tension, which limit the application of this material in construction. In recent decades, synthetic fibers with high tensile strength are available as construction material, and research to evaluate the efficiency of synthetic fibers and adhesive composites as a reinforcement on glued-laminated timber beams has been carried out. This paper deals with an experimental study via bending tests on glue-laminated timber beams made of *Pinus elliottii*, a low-strength wood class originated from reforestation, and strengthened with fiber reinforced polymers of Vectran fibers and epoxy adhesive. A numerical procedure based on finite element method is developed to compare with experimental results too. Vectran is synthetic thermoplastic fiber with high mechanical properties, however, its potential application as reinforcement material in structural pieces is still little explored. The obtained results in this work demonstrated that the application of Vectran-FRP reinforcement on glued-laminated timber beams provided both an increase of 19.48 to 34.95 % in the elastic regime stiffness and of 7 to 40 % in the ultimate load, when compared with unreinforced similar beams. Numerical analysis adequately confirmed the experimental results on elastic behavior, while in the non-elastic phase revealed a considerable difference. A reduction in the rupture's coefficient of variation regarding the reinforced beams was verified too. In addition, the application of fibers as structural reinforcement changed the timber's failure mode from brittle in tension to ductile in compression. The results show that Vectran fibers are mechanically efficient as reinforcement, with perspectives of application in construction.

Keywords: Vectran; synthetic fibers; glued-laminated timber; reinforcement; bending test.

INTRODUCTION

Since 1992, the nations of the world have committed to developing sustainability programs aiming at reducing the emission of gases in the atmosphere. This attitude encouraged the use of renewable materials, that incorporate carbon credits in buildings, such as wood, thereby helping to reduce greenhouse gases, according to Wegener and Zimmer [1].

Studies have demonstrated that the use of wood in construction results in both a lower energy expenditure and lower carbon emissions when, for example, compared to concrete and steel, Gustavsson et.al [2].

The greatest obstacle that makes the designers hesitant to employ the material is related to the lack of knowledge of the material's mechanical behavior and the suitability of the design to constructive practice. Natural defects in wood and restrictions in the size of commercial pieces are also limiting application of this material in construction, Wood Handbook [3].

In order to improve the wood properties and to solve uncertainties arising from the use of this material, studies have been carried out in order to combine wood with other materials, resulting in a composite with new mechanical properties. According to the definition presented by several authors, such as Gibson [4], a composite is a set of two or more materials combined in macroscopic scale, that exhibits a distinct interface between them, in order to function effectively as unit, also possessing a set of mechanical properties that none of the components presented when working individually.

The combination of glued-laminated timber beams with synthetic fibers, glued by an adhesive constituting a composite (FRP- Fiber Reinforcing Polymers), in a context of structural reinforcement has been highly enhanced because of their great advantages over the commonly used types, for instance, steel bars (Soriano et al. [5]). The composite of fibers and adhesive, FRPs, provides expressive increments of stiffness, strength and reduce the variability of material properties. Carbon and glass fibers are, in general, the most FRPs used to strengthen timber beams, according to Schober et al. [6] and Fiorelli and Dias [7].

The increase in stiffness becomes even more interesting in the perspective of the growing use of softwood from reforestation, such as Pinus or Spruce wood, which belong to the wood classes with low stiffness and strength, as observed in studies by Raftery and Rodd [8].

In reinforced glued-laminated timber beams, the fibers are usually bonded to the tensile face (the lower region), thus increasing stiffness, avoiding brittle failure and providing better mechanical performance for these beams.

Gómez et al. [9] also stated that, although the reinforcement can be applied to the sides of beams, the application at the bottom is structurally more interesting with results more predictable.

Some works, such as Fiorelli and Dias [7], Corradi et al.[10], Biscari [11] and Vahedian et al. [12], shown that the application of fiber reinforcement on full-scale timber beams is limited to fibers already known as glass and carbon, not addressing new possible materials available in the market to be used for this purpose. In this aspect, this research sought to evaluate a new material, Vectran fibers, as reinforcement of glued-laminated timber beams.

Vectran fibers have not largely employed for civil engineering purposes yet. However, they represent successful application in other demanding areas, due to these fibers offer a combination and balance of properties that are unmatched by other high-performance fibers available in construction market. These fibers are used in aerospace and military areas, ocean exploration and development, safety materials, industrial applications, protective apparel, cables and composites, demonstrating, thus, their high mechanical performance [13].

As a high-performance multifilament thermoplastic fiber, Vectran fibers are obtained from LCP (Liquid Crystal Polymers), which are molecules with rigid structures organized into ordered domains in both solid and liquid form. These ordered domains result in anisotropic behavior in the liquid form, giving rise to the term "liquid crystal polymer". The fibers are formed by extrusion of the molten LCP through capillaries, and during their extrusion process the molecular domains are oriented parallel to the fiber axial direction, which provide their high properties and are equivalent to the materials used as structural reinforcement as can be seen in Table 1 ([14]). These fibers have a good specific strength/weight ratio and are promising to be applied as a structural reinforcement element.

Table 1. Comparison of fiber axial direction properties of material used as reinforcement.

Materials	Density (g/cm³)	Tensile Strength (GPa)	Elastic modulus (GPa)
Carbon fiber AS4	1.8	4.3	230

Glass fiber	2.6	3.4	72
Vectran fiber NT	1.4	1.1	52
Vectran fiber HT	1.4	3.2	75
Vectran fiber UM	1.4	3.0	103
Steel	7.9	2.0	210

Using the following synthetic fibers, Vectran UM, carbon and glass, common in FRP reinforcements as Table 1 shows, Mascia et al. [15] developed a numerical approach addressed to glued laminated timber beams reinforced with these fibers. In that study based on research of Bertoline [16] and Donadon [17] as well, it was reported that Vectran fiber has the advantage of costing about 2.5 times less than carbon fiber and, in turn, about 0.25 higher than glass reinforcement. According to a recent assessment in the Brazilian construction market, the cost of Vectran fibers reached US \$ 70,000.00 / m³, while carbon fibers cost US \$ 171,097.50 / m³ and glass fibers US \$ 45,186.00 / m³. Apart from that, considering the densities, the tensile strengths and the modulus of the elasticities of these fibers to achieve equivalent resistance gains, the layer of glass fiber would have to be thicker than both carbon and Vectran fibers UM. Thus, even the glass fiber having a lower cost than other fibers, the cost difference between glass and Vectran fibers is not very significant. Considering both the cost and the results of normal stress and displacements, the use of Vectran fiber can be an interesting alternative when compared to glass fiber and its mechanical performance can be positioned at an intermediate level between carbon fiber and glass fiber.

In this context, this work intends to provide information via experimental procedure for understanding the mechanical behavior of glued-laminated beams reinforced with a composite of Vectran fibers, through the results of stiffnesses and strengths obtained by bending tests. It also aims to promote an increase in the sustainable use of wood from reforestation and of low-class strength for structural purposes in building construction and the feasibility of the application Vectran fibers such as FRP-reinforcement.

MATERIALS AND METHODS

Specification of the materials for the preparation of the beams

Layers of a sample of the *Pinus elliottii* species, corresponding to a low-strength wood class according to Brazilian standard, ABNT-NBR 7190: Design of timber structures [18], were used to prepare three unreinforced and five reinforced laminated beams to the bending tests. Samples similar to this size were used by Fiorelli and Dias [7], testing four laminated

timber beams strengthened by Glass-FRP reinforcement and two unreinforced reference beams (all beams in structural size) to compare the mechanical efficiency of the reinforcement. Further, Corradi et al. [10], Hoseinpour et al. [19] evaluated the effect of the FRP-reinforcement with fibers, such as carbon, glass, and carbon and flax, respectively, using both small and structural size specimens, being small samples for the latter.

Table 2 lists the following mechanical properties for the wood samples used in reinforced beams: compressive parallel to grain strength f_{c0} and modulus of elasticity parallel to grain E_{c0} . The mean density of this wood sample was $\rho = 560 \text{ kg / m}^3$ and mean layer's moisture content was around 10.5 %.

Table 2. Mechanical longitudinal properties for the wood sample.

Sample	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
Vec 1	37.34	9233
Vec 2	41.15	11760
Vec 3	40.54	10475
Vec 4	42.12	12073
Vec 5	34.61	8629
Mean	39.15	10434

On the basis of ABNT-NBR 7190 [18], it should be noted that the tensile parallel to grain strength f_{t0} is 30 % great than the compressive parallel to grain strength, whereas for limit state design both strengths are assumed equal. Apart from that, it is important to observe that ABNT-NBR 7190 [18] differently of European standard, Eurocode 5: Design of timber structures [20] considers in the calculation to design or verification of timber structural members, including glued-laminated beams, subjected to bending the normal, compressive or tensile strengths parallel to grain, based on compression tests, rather than bending tests.

In this research, the FRP-reinforcement applied in beams was made with uni-directional bundle fabric of Vectran HD fibers and epoxy adhesive. The foregoing Table 1 lists the mechanical properties of Vectran fibers: tensile strength $f_t = 3.2 \text{ GPa}$, modulus of elasticity of $E_f = 75 \text{ GPa}$ and density of 1.4 g/cm^3 %. The epoxy adhesive, Sikadur-32, used in the composite, is structural adhesive, bicomponent with medium-viscosity, with the following characteristics: strength $f_a = 50 \text{ MPa}$, modulus of elasticity of $E = 5 \text{ GPa}$ and density is 1.7 g / cm^3 , Sika Brazil [21].

In this work in order to evaluate the influence of the composite thickness of the FRP-reinforcement applied on the beams, Vectran fabrics were used in five different percentages as listed in Table 3. It is noted that Fiorelli et al. [22] recommended the 3% reinforcing ratio when tested glass fibers as a reinforcement of glued-laminated timber beams.

Table 3. Composite thicknesses used in bending tests.

Sample	Beam height (mm)	Number of textile layer (units)	Composite thickness (mm)	Reinforcing ratio (%)	Unit weight (g/m ²)
Vec 1	180	2	3.5	1.9	1622
Vec 2	180	4	3.0	1.7	1632
Vec 3	180	3	5.0	2.8	2433
Vec 4	180	6	6.0	3.3	2448
Vec 5	180	8	9.0	5.0	3264

For the evaluation of the physical and mechanical characteristics of the reinforcement, the rule of mixtures can be used (Campbell [23]), in which the specific volume fractions of fiber (V_f) and adhesive (V_a) can be calculated according to Eq. 1:

$$V_f = \frac{W_f/\rho_f}{W_f/\rho_f + W_a/\rho_a}$$

$$V_a = \frac{W_a/\rho_a}{W_f/\rho_f + W_a/\rho_a} \quad (1)$$

where the indexes f and a represent fiber and adhesive, W and ρ the weight and specific weight. With the unit weights (grammage) used for Vectran fiber and for the epoxy adhesive, and the reinforced area of the beam, the weight of each material was obtained by weighing with a 0.1 g precision scale. Using, then, the specific volume fractions of fibers and adhesive of each reinforcement combination (Vec 1 to Vec 5 beams), calculated by Eq.1, the mechanical properties (the modulus of elasticity and the strength) of the fiber (X_f) and adhesive (X_a), the reinforcement property (X_r) can be estimated by Eq. (2) as:

$$X_r = X_f V_f + X_a V_a \quad (2)$$

It should be noted that Eq. (2) is valid for a unidirectional fibrous composite neglecting the transverse mechanical effects.

Table 4 below shows the specifications of each beam used in Eq. 2 and the modulus of elasticity and the strength of the reinforcement too. It is noted that a void volume fraction of 5% in the reinforcement was considered that affected the final values of E_r and f_r as well (Huang and Talreja [24]).

Table 4. Vectran-FRP reinforcement properties

Sample	V_f	V_a	E_r (MPa)	f_r (MPa)
Vec 1	0.787	0.160	59847	267
Vec 2	0.731	0.217	55882	249
Vec 3	0.802	0.145	60902	272
Vec 4	0.745	0.202	56913	253
Vec 5	0.764	0.184	58186	259
Mean	0.766	0.182	58346	260

Examining Table 3 and Table 4 it can be verified that the increase in the amount of fibers did not reflect in the increase the modulus of elasticity of the reinforcement , i.e., the larger the unit weight, the higher the mechanical properties of the composite as a priori could be expected. Obviously, the influence of the low-property adhesive is an important issue to be considered in these results.

Preparation of the beams

Eight glued-laminated timber beams were produced with eight layers of *Pinus elliotti*, with the following mean dimensions: 22.5-mm thick, 53-mm width, 3000-mm length. These layers were glued by PVA adhesive resulting in a 180-mm cross section height. The resulting dimensions permit these beams to be classified as structural size members. The layers were previously classified by visual method.

Three of these beams were unreinforced and used as references to estimate the modulus of elasticity and the ultimate load. Other five glued-laminated timber beams were reinforced by FRP composite placed on the bottom of the beams.

Figure 1 illustrates the application of the Vectran-FRP reinforcement on the glued-laminated timber beam tension side. The adhesive spread rate was around 400 g/m². A pressure of 0.5 N/mm² was applied to the assembly for 24 h according the adhesive clamping time. The application of the reinforcement on the face of the beam was performed with the Sikadur 32 epoxy resin spread, followed by the placement of a layer of fiber fabric. After this step on the fiber fabric a new layer of epoxy resin was applied, so that a total impregnation of resin occurred in the fibers. When the reinforcement used had more than one layer of fibers, the next layers were fixed by the application of resin and fabric until reaching the number of layers pre-established and finalized with a layer of resin covering the last layer of fabric.



Figure 1. Set up of a glued-laminated timber beam reinforced by Vectran-FRP.

Experimental procedures

A stepwise experimental procedure was conducted to evaluate the modulus of elasticity i.e., the stiffness, and the ultimate load. First, three unreinforced glued-laminated timber beams, the reference beams, were tested through three-point bending test. The results were considered to estimate the loading limit for the reinforced beams. This bending test was performed up to the load, which is applied continuously, corresponding to 50% of the ultimate load and the corresponding displacement of $L/200$ (L is the beam span), according to the serviceability limit states of the ABNT-NBR7190 [18], to evaluate the modulus of elasticity. The vertical displacements and strains were measured by both LVDT transducer and strain gages. The second step was to run the bending test of the beams until the failure to determine the ultimate load and the strength, noting that the LVDTs were removed of the beams in this test.

The next step of the experimental procedure was to load each of the remaining five beams, a priori without Vectran-FRP reinforcements up to the load, which is applied continuously, corresponding to 50% of the mean ultimate load of the reference beams to determine the displacements and to calculate the stiffnesses.

After this stage, each glued-laminated timber beam was strengthened on its tensile part with fabrics of Vectran that were embedded into an epoxy matrix, forming the composite, i.e., the Vectran-FRP reinforcement. The composite thicknesses used in each beam was previously presented in Table 2.

Repeating the same experimental procedure used for the unreinforced beams, the reinforced beams were subjected to 50% of the mean ultimate load of the reference beams to determine the displacements and the stiffnesses in order to evaluate their performances with reinforcements. After that step, the LVDTs were removed of the beams and the bending test was conducted to the beam's ultimate load.

It should be noted that the displacements correlated to loads greater than 50% to the rupture of the beams were obtained through the strain gages. This procedure employed for monitoring the vertical displacements associated to 50% of the ultimate load was used in order to not damage the measuring equipment. In this case, the displacements were determined from the strain gages measured to the rupture of the beams.

The bending test adopted for the beams was the three-point load system with a concentrated load applied at the mid-span and two supports, a pinned and a roller. In each support was placed a restraint to avoid torsional effects due to the load eccentricity or inhomogeneous deviations in beam lamination. In addition, transverse LVDTs were positioned in the region of the supports.

Each applied load increment (ΔF) and the related vertical displacements at the mid-span of the beam (Δw) were recorded by a data acquisition system.

The LVDT transducers user had the precision 0.01mm and 1s capture rate, being one LVDT disposed at the mid-span e two others were disposed symmetrically at 450 mm distanced from de central LVDT. To fix the LVDT transducer near the beams a metal plate was positioned on the side of the beams. The final beam span used for the test was 2800mm. Figure 2 shows an overview of the bending test arrangement overview.

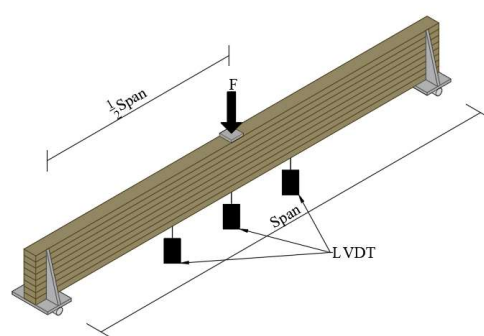


Figure 2. Glued-laminated timber beam bending test arrangement overview.

Also strain gages were positioned at 20 cm from the mid-span to measure axial strains and to evaluate the displacements and the stresses acting on that section too. This position was chosen in order to stress distributions were not unaffected by the loading, following the Saint-Venant's principle, Horgan and Simmonds [25].

The strain gages specifications were the following: Kyowa KFG-5-120-C1-5 [26] with gage factor $2.1 \pm 1\%$ and electrical resistance $119.8 \Omega \pm 0.2\%$. They were arranged in the middle of the upper and lower edges of the beam, regions under tension and in compression, respectively, and on the lateral face. Figure 3 and Figure 4 show details of strain gages arrangements. The strain gages were named by "E" followed by i varying from 1 to 5, indicating the position on the beam cross-section. Similarly, the strains measurements were denoted by " ϵ ", followed by the position ,as shown in Figure 4.

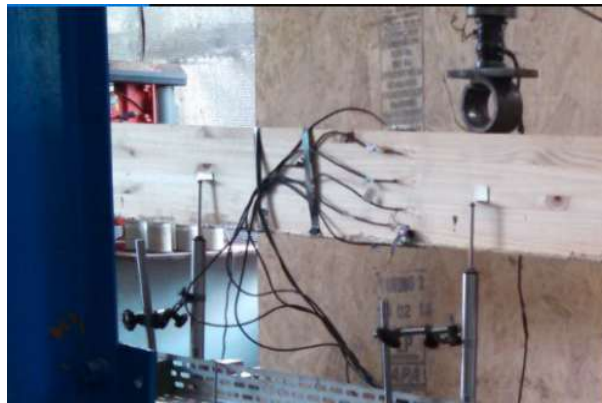


Figure 3. - Central region of the tested beam and the strain gages positioned in its section.

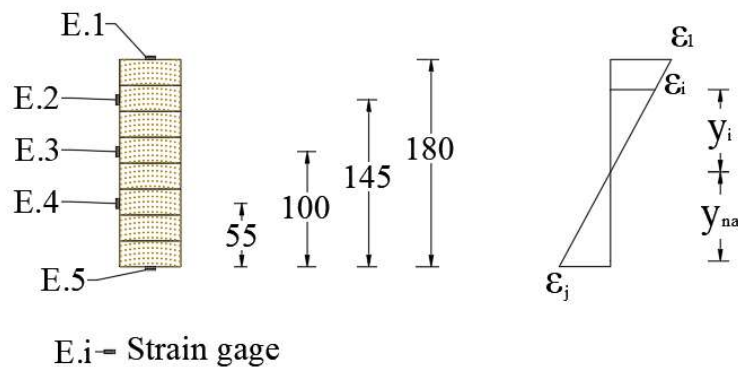


Figure 4. Position of strain gages on the beam cross section (in mm) and the strain distribution.

Analytical procedure

The analytical procedure approaches the evaluation of the stiffness (EI) and the strength of the glued-laminated timber beams, with and without Vectran-FRP reinforcement. Three-

point bending tests were conducted based on the ABNT-NBR7190 [18]. This code considers that type of test the most critical situation for beam design.

The analytical procedure was carried out in two parts. Firstly, it was defined the interval containing 10% ($F_{10\%}$) to 50% ($F_{50\%}$) of the ultimate load (F_u) and the correlated displacements (from $w_{50\%}$ to w_u) and calculated the stiffness. Secondly, it was considered the loads greater than 50% until the ultimate load and the displacements. Figure 5 illustrates these specific points.

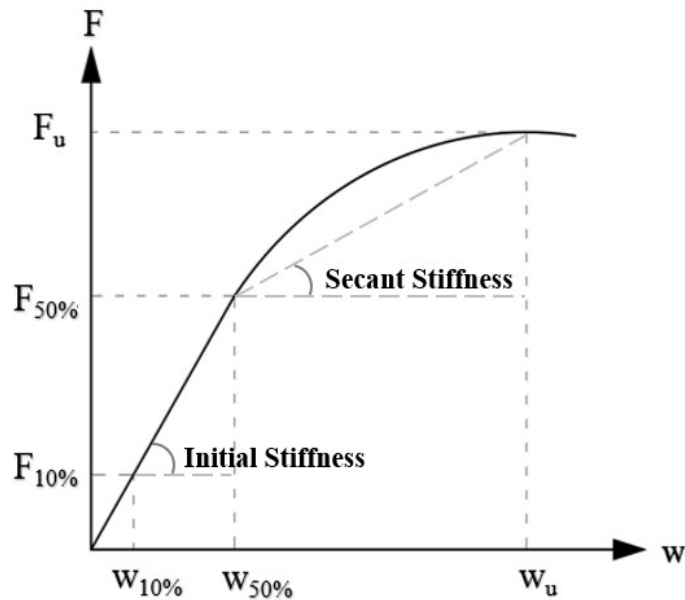


Figure 5. Model used for load- displacement relationship.

It should be highlighted that the displacements corresponding to 50% of the ultimate loads were determined via LVDTs and also via strain gages. For loads greater than 50% to the failure of the beams, the displacements were calculated through the strain gage approach as follows.

Thus, to calculate the initial stiffness (EI) related to the 10%-50% load and displacement interval the formulation used in ABNT-NBR 7190 [18] was considered, according to Eq. 3.

$$EI = \frac{Fl^3}{48w} \quad (3)$$

where: E is the modulus of elasticity, I is the moment of inertia of the cross section, F is the applied load for the range considered, w is the measured vertical displacement for the same range and l is the span.

It is important to note that Eq. 3 expresses the contribution of the bending moment in the beam displacements defined by the stiffness EI . The shear stiffness GA , in which G is the shear modulus and A is cross section area, due to the shear force contribution was disregarded in the displacements, considering the mean ratio between the shear modulus G and the modulus of elasticity E . For this wood sample this ratio was of 16.7, with both moduli determined via bending tests. The effect of the shear strains on the displacements was of 6.7 %. Taking into account the research findings of Skaggs and Bender [27], for glued-laminated beams in similar considerations with this work, the shear effect calculated was around 6.5 %. It is noted that the span-to-height ratio of the beams was 15.5 for both calculations. Eq. 4, according to for example to Bodig and Jayne [28], gives the two contributions due to bending and shear:

$$w = \frac{Fl^3}{48EI} + \frac{cFl}{4GA} \quad (4)$$

In Eq. 4, c represents the shear correction factor and for rectangular section of composite beams (Skaggs and Bender [27]) is equal to 1.17. The other parameters in Eq. 4 as l , A and I are related to the bending specimen dimensions.

It should be pointed out that the modulus of elasticity in Eq. 3 is an apparent value, but in this case of this work the contribution of shear is significantly diminished. Despite this imprecision, ABNT-NBR 7190 [18] indicates the three-point bending test as the most appropriate to analyze the most critical situations of the timber structural design.

Following the below analytical procedure, strain gages were positioned at different positions, as Figure 4 previously shows, permitting to calculate the radius of curvature from the neutral axis through Eq. 5 considering that the element is simply bent according to Euler-Bernoulli's law [29].

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_i}{y_i} \quad (5)$$

where:

ρ is the radius of curvature;

ε_i is the strain in the strain gage position i ;

y_i is the distance from the strain gage i to the neutral axis.

Using strain gage E1 and E5, shown in Figure 4, the neutral axis was determined at the point where strain was null, according Eq. 6.

$$y_{NA} = \frac{\varepsilon_i \cdot y_j}{\varepsilon_i + \varepsilon_j} \quad (6)$$

where:

- ε_i is the strain in the strain gage i position, i.e., $i = 1$;
- ε_j is the strain in the strain gage j position, i.e., $j = 5$;
- y_j is the distance between strain gages at i and j positions;

Geometrically, the displacements of the deformed beam are related to the radius of curvature and the slope of the deformed beam according to Eq. 7.

$$w = \rho \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (7)$$

where:

- w is the displacement of the deformed beam;
- ρ is the radius of curvature;
- α is the slope of the deformed beam.

From Eq. 5 and Eq. 7 the displacements at the mid-span of the beams w can be written as function of the strains, as Eq. 8 shows. It is important to note that the assumption of small slope means that the analysis developed is valid when the displacements are small compared to the overall dimensions of the beam. Thus, it is assumed that $\alpha \approx \tan \alpha$.

$$w = \frac{y_i}{\varepsilon_i} \cdot \left[1 - \cos \left(\frac{L}{2} \cdot \frac{\varepsilon_i}{y_i} \right) \right] \quad (8)$$

where:

- y_i is the distance from the strain gage i to the neutral axis;
- ε_i is the strain in the strain gage i position.
- $L/2$ is the mid-span of the beam.

Thus, using Eq. 3 and Eq. 8 it is possible to calculate the stiffness of the tested beams, either for the unreinforced or the reinforced ones. It was used this approach for the intervals of loads from $F_{50\%}$ to F_u and of displacements from $w_{50\%}$ to w_u as well.

Numerical procedure

The numerical procedure was performed using the software ANSYS workbench Release 19.0 in the “static structure” package [30].

The procedure had the objective of evaluating the normal stress and displacement behavior of the glued laminated reinforced beams subjected to three-point bending and comparing to the experimental results.

It was employed the mechanical properties listed in Tables 2 and 4 for the wood and the composite. Wood was considered a bilinear isotropic hardening with yield strength equals to

70% of the compressive parallel to grain strength f_{c0} , de acordo com a norma brasileira, com modulo de plasticidade igual a porcentagem de perde entre as rigidez E_{I_I} e $E_{I_{VI}}$ obtidas nos ensaios mostrados na Table 5 (shown in item 3).

The loading was applied at a centered area of the beams of 53 mm x 100mm with range time step from 0s to 16s and 2000 N per step.

The constrains of the beam model are for the pinned support zero displacement at x, y and z axes and for the roller support zero displacement for y and z axes.

The iteration between the timber beam and the reinforcement was considered bonded, i.e., zero relative displacements.

The SOLID186 element was used for discretization of the beam and SHELL181 for discretization of the reinforcement. Also CONTA174, TARGE170 and SURF154 for the contact regions were employed.

For element size determination three elements sizes were tested trough the Grid Convergence Index (GCI), method indicated by Ribeiro and Mascia [31]. After grid convergence test was chosen 23mm for elements size discretization.

Figure 6 shows the coordinate system, the discretization (grid), the loadind, and restrains used in the numerical model.

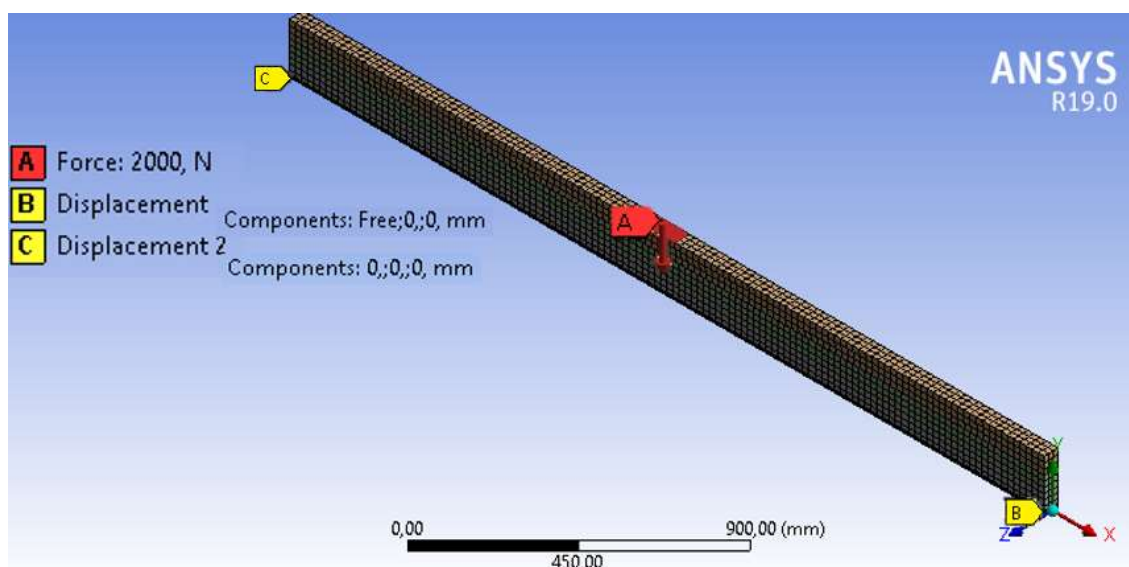


Figure 6. Loading, constrains and coordinate system.

3.RESULTS AND DISCUSSION

This section presents the analysis of the results obtained through experimental data of glued-laminated timber beams, with and without Vectran- FRP reinforcement, as well as the

numerical results. This analysis was divided into sub-items: analysis of the stiffnesses, strains and normal stresses and the ultimate loads. The results focused on two glued-laminated timber beams that represented the mechanical behavior of the tested beams in this work.

3.1 Analysis of the stiffness of the beams

As described before each of the five beams was tested a priori without Vectran-FRP reinforcements up to the load corresponding to 50% of the mean ultimate load. After this step, each laminated beam was reinforcement with fabrics of Vectran fibers and subject to the same loading.

- Interval I- Loads from $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$.

Figure 7 and Figure 8 illustrate, for two different reinforcement ratio and weight (VEC 1 and VEC 5- See Table 2), the typical correlating between loads and vertical displacements for the tests performed, displaying the interval from $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$ and the corresponding displacements from $w_{10\%}$ to $w_{50\%}$. VEC R or VEC UR indicated reinforced beams and UR unreinforced beams respectively and Ansys represents the numerical results.

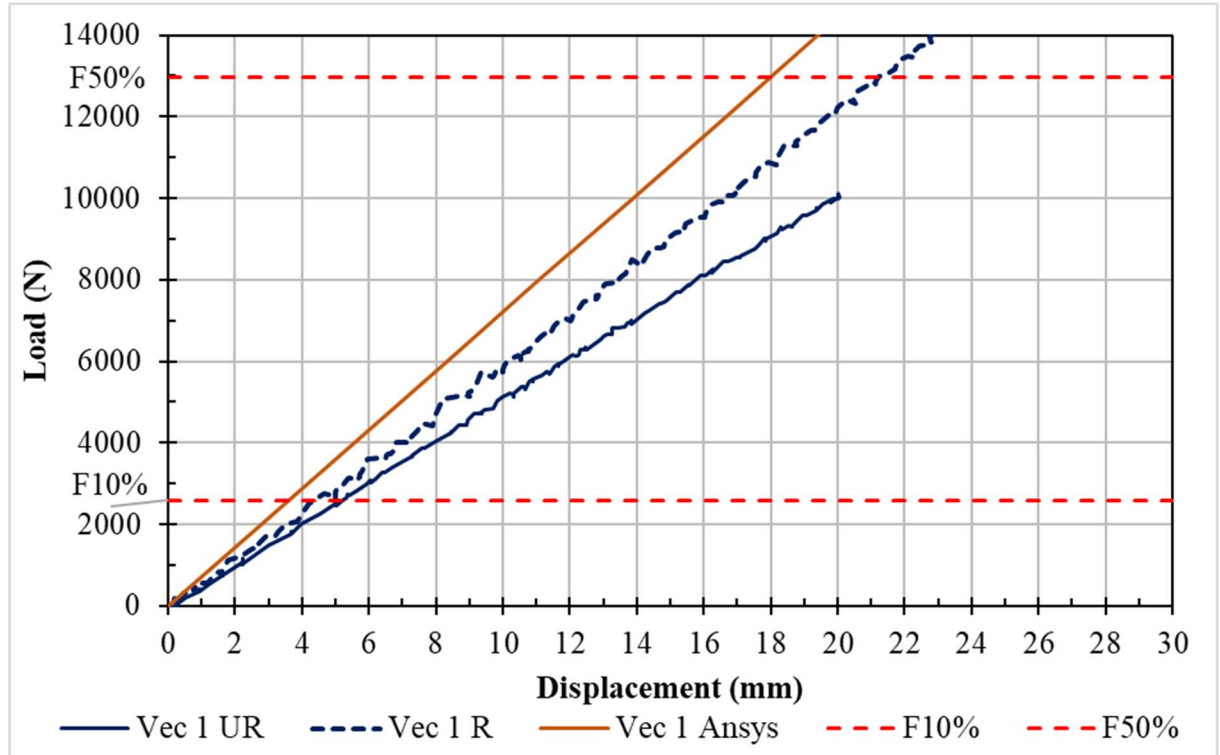


Figure 7. Loads and displacements of the bending test of beam VEC1, with (VEC1 R) and without (VEC1 UR) reinforcement.

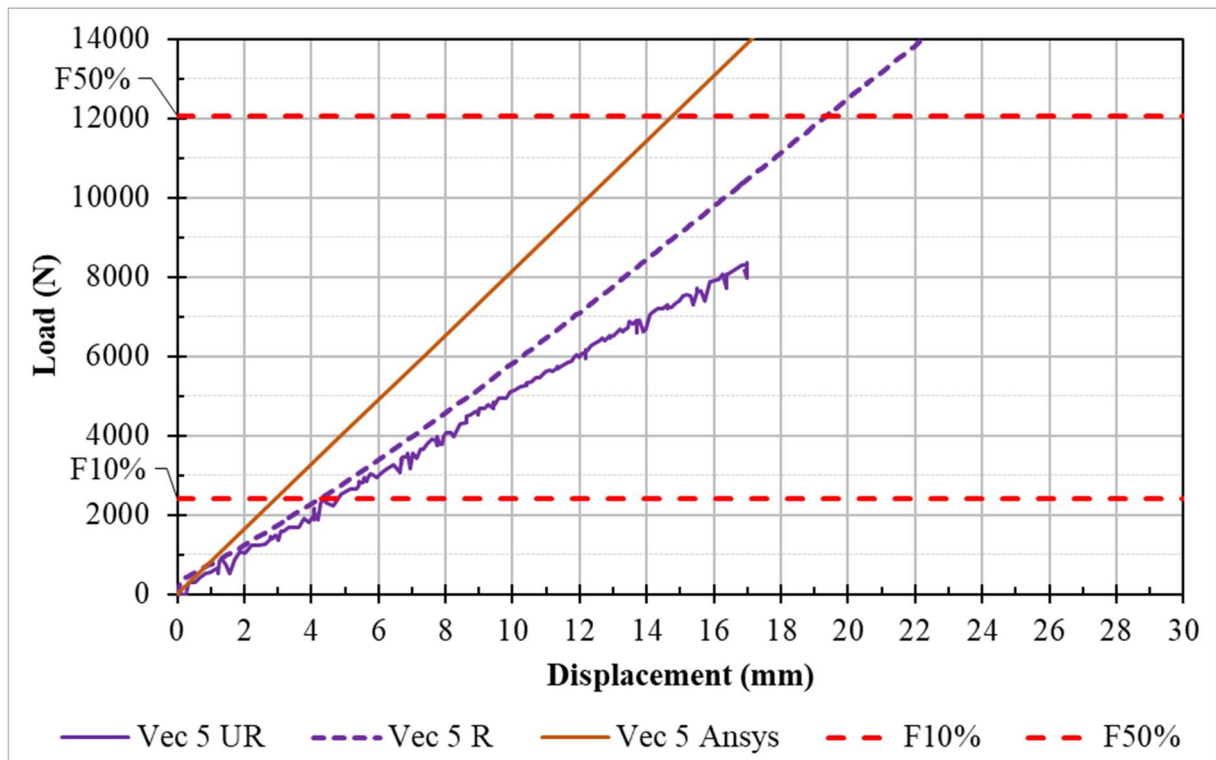


Figure 8. Loads and displacements of the bending test of beam VEC5, with (VEC5 R) and without (VEC5 UR) reinforcement.

-Interval II: Loads greater than 50% to the rupture

Figure 9 shows for the five different reinforcement ratios and weights, the displacements corresponding to loads greater than 50% to the rupture of the beams and were calculated through the strain gages through Eq. 8. It is worth to mention that this procedure employed for monitoring the vertical displacements was used to not damage the LVDTs.

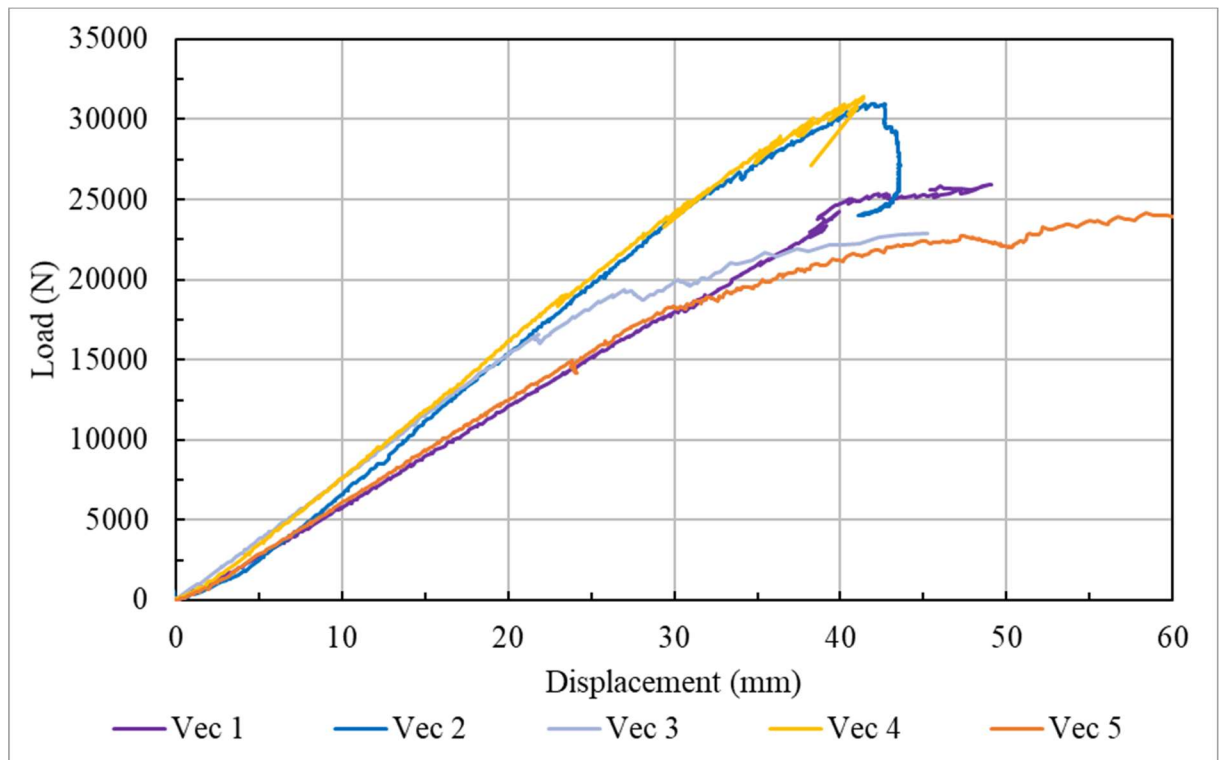


Figure 9. Load and vertical displacement in the mid-span until the failure of the five reinforced beams.

Figure 10 presents the numerical results of the load and vertical displacement in the mid-span until the failure of the five reinforced beams, which were simulated by finite elements with Ansys software.

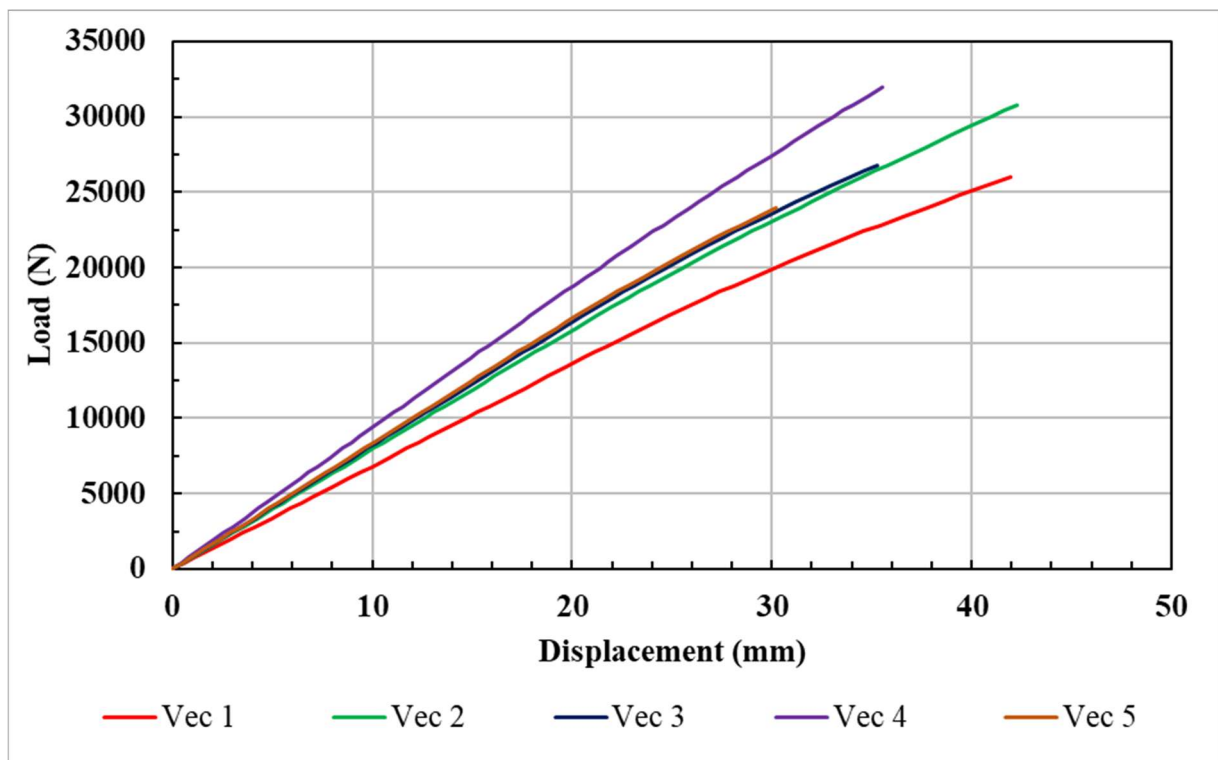


Figure 10. Load and vertical displacement in the mid-span until the failure of the five reinforced beams simulated with Ansys.

Figures 11 and 12 highlight, for the same two beams VEC 1 and VEC 5 but both reinforced with Vectran fibers, the experimental and numerical displacements correlating to loads greater than 50% to the rupture of the beams and were determined through the strain gages through Eq. 8. In these figures the load-displacement path after the 50% - ultimate loads was divided six segments containing 10% of these loads, in order to calculate the beams' stiffness and, this way, to refine the data analyses. For each segment the stiffness' values of each beam were calculated and Table 3 presents the results obtained.

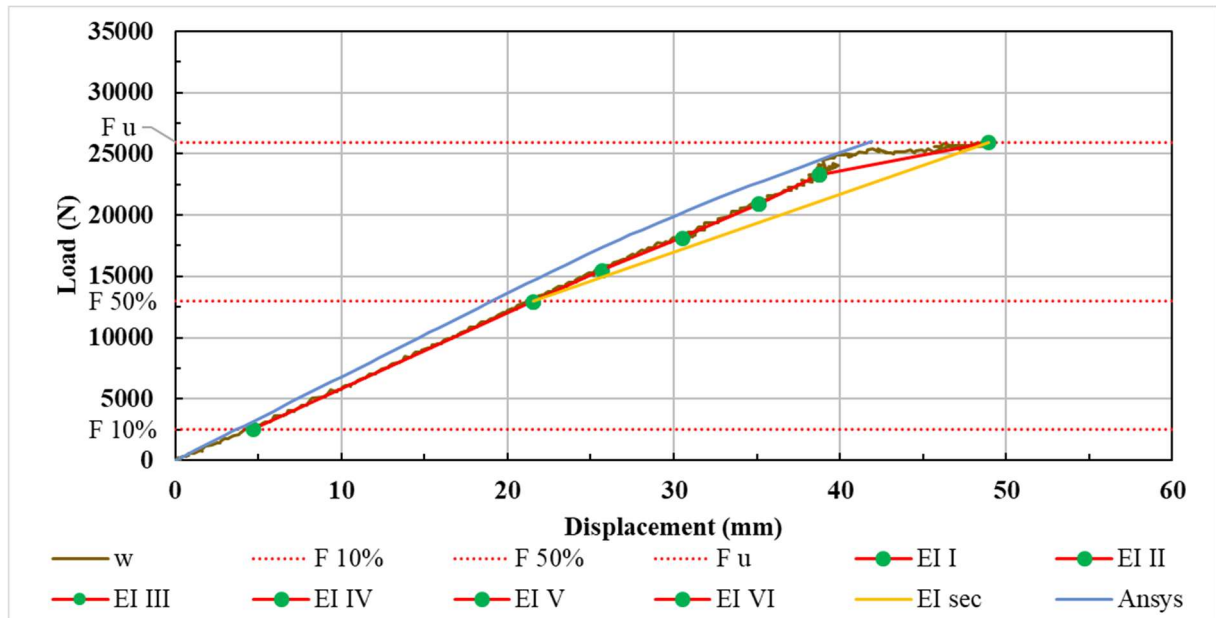


Figure 11. Experimental and numerical results of the load and vertical displacement in the mid-span until the failure of the reinforced beam-VEC1.

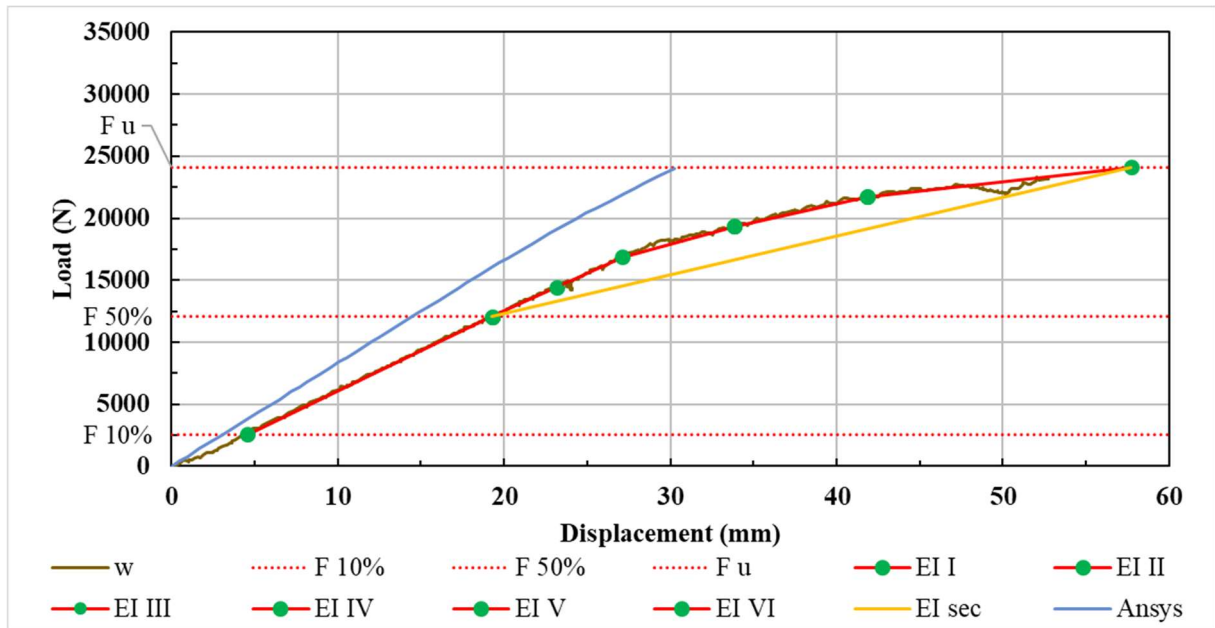


Figure 12. Experimental and numerical results of the Load and vertical displacement in the mid-span until the failure of the reinforced beam-VEC5.

In Table 5 it is used the following notation for stiffness: $EI_{UR,I}$ the stiffness for unreinforced beams, $EI_{R,I}$ the stiffness after the reinforcement application, corresponding to interval containing $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$ and the relative displacement interval (this interval represents the initial or tangent stiffness); $EI_{R,VI}$ the stiffness from $F_{90\%}$ to F_u and the correlating displacements, EI_{sec} the secant stiffness directly determined by a straight line from the 50% - ultimate load to the ultimate load and the related displacements.

Table 5. Experimental results of stiffness for tested beams (EI unit $10^9 Nmm^2$)

Beam	$EI_{UR,I}$	$EI_{R,I}$	$EI_{R,VI}$	$EI_{R,sec}$	$EI_{UR,I} \neq EI_{R,I}$	$EI_{R,I} \neq EI_{R,VI}$	$EI_{R,I} \neq EI_{R,sec}$
Vec 1	226.39	277.35	114.95	212.05	+22.51%	-58.56%	-23.55%
Vec 2	301.28	391.65	237.42	323.15	+30.00%	-39.38%	-17.49%
Vec 3	261.33	333.20	119.06	203.77	+31.89%	-65.46%	-40.88%
Vec 4	322.14	384.88	269.85	329.83	+19.48%	-29.89%	-14.30%
Vec 5	219.08	295.65	90.70	191.79	+34.95%	-69.32%	-35.13%

According to Table 5, an increase varying from 19.48 up to 34.95 % in the stiffness for the interval $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$ was verified when compared unreinforced and reinforced timber beams with Vectran-FRP reinforcement. Similar findings were obtained by Bertoline et.al [14], and Fiorelli et al. [22]. Thus, it is possible to point out that the use of the Vectran-FRP reinforcement brought a better beam's mechanical behavior.

In addition, for the beam's stiffness from $F_{90\%}$ to F_u , interval related only to reinforced glued-laminated timber beams, it was observed a decrease from 29.89 to 69.32 % in relation

to the stiffness of the interval $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$. Finally, the decrease varying from 14.30 to 40.88 was verified by comparing the stiffnesses of the intervals $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$ and secant one.

Moreover, it was noted from the Table 3' results that the increase of thickness of the composite of Vectran fibers (the fiber unit weight), for the range used in this research, produced no specific influence on the beam' stiffnesses when compared the lower thicknesses (Vec 1 and Vec 2) with the higher ones (Vec 3, Vec 4 and Vec 5) as already derived from the Table 3 results' discussion.

Using a similar notation for the numerical results, Table 6 gives the $EI_{n,I}$ the stiffness for numerical simulation corresponding to interval between $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$; $EI_{n,VI}$ the stiffness numerical simulation from $F_{90\%}$ to F_u and $EI_{n,sec}$ the numerical simulation for secant stiffness, comparing with the experimental results of reinforced beams.

Table 6. Numerical results of stiffness for tested beams (EI unit $10^9 Nmm^2$)

Beam	$EI_{n,I}$	$EI_{R,I}$	$EI_{n,VI}$	$EI_{R,VI}$	$EI_{n,sec}$	$EI_{R,sec}$	$\frac{EI_{n,I} \neq EI_{R,I}}$	$\frac{EI_{n,VI} \neq EI_{R,VI}}$	$\frac{EI_{n,sec} \neq EI_{R,sec}}$
Vec 1	311.2 5	277.3 5	271.2 1	114.9 5	300.3 1	212.0 5	12.22%	135.94%	41.62%
Vec 2	363.0 0	391.6 5	279.0 1	237.4 2	328.3 9	323.1 5	-7.32%	17.52%	1.62%
Vec 3	374.9 1	333.2	356.4 2	119.0 6	371.0 5	203.7 7	12.52%	199.36%	82.09%
Vec 4	429.1 6	384.8 8	380.6 4	269.8 5	412.9 1	329.8 3	11.50%	41.06%	25.19%
Vec 5	381.2 9	295.6 5	371.7 0	90.70	379.0 6	191.7 9	28.97%	309.81%	97.64%

It is noted that, in general, the stiffness numerical values are greater than the experimental ones (except to beam Vec 2), being that the differences varied from -7,3 up to 29.95 % in the stiffness for the interval $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$, from 17.52% to 309.81% $F_{90\%}$ to F_u and from 1.62 % to 97.64% for the numerical simulation for secant stiffness. Taking these results into account, it is possible to infer that, for the first interval the differences can be considered in accordance to usual range of results for glued laminated timber beams under elastic-linear phase. The great differences observed for majority of the beam' stiffness results were related to the load intervals containing $F_{90\%}$ to F_u and $EI_{n,sec}$ corresponding to the non-linear behavior of the beams.

3.2 Analysis of normal strain and stress

From the measurements of the strain gages positioned on the cross section located at 20 cm the mid-span of beams, diagrams were plotted showing the strain distributions of the reinforced beams. Figure 13 and Figure 14 illustrate two typical pattern of strain distributions. It was considered to construct these diagrams strains covering the various loading phases of the beams, from the elastic to the failure regions.

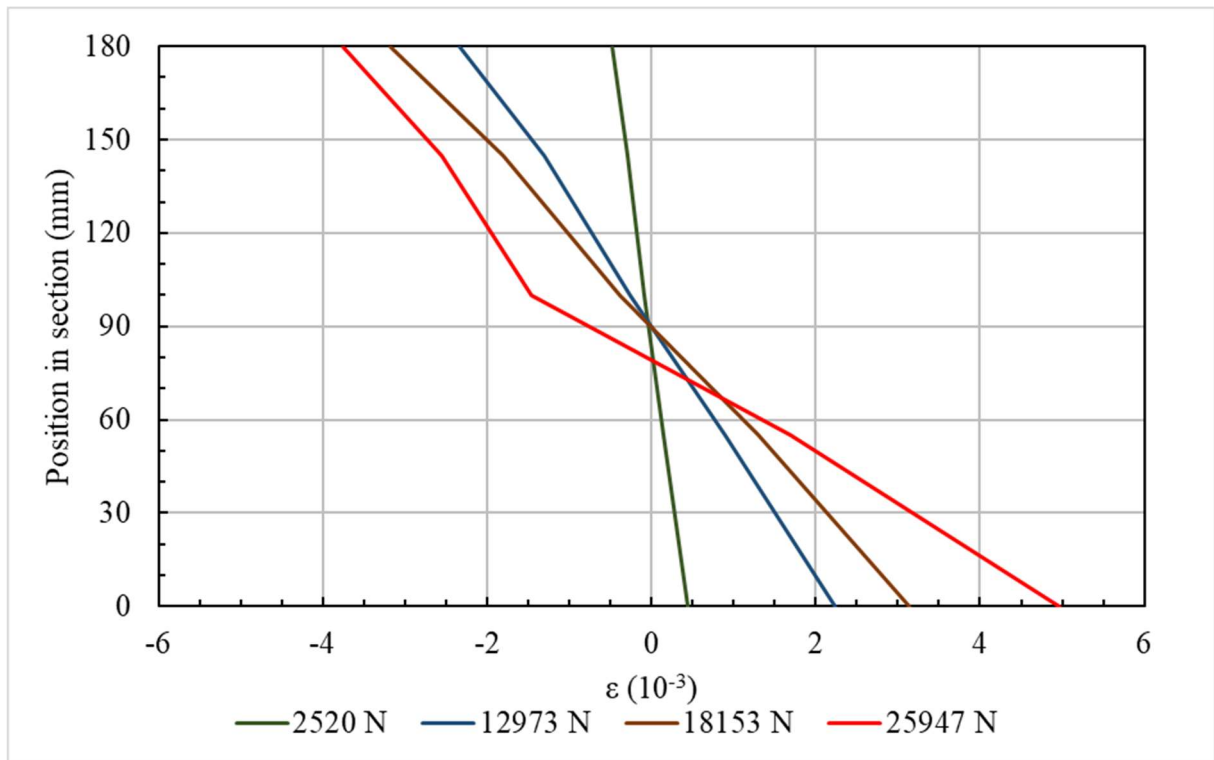


Figure 13. Strain distribution along the beam cross section with different loads -VEC 1.

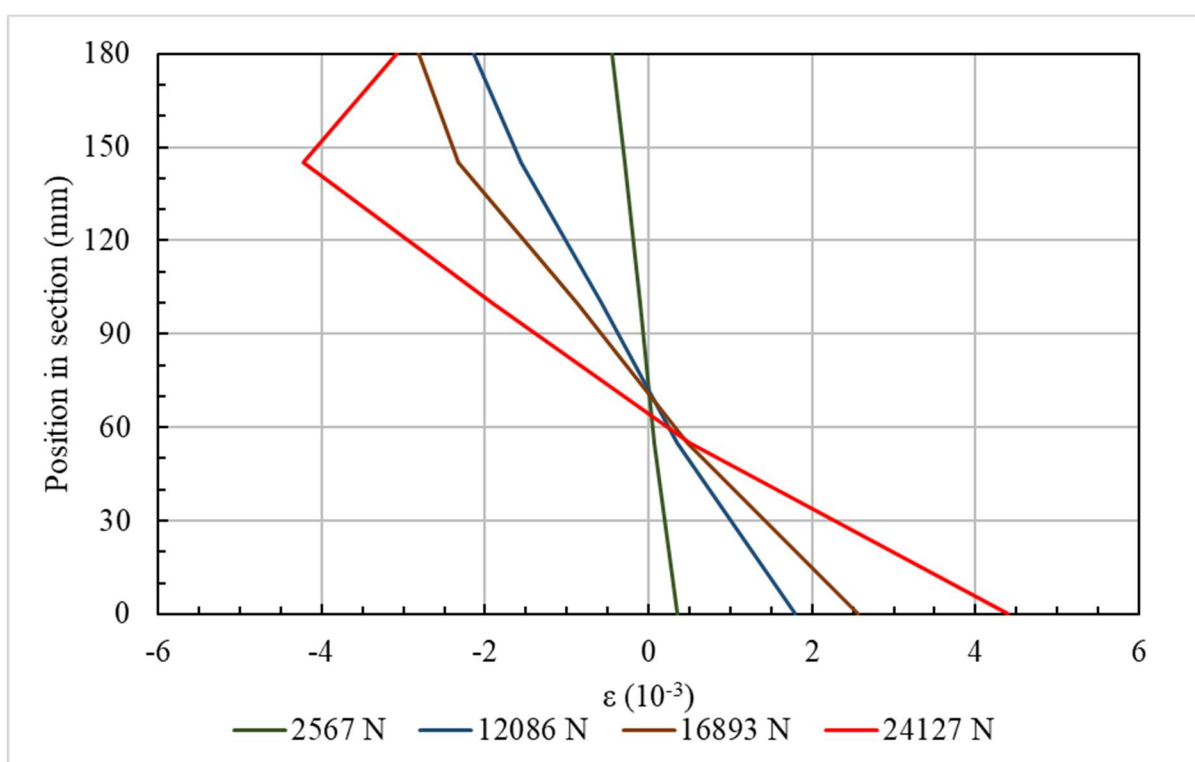


Figure 14. Strain distribution along the beam cross section with different loads -VEC 5.

Based on the strain distribution diagrams, the application of Vectran-FRP reinforcement in beams favors the lowering of the neutral axis and, consequently, an increase of the stresses in the compressed region that may result to a rupture with plastification of the material. Thus, the failure mode is characterized for a ductile form, i.e., initially causing a compressive rupture, followed by a tensile rupture. This failure mode was the pattern in this research, but with two different plateaus of plastification. Figure 13 and Figure 14 show this behavior, as previously reported in the literature by Schober et.al [6] and Romani and Blab [32]. Furthermore, it is noted this pattern depends on the relationship between the tensile and compression strengths and the amount of fiber used (Fiorelli and Dias [7]).

Taking into account the strain distribution diagrams and the elastic moduli determined according diagrams of load-displacement, the normal stress distribution diagrams were constructed along the cross section at the same position that the strains were measured. It was assumed that when the compressive strain distribution interrupted its linear pattern, the corresponding strain was adopted to calculate the ultimate stress. In addition, the ultimate compressive strain (varying from 3.5 to 4.0×10^{-3} according the compressive strengths and the modulus of elasticity of Table 2) was used to each beam for comparing purposes with the strain adopted (Foi assumido um valor constante de tensão a partir do ponto onde o padrão de

deformação no diagrama for alterado indicando assim uma plastificação do material, sendo que as deformações ultimas registradas variaram entre 3.5 a 4.0×10^{-3} para a região comprimida). This assumption is accordance to the results shown in Table 5, in which the load- displacement curve presented a downward tendency and ultimate stiffness $E_{IR,VI}$ decreases significantly, also reflecting that neither the modulus of elasticity of the reinforced beams nor the cross section moments of inertia are, in fact, totally known in order to determine the values of the normal stresses. It is worth noting that García et al. [33] proposed the strain at the elastic limit to evaluate the normal stress in timber beams strengthened by fiber basal composite.

Analogously to strain distribution diagrams, two stress distributions for each beam were performed in order to highlight the stresses in timber region and in Vectran-FRP reinforcement. Figures 15 and 16 illustrate these diagrams.

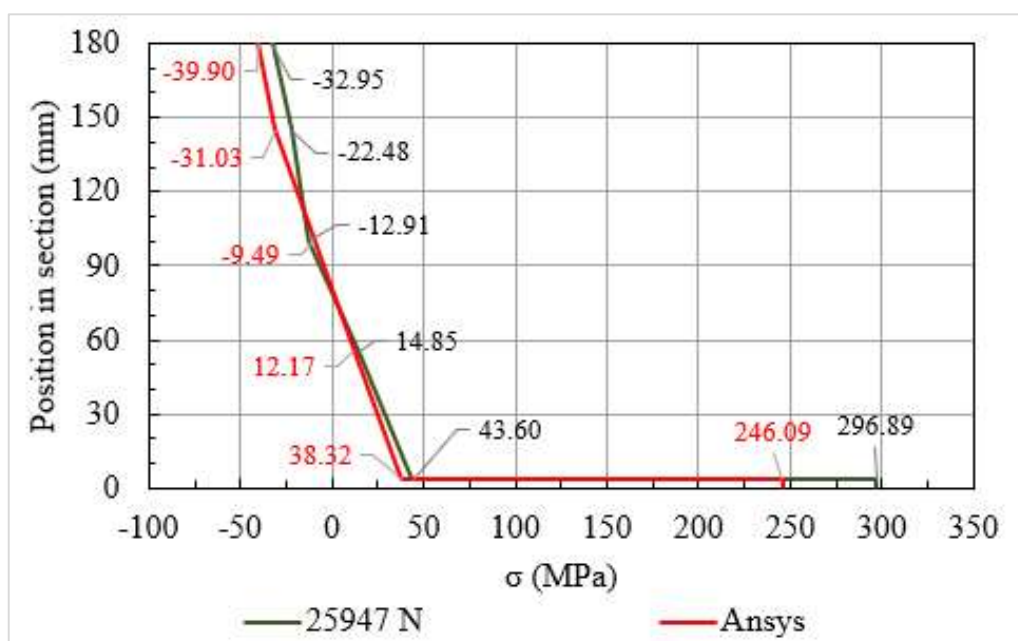


Figure 15. Experimental and numerical results of the glued-laminated timber beam VEC 1 stress distribution for timber region and timber and fiber regions.

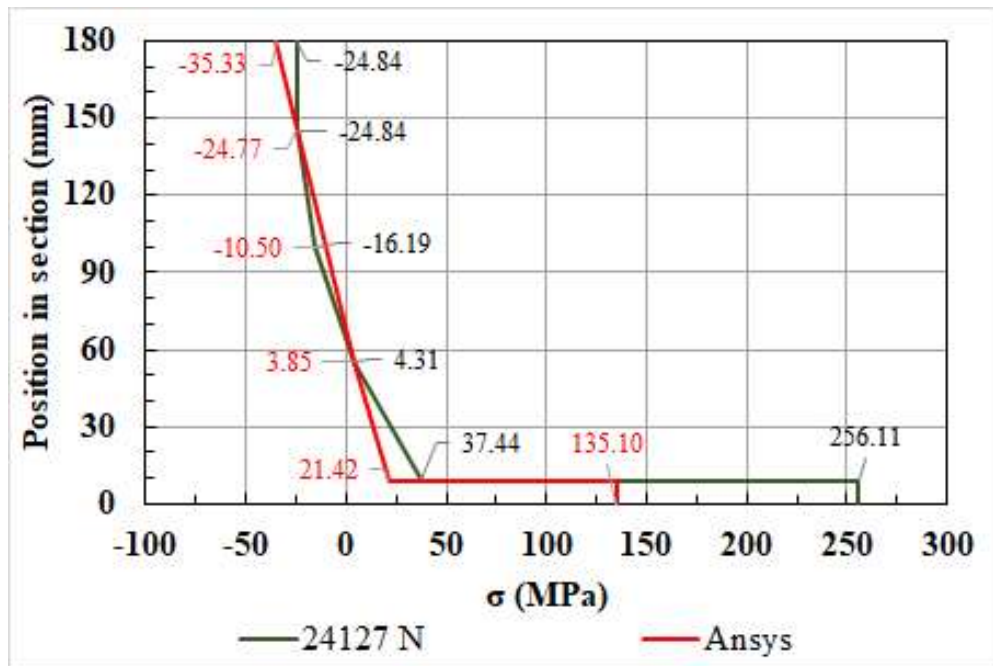


Figure 16. Experimental and numerical results of the glued-laminated timber beam -VEC 5 stress distribution for timber region and timber and fiber regions.

As follows, Table 7 summarizes not only the VEC 1 and VEC 5 results for the compressive ultimate stress (σ_c), the tensile stress ultimate values for timber (σ_T) and Vectran fiber (σ_{VF}) regions but to the five tested beams.

Table 7. Normal stress ultimate experimental results and relations.

Beam	σ_c (MPa)	σ_T (MPa)	σ_{VF} (MPa)	σ_{VF}/σ_T (%)
Vec 1	-32.95	43.60	266.89	6.12
Vec 2	-43.42	49.79	237.88	4.78
Vec 3	-31.41	39.79	238.83	6.00
Vec 4	-36.50	35.68	162.35	4.55
Vec 5	-24.84	37.44	256.11	6.84
Mean	-33.82	41.26	232.41	5.66

Table 7 shows that the compressive normal stress ultimate values obtained via bending test were lower than the compressive parallel to grain strength f_{c0} (see Table 2) due to the assumption that the strains adopted were lower than the ultimate compressive values. On the other hand, the mean tensile stresses were close to the mean value f_{t0} but slightly higher. In Vectran-FRP reinforcement region, the tensile stresses were higher than in the timber region, around 5.66 in the mean value. This result agrees with the average values of the relationship between the strengths of the Vectran-FPR reinforcement (see Table 4) and the timber, unless Vec 4 results.

Although not reaching the full-strength capacity of the fibers in these FRP reinforcements, a key-point of this work is related to the advantages in the use of fibers in issues of preventing brittle failure by tension, especially for wood species with low-strength class such as *Pinus grandis*

grandittii.

Table 8 presents the numerical results of the normal stresses, which is represented by the index “n”, for the five beams and a comparison with the experimental values.

Table 8. Normal stress ultimate numerical results and relations.

Beam	σ_{nC}	σ_{nT}	σ_{nVF}	σ_{nVF}/σ_{nT}	σ_{nC}/σ_C	σ_{nT}/σ_T	σ_{nVF}/σ_{VF}
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(%)
Vec 1	-39.90	38.32	246.09	6.42	1.21	0.88	0.92
Vec 2	-46.56	43.67	241.44	5.53	1.07	0.88	1.01
Vec 3	-41.26	33.75	190.14	5.63	1.31	0.85	0.80
Vec 4	-45.37	41.11	186.47	4.54	1.24	1.15	1.15
Vec 5	-35.33	21.42	135.10	6.31	1.42	0.57	0.53
Mean	-41.68	35.65	199.85	5.69	1.25	0.87	0.88

From Table 8 it was noted that for four beams the numerical and numerical results are compatible with the usual results verified for the analysis of the glued laminated timber beams. Only the Vec 5 values could be considered outside the range obtained.

3.3 Analysis of the ultimate loads

As mentioned before, the tests of the reinforced beams were run until the failure. Table 9 gives the comparison between results of the mean ultimate loads for unreinforced beams (Reference) and the individual ultimate loads for the reinforced ones, three and five beams respectively. Even though samples of different sizes and reinforcement ratios were used, the results show that there is a tendency for a better mechanical performance of reinforced beams.

Table 9. Ultimate loads of the reinforced beam.

Beam	Ultimate Load [N]	Increase of Strength
Reference (mean Value)	22500	
Vec 1	25947	15%
Vec 2	30987	38%

Vec 3	26507	18%
Vec 4	31454	40%
Vec 5	24127	7%

In light of the data presented in Table 9, it is possible to infer that the Vectran -FRP reinforcement provided an increase in the strength when compared to the values of ultimate load reached by the unreinforced beams taken as reference. The application of the Vectran-FRP reinforcement to the glued-laminated timber beams generated a reduction in the strength variation, around 12 %, when comparing the standard deviation values of the unreinforced beams with structural size, 35 %. Despite, dealing with small sample sizes, it can be verified this tendency. For instance, as Corradi et al. [10] evaluated for oak 17.9 % and 20.4 % for Fir wood species. This indicates that the application of Vectran fibers as FPR-reinforcement is valid for the reducing the variation and standardization of the failure values, thus allowing a better use of the materials, fact that was also observed by Martin et al. [34].

3.4 Verified failure modes

The failure mode typically observed in reinforced glued-laminated timber beams had the following pattern: they started with the crushing of the timber in the compressive region of the cross-section (Figure 17), resulting, as discussed previously, in a lowering of the neutral axis. Subsequently, a sudden rupture by tension and shear stresses, phenomenon observed by Fiorelli and Dias [7] and Franke et al. [35] as well. As consequence of this failure mode, unlike the brittle mode that occurs in unreinforced beams, plastification plateaus are observed before the failure, allowing an additional safety reserve.

Another failure mode that should be taken into account involved the loss of lateral stability due to high stresses acting on the compressed region of the beam.



Figure 17. Detail of the compressive rupture of the Vectran fibers reinforced beam.

Table 10 lists the failure modes occurred in each beam tested in this work.

Table 10. Failure modes of the tested beams.

Beam	Failure mode
Vec 1	Compression follows loss of stability
Vec 2	Compression follows shear and tension
Vec 3	Compression follows shear and tension
Vec 4	Compression follows shear and tension
Vec 5	Compression follows loss of stability

CONCLUSIONS

This paper describes the experimental study on bending tests of glue-laminated timber beams made of *Pinus elliottii*, strengthened with fiber reinforced polymers of Vectran fibers and epoxy adhesive. As before mentioned, Vectran is synthetic thermoplastic fiber with high mechanical properties whose potential use as reinforcement material in structural applications is still little researched.

In general, the most important conclusions that were drawn from this work can be highlighted as follows:

The use of the Vectran synthetic polyamide fibers and epoxy adhesive constituting a FRP reinforcement proved to be an efficient method of strengthening glued-laminated timber beams, by increasing stiffness, modifying the brittle failure mode to a more ductile failure, reducing the standard deviation of the stiffness values of the beam as well. Yet, Vectran-FRP

reinforcements on the glued-laminated timber beams can be applied both in-situ and in the beam manufacturing process, demonstrating to be an easy-to-use constructive procedure.

With the Vectran-FRP reinforcement the beam's stiffness increased in the range varying from 19.48 up to 34.95 % in the interval from 10 % to 50 % of the ultimate loads. For the 50 % to the ultimate load interval related only to reinforced timber beams, it was observed a stiffness decrease from 29.89 to 69.32 %. And for the intervals $F_{10\%}$ to $F_{50\%}$ and secant, the decrease varied from 14.30 to 40.88 %. Taking the numerical results into consideration, it is possible to infer that the great differences observed for majority of the beam's stiffness results were related to the load intervals corresponding to the non-linear behavior of the beams.

The application of Vectran-FRP reinforcement induced change in the failure mode, from brittle to ductile failure, generating great deformations before the failure of the beams. This change becomes more visually perceptible when analyzing the lowering of the neutral axis causing the stress redistribution, and, consequently, increasing compressive stresses and causing the ductile failure.

The compressive normal stress ultimate values obtained by bending test were lower than the compressive parallel to grain strength f_{c0} due to the strains adopted were lower than the ultimate compressive values. However, the tensile stresses reached the *Pinus elliottii* compressive strength parallel-to-grain assumed close to the tensile strength parallel-to-grain. In Vectran-FRP reinforcement region, the tensile stresses were higher than in the timber region, around 5.66 in the mean value. In addition, Vectran-FRP reinforcement provided an increase in strength compared to the average value of the unreinforced beam. It was also observed that, for four beams, the differences between numerical and experimental results belong to the usual range verified in the mechanical analysis of glued laminated wood beams.

Furthermore, the bending tests showed that the use of Vectran-FRP reinforcement leads to a reduction in the strength variation, when comparing unreinforced timber beams to reinforced ones. In other words, the use of glued-laminated beam with reinforcement produces less variation of the ultimate loads, enabling to obtain a structural timber piece with greater quality control, mitigating, thus, the defects of wood in wood-based composite materials.

It noted that Vectran-FRP reinforcement application is effective for cases of low-strength wood class, in which the mechanical properties of the wood meet with the properties of *Pinus elliottii* species.

As a key conclusion of this work, it was possible to infer that for glued-laminated timber beams, especially for wood species with low mechanical properties, the application of

reinforcement with composite of synthetic fibers of Vectran has the advantages of improving strength, stiffness and failure mode (more ductile) without substantially altering the beam's assembly.

In this context, this study presented an interesting field research that aims to verify whether little known synthetic fibers that can form composites to be used efficiently as structural reinforcement, such as Vectran fibers, and, therefore, a perspective of application in sustainable building materials, such as wood and wood-based composites.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the financial support given to enable this work to be carried out. Also thank the University of Campinas (UNICAMP) and the School of Civil Engineering, Architecture and Urban Design for the financial support and the laboratory structure to perform the tests.

REFERENCES

- [1] Wegener GB, Zimmer B. Fundamental: Building With Wood is Building for the future. Timber Construction Manual.2004,pp. 47-53. Birkhäuser.
- [2] Gustavsson L, Pingoud K, Sathre R. Carbon Dioxide Balance of Wood Substitution: Comparing Concrete- and Wood-Framed Buildings. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006, 11(3), 667–691.
- [3] Wood Handbook - Wood as an engineering material. Madison, U.S.: Forest Products Laboratory. Department of Agriculture. 2010.
- [4] Gibson RF. Principles of Composite Material Mechanics. (3 ed.). Boca Raton: CRC PRESS. 2011.
- [5] Soriano J, Pellis PB, Mascia NT. Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars. Composite Structures. 2016, v. 150, p. 200-207.
- [6] Schober KU, Harte AM, Kliger R., Jockwer R, Xu Q, Chen J. FRP reinforcement of timber structures. Construction and building materials.2015, (97), 106-118.
- [7] Fiorelli J, Dias, AA. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. Materials and Structures.2011, 44, 1431-1440.
- [8] Raftery GM, Rodd, PD. FRP reinforcement of low-grade timber bonded with wood adhesive. Construction and Building Materials. 2015, pp. 116-125.

- [9] Gómez EP, González MN, Hosokawa A, Cobo K. Experimental study of the flexural behavior of timber beams reinforced with different kinds of FRP and metallic fibers. *Composite Structures*.2019,213, p. 308-3016.
- [10] Corradi, M. et al. Uncertainty analysis of FRP reinforced timber beams. *Composite Part B*, 113, p. 174-184, 2017.
- [11] Biscaia, CC, Cruz D, Franco N. Flexural strengthening of old timber floors with laminated fiber-reinforced polymers. *Journal of Composites for Construction*. 2017,v.21,1, 20p.
- [12] Vahedian A, Shrestha R, Crews K. Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments. *Composites Part B*. 2019,v.164, p.377-389.
- [13] Kuraray America INC. Vectran: Graps the world of tomorrow - liquid crystal technology. Catalog, 24. Fort Mill. 2010.
- [14] Bertoline C, Mascia NT, Basaglia CB, Donadon BF.). Analysis of fiber reinforced laminated timber beams. *Key Engineering Materials*.2016. v.668, 100-109.
- [15] Mascia NT, Bertoline C A A,Basaglia C D, Donadon B F. Numerical analysis of glued-laminated timber beams reinforced by Vectran fibers. *Ambiente Construído (Online)*. 2018.v. 18, p. 359-373.
- [16] Bertoline, C. Study of Glulam reinforced by synthetic fibres (in Portuguese),M.S. Thesis, Dept Civil Eng., University of Campinas, Campinas, Brazil, 2015.
- [17] Donadon B F. Study of glued laminates timber beams reinforced with fibers (In portuguese) M.S. Thesis, Dept Civil Eng., University of Campinas, Campinas, Brazil, 2016.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7190 – Design of Wood Structures (Projeto de estruturas de Madeira). (1997).
- [19] Hoseinpour H, Valluzzi MR, Garbin E, Panizza M. Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials. *Construction and Building Materials*.2018, v.191, p.1242-1251.
- [20] European Committee for Standartization. **EUROCODE 5: Design of Timber Structures**. 2003.
- [21] Sika Brasil. Sikadur® 32 - Adesivo estrutural à base de resina epóxi, fluido. (In prtuguese) Osasco, SP, Brazil. <https://bra.sika.com/>.2015.
- [22] Fiorelli J, Rempe N, Molina J, Dias Natural Fiber Reinforced Polymer for structural Application. *Agricultural Biomass Based Potential Materials*, AA. 35-49.2015.

- [23] Campbell, FC. Structural Composite Materials. Ohio, United States of America, Publisher: ASM International. 630 p. ISBN: 978-1-61503-037-8. 2010.
- for timber beams – State of the art. Construction and Building Materials, 97, 2-13.
- [24] Huang HS, Talreja R. Effects of void geometry on elastic properties of unidirectional fiber reinforced composites, Composite science and technology, 2005, v. 65:1964-1981
- [25] Horgan C, Simmonds J.). Saint-Venant end effects in composite structures. Composites Engineering. 1994, 4(3), 279-286.
- [26] Kyowa Electronic Instruments CO., LTD. (s.d.). General-purpose Foil Strain Gages KFG. Catalog. Chofu, Tokio, Japan.
- [27] Skaggs TD, Benber DA. Shear deflection of composite beams. Wood and Fiber Science. 1995, v. 27:3.327-338
- [28] Bodig J, Jayne B. Mechanics of Wood and Wood Composites. Malabar, Florida, US: Krieger Publishing Company. 1993.
- [29] Inaudi, D, Vurpillot, S, Casanova, N, Kronenberg, P. (1998). Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors. Smart Materials and Structures, 7(2), 199.
- [30] ANSYS®. Mechanical (Workbench), Release 19.0, ANSYS, Inc.
- [31] Ribeiro A, Mascia NT. Numerical and experimental study of shear stress behavior of NBR and ASTM standard test specimens for FRP-wood bonds. COMPOSITE STRUCTURES, v. 224, p. 111066, 2019.
- [32] Romani M, Blab HJ. Design model for FRP reinforced glulam beams. International council for research and innovation in building and construction. Venice, Italy. 2001.
- [33] García P de la R, Escamilla AC, García M N G. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. Composites Part B: Engineering. 2013, v. 55 :528-536.
- [34] Martin, ZA, Stith, JK, Tingley, D A. Commercialization of FRP reinforced glulam beam technology. Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering (WCTE). 2000.
- [35] Franke S, Franke B, Harte A. Failure modes and reinforcement techniques Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art. Construction and Building Materials. 2015, v. 97, 2-13.