



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VINÍCIUS DE SOUSA LIMA

**ANÁLISE DO REFORÇO COM FIBRAS DE CARBONO NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE LVL DE MADEIRA DE
PARICÁ COLADAS COM RESINA DE POLIURETANO À BASE DE
ÓLEO DE MAMONA**

Salvador

2026

VINÍCIUS DE SOUSA LIMA

**ANÁLISE DO REFORÇO COM FIBRAS DE CARBONO NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE VIGAS DE LVL DE MADEIRA DE
PARICÁ COLADAS COM RESINA DE POLIURETANO À BASE DE
ÓLEO DE MAMONA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César

Coorientadora: Profa. Dra. Rita Dione Araújo Cunha

Agência Financiadora: Coordenação de
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
(CAPES)

Salvador

2026

L732 Lima, Vinícius de Sousa.

Análise do reforço com fibras de carbono no comportamento mecânico de vigas de LVL de madeira de paricá coladas com resina de poliuretano à base de óleo de mamona/ Vinícius de Sousa Lima. – Salvador, 2026.

113f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César.

Coorientadora: Profa. Dra. Rita Dione Araújo Cunha.

Dissertação (mestrado) – Programa de Pós - graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2026.

1. Madeira – Paricá. 2. Madeira laminada colada. 3. Vigas. 4. Fibras de carbono. I. César, Sandro Fábio. II. Cunha, Rita Dione Araújo. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 624.184

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete
Sinay Neves, Escola Politécnica – UFBA.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Vinícius de Sousa Lima

APRESENTADA AO MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL, DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DA BAHIA, EM 04 DE FEVEREIRO DE 2026.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

SANDRO FABIO CESAR

Data: 04/02/2026 07:49:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sandro Fábio César

Orientador

PPEC-UFBA



Documento assinado digitalmente

RITA DIONE ARAUJO CUNHA

Data: 04/02/2026 07:57:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Rita Dione Araújo Cunha

Coorientadora

PPEC-UFBA



Documento assinado digitalmente

JULIO CESAR MOLINA

Data: 04/02/2026 11:48:20-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Júlio César Molina

PPGSET-EESC/USP



Documento assinado digitalmente

ANDRE LUIS CHRISTOFORO

Data: 04/02/2026 13:10:10-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Luís Christoforo

PPGECiv- UFSCAR

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo apoio e incentivo, especialmente à minha companheira, Maria, pela colaboração e compreensão ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sandro Fábio César, e à minha coorientadora, Prof.^a Dra. Rita Dione Araújo Cunha, pela orientação, dedicação, disponibilidade e amizade ao longo dos anos de mestrado.

Ao Prof. Dr. Julio Cesar Molina e ao Prof. Dr. André Luis Christoforo pela disponibilidade para participação da banca e pela colaboração durante as etapas avaliativas desta pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Madeiras (LABMAD/UFBA), pelo apoio, amizade e parceria, fundamentais para a realização deste trabalho. Em especial, ao Filipe, pela amizade e importantes conselhos.

Às amigas construídas durante os anos de mestrado, por compartilharem momentos de aprendizado e convivência.

Ao Denis, da carpintaria do LABMAD, pela significativa contribuição na confecção dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Aos professores e alunos do Laboratório de Ensaios e Durabilidade dos Materiais (LEDMA), que colaboraram para a realização dos ensaios desta pesquisa, em especial ao Prof. Dr. Daniel Vêras Ribeiro, coordenador do laboratório, e aos colegas Danilo e Ayrton.

Ao Armando, técnico de Laboratório de Geotecnia da UFBA, pelo apoio na realização de ensaios desta pesquisa.

Ao Prof. João Miguel Santos Dias por toda a orientação e formação dada durante a minha graduação, que me preparou para a realização do mestrado.

À empresa C.M. Venturoli, pelo fornecimento material para a pesquisa.

Ao programa de Pós-graduação de Engenharia Civil da UFBA (PPEC) e à secretária do programa, Daniele Mota, por todo o apoio prestado no mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

O paricá, espécie nativa amazônica e com emprego pioneiro no cultivo de florestas plantadas, possui rápido crescimento, fácil trabalhabilidade e baixa densidade. No entanto, devido a sua baixa resistência mecânica, considerada como de classe D20, o emprego dessa espécie de madeira em elementos estruturais da construção civil torna-se limitado. Uma alternativa para superar essa limitação é sua industrialização na forma de madeira laminada colada (*laminated veneer lumber* - LVL) com incorporação de fibras de carbono. Essas fibras se destacam entre as sintéticas por apresentarem alto módulo de elasticidade e resistência à tração, baixa densidade, elevada estabilidade térmica, além de boa condutividade térmica e elétrica. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar a influência do reforço com tecido de fibras de carbono unidirecionais no comportamento mecânico de vigas de LVL fabricadas com lâminas de madeira de paricá coladas com poliuretano à base de óleo de mamona, visando ao aprimoramento das propriedades mecânicas do material e à ampliação do seu potencial de aplicação estrutural. Para isso, foram produzidos, em laboratório, quatro tipos de séries: vigas maciças de madeira serrada; vigas de LVL sem reforço; vigas de LVL reforçadas com uma camada de tecido de fibras de carbono; e vigas de LVL reforçadas com duas camadas de tecido de fibras de carbono. Nas séries reforçadas, o reforço foi posicionado entre a última e a penúltima lâmina do bordo tracionado das vigas. O comportamento mecânico das vigas foi avaliado por meio de ensaios de flexão em quatro pontos, com determinação do momento fletor máximo, rigidez global, ductilidade e modos de ruptura. Os valores de momento fletor máximo e de rigidez global das vigas foram estimados a partir de análises analítica (método da seção transformada) e numérica (método dos elementos finitos). Adicionalmente, para avaliar a influência do reforço na qualidade da aderência promovida pelo adesivo, foram realizados ensaios de cisalhamento na linha de cola. Os resultados mostraram que o reforço com duas camadas de tecido de fibra de carbono promoveu aumentos significativos na capacidade de carga (27,16%) e na rigidez (29,98%) das vigas de LVL em relação aos elementos não reforçados. Em contrapartida, a aplicação de apenas uma camada resultou em ganhos limitados no momento fletor máximo, sem diferença estatística, e não foi suficiente para aumentar a rigidez global das vigas. Além disso, em comparação aos elementos não reforçados, o uso do reforço modificou os modos de ruptura de frágeis para dúcteis, elevando os índices de ductilidade em até 137,37% (para o LVL reforçado com duas camadas), o que indica maior segurança estrutural dos elementos. Ambos os métodos teóricos mostraram-se eficazes na estimativa das propriedades mecânicas das séries, sendo o método numérico aquele que apresentou maior concordância com os resultados experimentais quando comparado ao método analítico. Além disso, os modos de ruptura observados no modelo numérico representaram adequadamente aqueles observados experimentalmente. A presença do reforço não influenciou na qualidade da aderência promovida pelo poliuretano.

Palavras-chave: Paricá. Madeira laminada colada. Vigas reforçadas. CFRP. Modos de ruptura.

ABSTRACT

Paricá, a native Amazonian species and one of the pioneers in planted forest cultivation, is characterized by rapid growth, good workability, and low density. However, due to its low mechanical strength class (D20), the use of this wood species in structural elements of civil construction is limited. An alternative to overcome this limitation is its industrial processing into laminated veneer lumber (LVL) incorporating carbon fiber reinforcement. Among synthetic fibers, carbon fibers stand out due to their high elastic modulus and tensile strength, low density, high thermal stability, and good thermal and electrical conductivity. In this context, the present study aimed to evaluate the influence of unidirectional carbon fiber fabric reinforcement on the mechanical behavior of LVL beams manufactured from paricá veneers bonded with castor oil-based polyurethane, with the goal of improving the material's mechanical properties and expanding its potential for structural applications. To this end, four series of elements were produced under laboratory conditions: solid sawn timber beams; unreinforced LVL beams; LVL beams reinforced with one layer of carbon fiber fabric; and LVL beams reinforced with two layers of carbon fiber fabric. In the reinforced series, the reinforcement was placed between the outermost and penultimate veneers on the tension side of the beams. The mechanical behavior of the beams was assessed through four-point bending tests, with the determination of maximum bending moment, global stiffness, ductility, and failure modes. Maximum bending moment and global stiffness were estimated using both analytical (transformed section method) and numerical (finite element method) approaches. Additionally, to assess the influence of reinforcement on the bond quality provided by the adhesive, shear tests at the glue line were conducted. The results showed that reinforcement with two layers of carbon fiber fabric led to significant increases in load-carrying capacity (27.16%) and stiffness (29.98%) of the LVL beams compared to unreinforced elements. In contrast, the application of only one layer resulted in limited gains in maximum bending moment, with no statistical significance, and was insufficient to increase the global stiffness of the beams. Moreover, compared to unreinforced elements, the use of reinforcement altered the failure modes from brittle to ductile, increasing ductility indices by up to 137.37% (for LVL reinforced with two layers), which may indicate enhanced structural safety. Both theoretical approaches proved effective in estimating the mechanical properties of the series, with the numerical method showing greater agreement with the experimental results when compared to the analytical method. In addition, the failure modes observed in the numerical model adequately represented those observed experimentally. The presence of reinforcement did not affect the bond quality provided by the polyurethane adhesive.

Keywords: Paricá. Laminated veneer lumber. Reinforced beams. CFRP. Failure modes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Plantios de paricá e árvore colhida aos 5 anos de idade, com 27 cm de diâmetro.	19
Figura 2. Processo de manufatura de LVL.	22
Figura 3. Layouts de reforço de vigas de madeira.	28
Figura 4. Configuração de ensaio para determinação da resistência e módulo de elasticidade à flexão de vigas.	33
Figura 5. Método da energia equivalente elasto-plástica.	36
Figura 6. Curvas força-deslocamento de vigas de madeira reforçadas com três camadas de FRP.	37
Figura 7. Comportamento mecânico dos materiais para análise teórica: (a) madeira e (b) FRP.	38
Figura 8. Seção transversal das toras após aparelhamento.	41
Figura 9. Tecido de fibras de carbono unidirecional.	42
Figura 10. Adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona.	43
Figura 11. Processo de desdobro das toras: (a) desbaste da tora para formato retangular, (b) corte longitudinal e (c) confecção das lâminas.	44
Figura 12. Processo de secagem ao ar das lâminas.	45
Figura 13. Processo de redução da espessura das lâminas.	45
Figura 14. Equipamentos utilizados para a caracterização física da madeira: (a) balança digital, (b) paquímetro digital e (c) estufa de secagem.	47
Figura 15. Configuração do ensaio de compressão paralela às fibras.	49
Figura 16. Configuração do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.	49
Figura 17. Dimensões do corpo de prova do ensaio de tração do compósito.	50
Figura 18. Ensaio de tração do CFRP.	51

Figura 19. Configurações das vigas produzidas.....	52
Figura 20. Limpeza da superfície das lâminas.	52
Figura 21. Preparação do adesivo.	53
Figura 22. Aplicação do adesivo sobre as lâminas.	53
Figura 23. Dispersão do adesivo.....	54
Figura 24. Sobreposição das lâminas.	54
Figura 25. Processo de prensagem do LVL: (a) configuração da prensagem e (b) aplicação do torque.....	55
Figura 26. Aplicação do adesivo sobre a superfície da lâmina adjacente ao reforço.	56
Figura 27. Aplicação da camada de reforço.....	56
Figura 28. Eliminação de bolhas de ar.....	57
Figura 29. Aplicação da última lâmina de madeira.....	57
Figura 30. Configuração do ensaio de flexão: (a) realização do ensaio e (b) dimensões do ensaio.....	59
Figura 31. Seção transformada da viga composta.....	61
Figura 32. Modelo tridimensional do LVL reforçado com uma camada de CFRP.....	63
Figura 33. Modelo constitutivo adotado para a madeira.....	64
Figura 34. Malha de elementos finitos adotada para o modelo.....	66
Figura 35. Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.....	68
Figura 36. Procedimento para obtenção do percentual de ruptura nos CPs cisalhados.	68
Figura 37. Curvas tensão-deformação dos CPs de CFRP.....	73

Figura 38. Ruptura dos compósitos CFRP: (a) próximo ao meio do comprimento longitudinal e (b) à extremidade.	74
Figura 39. Curvas força-deslocamento da série MS.	79
Figura 40. Modos de ruptura observados na série MS: (a) tração simples e (b) tração desviada.....	80
Figura 41. Curvas força-deslocamento da série LVL-SR.	81
Figura 42. Modos de ruptura observados na série LVL-SR: (a) tração simples e (b) tração desviada.....	82
Figura 43. Curvas força-deslocamento da série LVL-1C.....	82
Figura 44. Modos de ruptura observados na série LVL-1C: (a) tração da lâmina inferior e esmagamento por compressão normal, (b) esmagamento por compressão paralela na face comprimida, (c) ruptura por tração das fibras de carbono e das lâminas do LVL e (d) cisalhamento horizontal.....	83
Figura 45. Curvas força-deslocamento da série LVL-2C.....	84
Figura 46. Modos de ruptura observados na série LVL-2C: (a) tração da lâmina inferior e esmagamento por compressão normal, (b) esmagamento por compressão paralela na face comprimida e (c) falha da interface madeira-CFRP.....	85
Figura 47. Curvas médias das séries analisadas.	87
Figura 48. Comparação das curvas experimentais, teóricas e numéricas de força <i>versus</i> deslocamento.	90
Figura 49. Distribuição da tensão normal S11 (em MPa) na força máxima: (a) LVL-SR, (b) LVL-1C, (c) CFRP do LVL-1C, (d) LVL-2C e (e) CFRP do LVL-2C.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios de propriedades físico-mecânicas da madeira de paricá encontrados na literatura.....	20
Tabela 2. Valores médios encontrados por trabalhos da literatura para as propriedades mecânicas de LVL de paricá.	24
Tabela 3. Incremento na capacidade de carga e rigidez de elementos reforçados com tecido de fibras de carbono relatado em estudos da literatura.....	31
Tabela 4. Características do tecido de fibras de carbono fornecidas pela empresa.	42
Tabela 5. Propriedades do adesivo de poliuretano.	43
Tabela 6. Coeficientes de plasticidade para o critério de Hill.	64
Tabela 7. Propriedades elásticas adotadas no modelo numérico.	66
Tabela 8. Resultados da caracterização físico-mecânica da madeira serrada.....	70
Tabela 9. Propriedades do CFRP.	72
Tabela 10. Resumo das propriedades obtidas para as vigas.....	75
Tabela 11. Índices de ductilidade registrados para as vigas no ensaio de flexão.	86
Tabela 12. Comparação entre os resultados experimentais e analíticos do momento fletor máximo e da rigidez global das vigas reforçadas.....	88
Tabela 13. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos das propriedades mecânicas das vigas de LVL.....	89
Tabela 14. Resumo das propriedades obtidas no ensaio de cisalhamento na linha de cola.....	93

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROBLEMA DA PESQUISA	15
1.2	HIPÓTESE	15
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	15
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	15
1.4	JUSTIFICATIVA	16
1.5	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	17
1.6	ORIGINALIDADE DA PESQUISA	18
1.7	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	MADEIRA DE PARICÁ	19
2.2	MADEIRA LAMINADA COLADA (LVL)	21
2.2.1	<i>LVL de paricá</i>	22
2.3	ADESIVO POLIURETANO À BASE DE ÓLEO DE MAMONA	25
2.4	REFORÇO ESTRUTURAL	26
2.4.1	<i>Vigas de madeira reforçadas com fibras de carbono</i>	28
2.4.1.1	Efeito do reforço na capacidade de carga e rigidez à flexão	30
2.4.1.2	Efeito do reforço na ductilidade	33
2.4.1.3	Efeito do reforço no modo de ruptura	36
2.4.1.4	Estimativa por método teórico	37
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	MATERIAIS	41
3.1.1	<i>Madeira</i>	41
3.1.2	<i>Tecido de fibras de carbono</i>	41
3.1.3	<i>Adesivo</i>	42
3.2	MÉTODOS	43
3.2.1	<i>Beneficiamento das toras de madeira</i>	43
3.2.2	<i>Caracterização físico-mecânica da madeira serrada</i>	45
3.2.2.1	Ensaio das propriedades físicas	46
3.2.2.2	Ensaio de compressão paralela às fibras	48
3.2.2.3	Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras	49

3.2.3	<i>Caracterização mecânica do CFRP</i>	50
3.2.4	<i>Produção das vigas</i>	51
3.2.1	<i>Ensaio à flexão</i>	58
3.2.1.1	Análise estatística	60
3.2.1.2	Análise analítica	61
3.2.1.3	Análise numérica	62
3.2.2	<i>Ensaio de cisalhamento na linha de cola</i>	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA MADEIRA SERRADA	70
4.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CFRP	72
4.3	ENSAIO À FLEXÃO	74
4.3.1	<i>Análise teórica</i>	88
4.4	CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA	93
5	CONCLUSÕES	95
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DO MÉTODO ANALÍTICO	108
	APÊNDICE B – PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA SERRADA..	110
	APÊNDICE C – PROPRIEDADES OBTIDAS NO ENSAIO À FLEXÃO	112
	APÊNDICE D – PROPRIEDADES OBTIDAS NO ENSAIO DE CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA	113

1 INTRODUÇÃO

A madeira como material de construção apresenta vantagens sobre outros materiais, como o aço e o concreto, uma vez que é renovável, apresenta menor impacto ambiental quando comparado com outros materiais de construção por ter uma cadeia produtiva que gera baixas emissões de gases do efeito estufa e atua como um reservatório de longo prazo para o carbono atmosférico (Marais; Brischke; Militz, 2022; Ramage *et al.*, 2017). Além disso, a madeira apresenta elevada relação resistência mecânica/peso próprio, fácil trabalhabilidade, bom desempenho termoacústico e compatibilidade com a construção enxuta (Percin; Altunok, 2017; Sotsek; Santos, 2018).

De acordo com Amorim *et al.* (2021), a madeira proveniente de florestas plantadas tem ganhado destaque na construção civil devido ao seu rápido ciclo de crescimento, além de contribuir para a redução da pressão sobre as florestas nativas. Em 2024, o Brasil possuía um total de 10,52 milhões de hectares de florestas plantadas, das quais 77,00% correspondiam a plantios de *Eucalyptus* spp., 18,06% a *Pinus* spp. e 4,94% a outras espécies, como teca (*Tectona grandis*), acácia (*Acacia* spp.) e paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) (Ibá, 2025).

As espécies de madeira de rápido crescimento, embora benéficas para a produção rápida de biomassa, apresentam desafios, como troncos de pequenos diâmetros, defeitos naturais de crescimento (como nós e bolsas de resina) e baixa resistência mecânica, o que limita seu uso como elementos serrados na construção civil (Yang *et al.*, 2021; Silva, 2022). Esses problemas decorrem das características biológicas inerentes a essas espécies, como os comprimentos de fibras mais curtos e espessuras de parede de fibra variáveis, para as madeiras de folhosas, e de suas condições de crescimento (Dewi; Tihurua; Wulansari, 2022).

A influência dos problemas supracitados no desempenho mecânico de elementos estruturais em madeira pode ser minimizada por meio do uso dos produtos engenheirados de madeira (PEM), os quais são oriundos do processo de transformação da madeira maciça em elementos dos tipos lâminas, lamelas, fibras ou partículas, que são unidos por meio de adesivos (Lima *et al.*, 2022a). Entre esses produtos, destaca-se a madeira laminada colada (*laminated veneer lumber* - LVL), que é o resultado da colagem de lâminas de madeira que são orientadas majoritariamente

em uma mesma direção. Esse produto apresenta, como resultado da colagem de múltiplas lâminas, dispersão e redução dos defeitos da madeira (como fissuras e nós), o que reduz seus efeitos na capacidade de carga do elemento final em comparação com a madeira serrada (Huang *et al.*, 2022).

No Brasil, as espécies do gênero *Pinus* spp. são as mais utilizadas nas indústrias de laminados (Matos *et al.*, 2019; Braga *et al.*, 2020), uma vez que apresentam elevada permeabilidade a produtos de tratamentos químicos (Silva, 2007). Bilik e Trianoski (2022) destacam que esse gênero possui potencial para produção de LVL. No entanto, uma vez que os plantios dessas espécies se concentram nas Regiões Sul e Sudeste do país (Lima *et al.*, 2022a; APRE, 2022), o seu emprego na fabricação de LVL e comercialização no Norte e Nordeste do país se torna menos viável quando comparado com o uso de madeiras disponíveis nessas regiões.

Lima *et al.* (2022b) destacam que a madeira de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) possui potencial para a indústria de laminados devido à sua fácil trabalhabilidade de processamento e alta porosidade. De acordo com Sales (2018), as áreas de cultivo dessa espécie estão concentradas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, principalmente nos estados do Pará e Maranhão. Assim, a madeira de paricá apresenta-se como uma alternativa à madeira de pinus para a produção de elementos laminados, como o LVL, nessas regiões do país.

Embora apresente grande potencial, o LVL de madeira de paricá ainda não é aplicado como elemento estrutural, possivelmente em função da classe de resistência mecânica dessa espécie, por estar em torno de 20 MPa. Uma alternativa para contornar essa limitação é o uso de reforços com compósitos de polímero reforçado com fibras (FRP), técnica que pode aumentar as propriedades mecânicas do elemento estrutural, como rigidez e resistência à flexão, além de reduzir sua variabilidade (Huang *et al.*, 2022).

De acordo com Bakalarz e Kossakowski (2024), as fibras de carbono, vidro, aramida e basalto são os tipos de reforço mais comumente utilizados em materiais compósitos, enquanto o uso de fibras naturais é menos frequente. Percin e Altunok (2017) destacam que as fibras de carbono possuem alta resistência à tração, elevado módulo de elasticidade, estabilidade química e térmica na ausência de agentes oxidantes, além de baixa densidade e boa condutividade térmica e elétrica.

Apesar das vantagens associadas ao uso de fibras de carbono como alternativa para aprimorar as propriedades físico-mecânicas de elementos estruturais, ainda há uma escassez de estudos sobre a aplicação desse material em produtos engenheirados de madeira de paricá, destacando-se, até o momento, a ausência de estudo de reforço de LVL de paricá com fibras de carbono ou outras fibras, conforme verificado nas bases de dados consultada (*Scopus*, *ScienceDirect* e *Web of Science*), evidenciando a necessidade de mais pesquisas sobre o tema.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Como melhorar as propriedades mecânicas de vigas de LVL fabricadas a partir de madeira de paricá?

1.2 HIPÓTESE

O reforço de vigas de LVL, fabricadas com madeira de paricá, por meio da inserção de camadas de tecido de fibras de carbono na região tracionada, coladas com poliuretano à base de óleo de mamona, promove um aumento das propriedades mecânicas do material, como rigidez e resistência à flexão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do reforço com tecido de fibras de carbono no comportamento mecânico de vigas de LVL fabricadas com lâminas de paricá coladas com poliuretano à base de óleo de mamona.

1.3.2 Objetivos específicos

- Investigar a influência do reforço com tecido de fibras de carbono na capacidade de carga (força máxima e momento fletor), rigidez, modos de ruptura e ductilidade de vigas de LVL fletidas;
- Avaliar a eficácia de métodos analítico (método da seção transformada) e numérico (método dos elementos finitos) na estimativa do momento fletor máximo e da rigidez global de vigas de LVL reforçadas com fibras de carbono;
- Avaliar a eficiência do emprego da resina poliuretana à base de óleo de mamona na colagem das lâminas e do tecido de fibras de carbono.

1.4 JUSTIFICATIVA

A redução da oferta de espécies nativas de madeiras de grandes diâmetros no mercado madeireiro, devido à preservação ambiental e ao esgotamento por exploração indiscriminada, tem despertado o interesse das indústrias por madeiras provenientes de florestas plantadas (Sena, 2020). O desenvolvimento e uso dessas madeiras podem contribuir para reduzir os impactos da escassez de madeira nativa no mercado. Segundo Nadir *et al.* (2016), a crescente demanda por madeira e fibras provavelmente será suprida, em grande parte, por florestas plantadas. Nesse contexto, o desenvolvimento de pesquisas que promovam a diversificação do uso e da produção de madeiras oriundas de florestas plantadas, como o paricá, torna-se cada vez mais relevante.

Novas tecnologias e processos de produção, como produtos de madeira engenheirada, promovem o uso eficiente de toras de menor qualidade e diâmetro, além de espécies e resíduos de madeira que antes eram subutilizados, agregando valor comercial a esses materiais (Nadir *et al.*, 2016). Conforme destacado por Ramkumar *et al.* (2024), o processo de fabricação de LVL permite a utilização de espécies de madeira de baixa densidade e rápido crescimento, ampliando tanto a versatilidade quanto a sustentabilidade do produto.

A combinação de lâminas de madeira de baixa resistência mecânica com tecido de fibras de carbono pode resultar em produtos de qualidade mais uniforme e com melhores propriedades mecânicas. Essa abordagem permite uma utilização eficiente das matérias-primas de madeira, o que representa um benefício para a indústria madeireira. Além de aumentar o lucro econômico, essa prática favorece o uso sustentável das reservas florestais, gerando vantagens econômicas e ambientais (Sokolović *et al.*, 2023).

A aplicação de materiais de reforço, como o tecido de fibras de carbono, apresenta vantagens devido à sua elevada resistência e rigidez, o que reduz a variabilidade nas propriedades mecânicas (Percin; Altunok, 2017). Isso possibilita valores de projeto mais elevados e permite o uso de espécies de madeira de menor qualidade e rápido crescimento em projetos de construção. Além disso, reduz o tamanho e o peso dos membros estruturais, aumenta a ductilidade do produto, facilita a manutenção, melhora o desempenho à fadiga e contribui para a durabilidade e estabilidade dimensional do produto (Nadir *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a incorporação de fibras de carbono durante o processo de produção de LVL fabricados com lâminas de paricá pode se configurar como uma alternativa viável para o desenvolvimento de um produto madeireiro com propriedades mecânicas aprimoradas, contribuindo para a cadeia produtiva dessa espécie de madeira.

Apesar dos benefícios associados ao reforço de produtos engenheirados com madeira de paricá, a literatura apresenta apenas dois estudos sobre o tema, ambos com foco em madeira lamelada colada (MLC) (Coelho *et al.*, 2017; Rosa *et al.*, 2019). Isso evidencia a necessidade de mais pesquisas para consolidar e disseminar o conhecimento científico nessa área.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A escolha da madeira de paricá, dentre as espécies provenientes de florestas plantadas (eucaliptos, pinus, etc.), para a confecção das vigas de LVL utilizadas nesta pesquisa deve-se às suas características físicas, como a elevada porosidade, que favorecem a produção de produtos engenheirados de madeira (Costa *et al.*, 2020). Além disso, o paricá apresenta disponibilidade em regiões do estado da Bahia, onde este estudo foi conduzido.

Para a colagem de lâminas no processo de confecção de LVL, podem ser utilizados diversos tipos de adesivos termofixos, como poliuretano, ureia-formaldeído, fenol-formaldeído, melamina-formaldeído e resorcinol-formaldeído (Lima *et al.*, 2022a). Neste estudo, foi empregado um adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona, por se tratar de um produto derivado de um recurso natural e renovável, além de oferecer vantagens como baixo custo e facilidade de aplicação (Azambuja, 2006).

Produtos engenheirados de madeira, como o LVL, podem ter suas propriedades mecânicas melhoradas com a incorporação de materiais de reforço, como aço, alumínio ou compósitos FRP (Saad; Lengyel, 2022a). Os compósitos FRP podem ser encontrados em diferentes formas, como tecidos, barras e lâminas pultrudadas, sendo frequentemente compostos por fibras sintéticas, como vidro, carbono, basalto ou aramida (Bakalarz; Kossakowski, 2022a). No presente estudo, as vigas de LVL foram reforçadas com tecido unidirecional de fibra de carbono, sendo este um material com elevadas propriedades mecânicas e que tem sido utilizado em pesquisas realizadas

no Laboratório de Madeiras da UFBA (Silva, 2022), dando continuidade às investigações iniciadas em estudos anteriores.

O tecido de fibras de carbono, utilizado como reforço, pode ser aplicado em diferentes posições na viga de LVL, como nas extremidades superior e/ou inferior, nas laterais ou intercalado entre as lâminas de madeira. Neste estudo, o reforço com tecido de fibras de carbono foi posicionado entre a última e penúltima lâmina do bordo tracionado da viga. Para a aplicação do reforço, foi utilizado adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

1.6 ORIGINALIDADE DA PESQUISA

Esta pesquisa teve como ineditismo o estudo da aplicação do reforço com tecido de fibras de carbono em elementos de LVL fabricados com lâminas de paricá coladas com poliuretano à base de óleo de mamona.

1.7 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

- A realização desta pesquisa contribui para o desenvolvimento da indústria madeireira do país, promovendo o uso da madeira de paricá, espécie nativa brasileira, na produção de LVL reforçados com fibras de carbono;
- A pesquisa considerou aspectos ambientais, utilizando madeira de florestas plantadas de rápido crescimento, o que contribui para a preservação de matas e florestas nativas, essenciais para a fauna e flora;
- O desenvolvimento desta pesquisa forneceu subsídios para a empregabilidade da madeira de paricá na construção civil, promovendo o desenvolvimento econômico da cadeia produtiva da espécie;
- O desenvolvimento desta pesquisa contribuiu para a disseminação do conhecimento científico sobre o comportamento mecânico de vigas de LVL de paricá reforçadas com fibras de carbono.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MADEIRA DE PARICÁ

Schizolobium parahyba var. *amazonicum*, pertencente à família Leguminosae e classificada como uma espécie folhosa, é popularmente conhecida como paricá na região Norte do país. Trata-se de uma espécie nativa amazônica, pioneiramente empregada no cultivo de florestas plantadas (Oliveira et al., 2019). Segundo Cordeiro et al. (2015), o paricá tem ocorrência natural na Amazônia brasileira, peruana, colombiana, equatoriana e venezuelana, podendo crescer tanto em várzea alta como em solos de terra firme de florestas primárias e secundárias.

De acordo com Vidaurre et al. (2018), o paricá apresenta uma taxa de crescimento acelerado, podendo ser colhido em até sete anos após o plantio, e possui poucos defeitos naturais de crescimento, como nós, bolsa de resinas e fissuras. Essa espécie pode atingir alturas de até 40 m e, conforme apresentado na Figura 1, apresenta albarno de coloração clara, cerne avermelhado e casca espessa de coloração acinzentada (Moritani, 2018). Ela é considerada uma madeira leve, ou seja, de baixa densidade, por possuir massa específica aparente inferior a 400 kg.m^{-3} (Lima et al., 2022b).

Figura 1. Plantios de paricá e árvore colhida aos 5 anos de idade, com 27 cm de diâmetro.



Fonte: Siviero (2009), *apud* Costa (2015).

De acordo com Calil Neto (2011), o paricá é usado na produção de diversos produtos, dos quais pode-se destacar: celulose, forros, formas de concreto, portas, painéis laminados e reconstituídos. A baixa densidade e alta porosidade da espécie

são características favoráveis para a fabricação de produtos engenheirados de madeira (Costa *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2019). Tais características promovem o crescente cultivo do paricá, permitindo que o mesmo se tornasse a sexta espécie mais plantada no Brasil em 2018 (Ibá, 2019).

Para garantir o uso adequado das espécies de madeira na construção civil, é necessário conhecer suas propriedades físico-mecânicas. Nesse contexto, diversos estudos da literatura têm se dedicado à caracterização físico-mecânica da madeira serrada de paricá, sendo alguns deles apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios de propriedades físico-mecânicas da madeira de paricá encontrados na literatura.

Referência	Norma*	Idade da(s) tora(s)	ρ_{ap} (kg.m ⁻³)	f_{c0} (MPa)	E_{c0} (MPa)	f_{v0} (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
Almeida <i>et al.</i> (2013)	NBR 7190 (ABNT, 1997)	10 anos	370	24,00 (21,00)	7320	6,00 (4,00)	50,00 (32,00)	8900
Mascarenhas (2015)	COPANT 464 e 455 (COPANT, 1972)	-	350	22,66	-	-	34,57	4992
Terezo <i>et al.</i> (2015)	NBR 7190 (ABNT, 1997)	6 anos	327	30,84 (22,90)	11418	2,72 (2,06)	57,50 (44,13)	9293
Cavalheiro <i>et al.</i> (2016)	NBR 7190 (ABNT, 1997)	12 anos	-	25,00 (20,00)	8904	7,00 (5,00)	46,00 (39,00)	8803
Moritani (2018)	PN-02-126 10-001 (ABNT, 2018)	-	325	25,51	-	3,74	47,32	9010
Vidaurre <i>et al.</i> (2018)	NBR 7190 (ABNT, 1997)	5 anos	-	20,50	-	4,80	37,60	5107
Modes <i>et al.</i> (2020)	D 143 (ASTM, 1994)	14 anos	370	27,21	9178	5,58	53,54	7.579
Lima <i>et al.</i> (2022b)	NBR 7190-3 (ABNT, 2022)	5 anos	275	20,36	7356	4,00	25,91	6045

NOTA: * norma utilizada para a realização dos ensaios; ρ_{ap} = densidade aparente; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; E_{c0} = módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; MOR = resistência à flexão; MOE = módulo de elasticidade à flexão; valor entre parênteses = valor característico.

Fonte: o autor.

Os valores médios de densidade aparente encontrados pelos trabalhos da bibliografia, apresentados na Tabela 1, encontram-se no intervalo de 275 kg.m⁻³ a 370 kg.m⁻³. Nos estudos de Almeida *et al.* (2013) e Terezo *et al.* (2015) os corpos de prova

de madeira de paricá analisados permitiram enquadrar a espécie na classe de resistência mecânica D 20 para dicotiledôneas.

2.2 MADEIRA LAMINADA COLADA (LVL)

O LVL é um produto similar à madeira compensada em termos de composição e processo de fabricação, diferindo-se pelas espessuras das lâminas e pela orientação das fibras, que são sobrepostas na mesma direção (Sokolović *et al.*, 2023). Segundo a norma americana D 5456 (ASTM, 2001), o LVL é definido como um elemento estrutural composto por lâminas não mais espessas que 6,4 mm, cujas fibras são orientadas predominantemente na mesma direção.

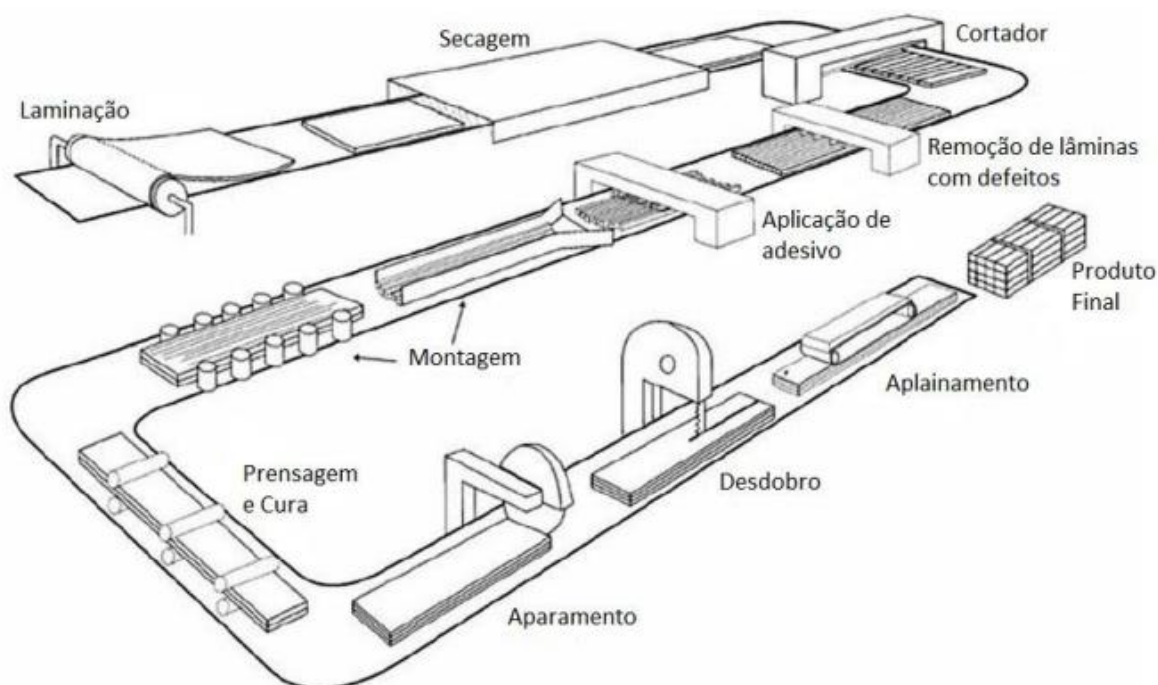
Segundo Hiziroglu (2016), o LVL foi inicialmente desenvolvido na década de 1940 para aplicações na indústria aeronáutica. Seu uso em engenharia civil, no entanto, só começou na década de 1970, quando estudos demonstraram que esse produto apresentava maior confiabilidade em termos de resistência mecânica comparado à madeira serrada. Desde então, avanços tecnológicos na indústria de manejo florestal e no desenvolvimento de adesivos promoveram a evolução desse material (Liebana, 2023).

A fina espessura das lâminas torna o LVL versátil, permitindo sua produção em uma variedade de tamanhos e formatos, o que torna o produto atraente para designers e arquitetos (Liebana, 2023). Esse produto é frequentemente utilizado em elementos de construção que exigem alta resistência mecânica e estabilidade, como vigas, travessas, pisos, cabeçalhos, caibros, tábuas de andaimes e banzos de treliças (Çolak; Çolakog˘lu; Aydın, 2007; Melinda *et al.*, 2024). De acordo com Ahmed e Arocho (2020), cerca de 29% do LVL produzido no mundo é empregado na fabricação de abas de vigas em "I", enquanto 64% são aplicados em cabeceiras de janelas e portas e em vigas de alta resistência mecânica.

De acordo com Liebana (2023), o processo de manufatura do LVL em escala industrial começa com a seleção e classificação das toras, considerando a espécie e a qualidade da madeira, a fim de obter lâminas com propriedades físicas e estéticas adequadas. As toras selecionadas são aquecidas por meio de borrifamento de água quente ou vapor para amolecer a madeira, facilitando o descascamento em um torno rotativo. Nesse processo, são produzidas lâminas com espessura fixada, geralmente de aproximadamente 3 mm, podendo variar entre 1 mm e 6 mm.

Após confeccionadas, as lâminas são expostas a ar quente e seco por um determinado período de tempo, até atingirem o teor de umidade desejado. Em seguida, elas são cortadas nas dimensões especificadas e classificadas conforme sua qualidade. As lâminas são então sobrepostas e unidas com um adesivo estrutural, sendo prensadas para consolidar os folheados e aquecidas para acelerar a cura do adesivo. Finalmente, o LVL é cortado nas dimensões desejadas. As etapas do processo de manufatura de LVL estão ilustradas na Figura 2.

Figura 2. Processo de manufatura de LVL.



Fonte: Amorim (2013).

2.2.1 LVL de paricá

Nos últimos anos, estudos têm avaliado a viabilidade do uso de lâminas de madeira de paricá para a fabricação de LVL. Esses estudos concentram-se na caracterização físico-mecânica dos elementos e na investigação de variáveis que influenciam suas propriedades, como a espessura das lâminas, o tipo de adesivo utilizado e a classificação das lâminas a partir do módulo de elasticidade dinâmico.

No estudo de Iwakiri *et al.* (2010) foram avaliadas as propriedades físico-mecânicas de LVL produzidos com lâminas de paricá, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* coladas com a resina fenol-formaldeído. Segundo os autores, a utilização da madeira de paricá para a produção de LVL é tecnicamente viável, uma vez que seu

desempenho mecânico foi similar ao LVL composto com lâminas de *Pinus taeda* nas faces, espécie amplamente utilizada na produção de painéis laminados.

Lima *et al.* (2023) realizaram a caracterização físico-mecânica de LVL de paricá colados com resina ureia-formaldeído. Os resultados indicaram que o LVL analisado possui densidade aparente média de 497,82 kg.m⁻³, sendo classificado como de densidade média. Além disso, a resistência à compressão paralela às fibras foi compatível com os valores estabelecidos para a classe de resistência D30, conforme a norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022).

Segundo Melo (2012), fatores como a espessura das lâminas, o tipo de adesivo utilizado e as técnicas de pré-classificação das lâminas podem influenciar diretamente as propriedades físico-mecânicas do LVL de paricá. No estudo de Melo e Del Menezzi (2014), foi avaliada a influência da espessura das lâminas nas propriedades mecânicas desse produto. Para isso, foram confeccionados elementos utilizando lâminas com espessuras de 1,54 mm, 2,32 mm e 2,71 mm. Os resultados indicaram que o uso de lâminas mais finas proporcionou maiores valores de resistência mecânica. No entanto, devido à maior quantidade de adesivo necessária para a sua produção, esses elementos foram considerados menos eficientes em comparação com aqueles produzidos com lâminas de maior espessura (2,71 mm), uma vez que apresentaram uma relação inferior entre resistência mecânica e a quantidade de adesivo utilizada.

A influência do tipo de adesivo nas propriedades físico-mecânicas de LVL de paricá foi analisada por Melo e Del Menezzi (2015a), que avaliaram três tipos de adesivos: acetato de polivinila (PVA), fenol-formaldeído e poliuretano. Os elementos confeccionados com poliuretano apresentaram a menor absorção de água, enquanto aqueles colados com fenol-formaldeído demonstraram o melhor desempenho mecânico.

Os resultados reportados pelos trabalhos mencionados, assim como por outros estudos da literatura, para as propriedades de resistência à compressão paralela às fibras, resistência ao cisalhamento na linha de cola e resistência e rigidez à flexão, tanto na posição *flatwise* (carga aplicada perpendicularmente às lâminas) quanto na posição *edgewise* (carga aplicada paralelamente às lâminas), de LVL fabricados com lâminas de paricá estão apresentados na Tabela 2.

Os estudos apresentados na Tabela 2 contribuem para o incentivo à produção e uso da madeira de paricá na fabricação de produtos engenheirados, como o LVL. Ao avaliar suas propriedades mecânicas, esses estudos contribuem para a expansão das possibilidades de aplicação desse material.

Tabela 2. Valores médios encontrados por trabalhos da literatura para as propriedades mecânicas de LVL de paricá.

Referência	Adesivo	g (g/m ²)	e (mm)	f_{c0} (MPa)	f_v (MPa)	Flexão edgewise		Flexão flatwise		
						MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	
Iwakiri <i>et al.</i> (2010)	fenol- formaldeído	320	2,00	-	1,81	74,50	20102	26,40	5157	
Amorim (2013)	acetato de polivinila (PVA)	150	1,84	19,80	2,70	-	-	36,10	4904	
Melo e Del Menezzi (2014)	acetato de polivinila (PVA)	200	1,54	28,26	4,42	49,28	7536	51,87	9845	
			2,32	28,84	4,28					7790
			2,71	28,17	3,86					7656
Costa (2015)	fenol- formaldeído	200	2,00	-	2,52	-	-	44,52	6118	
Melo e Del Menezzi (2015a)	acetato de polivinila (PVA)	200	2,71	28,17	3,86	49,11	7826	51,26	8427	
	fenol- formaldeído			26,25	4,82					
	poliuretano			26,92	4,64					
Melo e Del Menezzi (2015b)	fenol- formaldeído	200	2,71	26,4	4,80	53,10	9049	51,80	10162	
Lima <i>et al.</i> (2023)	ureia- formaldeído	180	2,50	35,09	1,71	57,37	8376	43,92	8133	

NOTA: g = gramatura de adesivo; e = espessura das lâminas; f_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras; f_v = resistência ao cisalhamento na linha de cola; MOR = resistência à flexão; MOE = módulo de elasticidade à flexão.

Fonte: o autor.

No contexto brasileiro, há uma lacuna de pesquisas sobre a produção de LVL utilizando madeiras tropicais, o que ressalta a necessidade de estudos que investiguem novas combinações de espécies de madeira e adesivos (Faria *et al.*, 2019).

2.3 ADESIVO POLIURETANO À BASE DE ÓLEO DE MAMONA

De acordo com o estudo de mercado mundial realizado pela Ceresana (2024), cerca de 13,5 milhões de toneladas de adesivos são consumidas anualmente, com a expectativa de crescimento de quase 4% ao ano na próxima década. Atualmente, a maioria dos adesivos é sintetizada a partir de matérias-primas à base de petróleo, como resinas epóxi, certos tipos de poliuretanos e adesivos à base de formaldeído, incluindo resina ureia-formaldeído, resina fenol-formaldeído e resina melamina-ureia-formaldeído (Ma *et al.*, 2024). No entanto, durante o processamento e a aplicação desses adesivos, são liberados compostos orgânicos voláteis (COVs) nocivos à saúde humana, como o formaldeído, classificado como carcinógeno humano, o que gera preocupações ambientais e de segurança (Chen; Wu; Chen, 2021; Gao *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o desenvolvimento de adesivos derivados de materiais sustentáveis para colagem de madeira, como alternativa às matérias-primas tradicionais e potencialmente nocivas, surgiu como um compromisso ambiental e econômico (Alfonso; Sánchez; Franco, 2022). Entre esses adesivos, o poliuretano (PU), produzido a partir de recursos naturais, destaca-se como uma alternativa viável às resinas à base de formaldeído (Chen; Wu; Chen, 2021).

O PU é produzido por meio da reação entre polióis (compostos com múltiplos grupos hidroxila) e isocianatos (grupos NCO), resultando em ligações uretano ($-NHCOO-$) que formam a estrutura principal do polímero (Alfonso; Sánchez; Franco, 2022). Alfonso, Sánchez e Franco (2022) destacam que materiais derivados de fontes naturais e biomassas, como óleos vegetais de mamona, palma, canola e soja, têm sido usados na síntese de polióis naturais para a produção de poliuretanos. Esses materiais se destacam por sua boa funcionalidade, versatilidade técnica, alta abundância e custo-benefício, sendo ideais para a produção de polímeros como substitutos de substâncias derivadas do petróleo (Sahoo *et al.*, 2017).

Entre os óleos naturais, o óleo de mamona é considerado o mais versátil (Moghadam *et al.*, 2016), devido ao seu grupo hidroxila, baixa toxicidade, biodegradabilidade, custo-benefício, adequação industrial e disponibilidade (Zhang *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2024). Além disso, essa substância é uma matéria-prima extraída de sementes da planta *Ricinus Communis*, com potencial para aplicação em revestimentos, adesivos, tintas e selantes (Moghadam *et al.*, 2016; Alfonso, Sánchez e Franco, 2022).

Os poliuretanos produzidos com óleo de mamona apresentam estabilidade termomecânica, resistência química e à água devido às características estruturais de seus ácidos graxos. O comprimento das cadeias e os arranjos específicos das cadeias pendentes dificultam a penetração de substâncias externas, protegendo o material em diferentes condições de uso (Liu *et al.*, 2016). Moghadam *et al.* (2016) destacam que o uso de poliuretano à base de óleo de mamona está alinhado ao conceito de desenvolvimento sustentável, representando uma alternativa viável aos materiais derivados de fontes não renováveis.

2.4 REFORÇO ESTRUTURAL

A desintegração de algumas estruturas existentes pode ocorrer devido ao aumento de peso ou à aplicação de cargas adicionais (Saad; Lengyel, 2022a). Quando os elementos estruturais apresentam rachaduras ou deflexão excessiva, seja por degradação ou insuficiência inicial de capacidade de carga, é necessário adotar medidas para solucionar o problema. A substituição dos elementos danificados pode não ser economicamente eficaz, já que essa solução tende a ser onerosa e demorada (Mashgari *et al.*, 2024). Assim, restaurar ou reforçar tais elementos surge como uma solução mais viável (Saad; Lengyel, 2022a).

De acordo com Mathuros *et al.* (2024), as técnicas de reforço promovem o aumento das propriedades mecânicas dos elementos danificados, garantindo uma operação segura e conformidade com os requisitos de projeto. Além disso, as técnicas de reforço apresentam benefícios econômicos e ambientais, como: aumento da capacidade de carga de elementos históricos, possibilitando a sua preservação (Nowak; Jasieńko; Czepizak, 2013); promove a utilização de espécies de madeira de rápido crescimento ou elementos de baixa qualidade (Raftery; Harte, 2011); e possibilita o emprego de elementos com seções transversais reduzidas, o que diminui o consumo de material e amplia a área útil dos espaços (Bakalarz, Kossakowski, 2024).

De acordo com Saad e Lengyel (2022a), os métodos tradicionais de reforço em elementos estruturais geralmente utilizam placas ou barras de aço e placas de alumínio. Contudo, como destacado por İşleyen *et al.* (2023), o uso desses materiais apresenta algumas desvantagens, tais como: aumento do peso da estrutura; redução dos espaços úteis do local onde foram instalados; pouca durabilidade, devido ao risco de corrosão; limitações geométricas; e custo elevado de instalação.

Em comparação com elementos de aço e alumínio convencionais, os compósitos de polímero reforçado com fibras (FRP) têm uma relação resistência-peso mais alta, não são corrosivos, têm excelente adaptabilidade, custos reduzidos de manutenção a longo prazo e têm instalação rápida no local (Nadir *et al.*, 2016; Saad; Lengyel, 2022a). Além disso, esse material apresenta elevada resistência e rigidez mecânica, baixa densidade e neutralidade eletromagnética, características que o torna um candidato adequado em muitas aplicações estruturais, incluindo reabilitação, reforço e o desenvolvimento de novos elementos de madeira (Fiorelli; Dias, 2003).

Os materiais FRP são compósitos feitos pela incorporação de fibras de alta resistência mecânica em uma matriz adesiva (Saad; Lengyel, 2022a). As fibras conferem resistência mecânica ao compósito, enquanto o adesivo é responsável pela transmissão de tensões (Percin; Altunok, 2017). Esses materiais são produzidos em uma variedade de formas e tamanhos, sendo frequentemente comercializados como lâminas pultrudadas, barras ou tecidos (unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais), podendo ser instalados externamente ou internamente, na zona de tração e/ou compressão da viga (Bakalarz; Kossakowski, 2022a; Saad; Lengyel, 2022a).

Os compósitos FRP podem ser constituídos por diversos tipos de fibras, com destaque para as fibras de carbono (Mercimek *et al.*, 2024), vidro (Mathuros *et al.*, 2024), aramida (Bakalarz; Kossakowski, 2019) e basalto (Thorhallsson; Hinriksson; Snæbjornsson, 2017), que são as mais comumente utilizadas, enquanto o uso de fibras naturais é menos comum (Bakalarz; Kossakowski, 2024).

De acordo com Percin e Altunok (2017), as fibras de carbono geralmente apresentam elevado módulo de elasticidade e resistência à tração, baixa densidade, alta estabilidade térmica e química na ausência de agentes oxidantes e boa condutividade térmica e elétrica. Ainda segundo os mesmos autores, existem diversos tipos de trama de fibra de carbono (como bidirecional, unidirecional, plana, sarja, twill e satin), sendo a trama plana uma das mais comumente utilizadas.

Quando incorporadas a uma matriz adesiva, as fibras de carbono formam compósitos denominados polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP). De acordo com Dias, Branco e Cruz (2004) o CFRP é empregado nas indústrias aeronáutica, naval e automobilística. Saad e Lengyel (2022a) destacam que esses

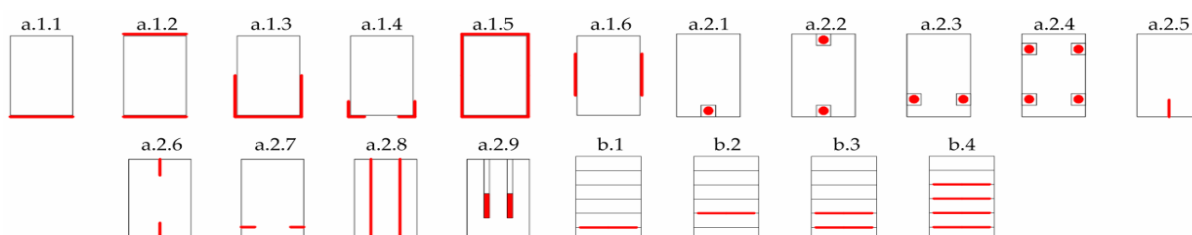
compósitos apresentam vantagens no reforço de elementos de madeira, uma vez que são duráveis, aderem facilmente a madeira e apresentam baixa densidade.

2.4.1 Vigas de madeira reforçadas com fibras de carbono

A investigação do comportamento mecânico de elementos de madeira reforçados com FRP teve início na década de 1960, com os primeiros estudos publicados na área (Biblis, 1965; Theakston, 1965). Desde então, o número de publicações tem aumentado progressivamente com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre o assunto. García, Escamilla e García (2016) destacam que os principais tópicos abordados incluem a avaliação da rigidez dos elementos reforçados, o aumento da capacidade de carga, a influência do reforço nos modos de ruptura e a análise da integridade da interface entre a madeira e o material compósito.

Os métodos de aplicação de reforços com FRP em vigas de madeira apresentam diversidade, tanto em relação ao posicionamento e tipo dos reforços quanto à geometria adotada. No estudo de Rescalvo *et al.* (2017), são apresentados os principais *layouts* de tecidos, laminados e barras de FRP comumente utilizados no reforço de vigas de madeira (Figura 3). Em tais métodos, o reforço pode ser aplicado na parte externa (*layouts* a.1) ou interna (*layouts* a.2) da viga, além de poder ser incorporado durante o processo de produção de elementos como MLC e LVL, conforme indicado nos *layouts* "b".

Figura 3. Layouts de reforço de vigas de madeira.



Fonte: Rescalvo *et al.* (2017).

De acordo com Patalas, Brol e Nowak (2023), o uso de materiais de reforço durante a fabricação de produtos engenheirados de madeira promove a redução no consumo de matéria-prima e possibilita a utilização de madeiras com baixa resistência mecânica e/ou que apresentam defeitos, alinhando-se à abordagem de design

econômico, que prioriza a otimização de recursos. Além disso, a integralização da técnica de reforço à manufatura de PEM possibilita a criação de um compósito estrutural com características mecânicas previamente planejadas, atendendo as necessidades que o material deve satisfazer na construção (Sokolović *et al.*, 2023).

Para otimizar a utilização de tecidos de fibra de carbono na fabricação de PEM, é necessário definir adequadamente o posicionamento do reforço no elemento. De acordo com Saad e Lengyel (2022a), vigas de madeira submetidas a esforços de flexão geralmente falham devido à ruptura frágil na zona de tração, o que resulta em uma utilização limitada da capacidade de deformação plástica da zona de compressão da madeira. Devido à sua alta capacidade de deformação, o reforço aplicado na região de tração reduz as tensões de tração na madeira, permitindo o acúmulo de tensões na zona de compressão, o que resulta em uma melhor utilização da capacidade de flexão da viga antes que a madeira falhe por tração (Bakalarz; Kossakowski, 2022a; Saad; Lengyel, 2022a). Nesse sentido, o reforço deve ser posicionado o mais próximo possível da camada superficial inferior da viga (Wei *et al.*, 2013).

Segundo Basterra *et al.* (2012), o reforço com tecido de fibras de carbono é normalmente aplicado na extremidade inferior das vigas de madeira (*layout* a.1.1 da Figura 2), de forma horizontal e visível, o que causa inconvenientes estéticos e aumenta a sua vulnerabilidade ao fogo em caso de incêndio. Nesse sentido, para a produção de PEMs como o LVL, Wei *et al.* (2013) recomendam que a camada de reforço seja posicionada entre as lâminas de madeira da camada externa e da subcamada (conforme o *layout* b.1 na Figura 2), o que proporciona maior proteção à camada de reforço, além de aumentar a área de aderência entre os dois materiais, elevando a resistência ao deslizamento do produto.

Assim como a escolha do posicionamento do tecido de fibras de carbono na viga, a seleção do adesivo a ser utilizado na colagem entre o reforço e a madeira deve ser feita adequadamente. O adesivo deve possuir resistência mecânica adequada e ser capaz de aderir tanto ao tecido de reforço quanto à madeira. Schober *et al.* (2015) destacam que os adesivos disponíveis para tal função são divididos nas seguintes categorias: epóxis, poliuretanos, poliésteres, fenólicos e aminoplásticos.

De acordo com Raftery e Rodd (2015), os adesivos epóxi são comumente considerados como a primeira escolha de adesivo para a interface madeira-reforço. Por outro lado, Huang *et al.* (2022) destacam que, em comparação aos adesivos

epóxi, os adesivos de poliuretano geralmente apresentam menor custo, maior ductilidade na ruptura, além de alta flexibilidade, tenacidade, resistência à fadiga e tolerância a danos. Além disso, uma vez que essa categoria de adesivo é amplamente utilizada para a produção de PEM (Brunetti *et al.*, 2019), o emprego de um único adesivo poliuretano tanto na manufatura do produto quanto na aplicação do reforço torna-se significativamente mais econômico e abriria novas perspectivas no reforço de elementos de madeira com CFRP (Raftery; Rodd, 2015; Brunetti *et al.*, 2019)

Após definir o tipo e localização do reforço, bem como o adesivo a ser utilizado na fabricação do PEM reforçado, devem ser tomadas medidas que garantam a qualidade da linha de cola das interfaces entre os materiais. Segundo Subhani *et al.* (2017), a aderência entre o tecido de fibras de carbono e as superfícies de madeira é influenciada por diversos fatores, como a espessura da linha de cola, os defeitos naturais da madeira, a preparação da superfície e a direção das fibras da madeira.

Em relação à preparação das superfícies, Schober *et al.* (2015) destacam que estas devem estar secas, livres de contaminantes (como poeira), e apresentar rugosidade adequada. Além disso, a preparação deve ser feita imediatamente antes do processo de colagem, respeitando as orientações do fabricante para o preparo e aplicação do adesivo. A adoção dessas práticas contribui para uma colagem de maior qualidade entre os materiais, otimizando o efeito do reforço no desempenho mecânico do elemento de madeira.

2.4.1.1 Efeito do reforço na capacidade de carga e rigidez à flexão

De acordo com García, Escamilla e García (2016), a ruptura predominante de vigas de madeira serrada submetidas à flexão ocorre devido à tensão de tração, com a fratura frequentemente localizada no lado inferior da viga. Nesse contexto, os autores destacam que o uso de compósitos FRP, conhecidos por sua elevada resistência e rigidez à tração, para reforçar a parte inferior das vigas de madeira, pode aumentar significativamente a resistência à flexão e, possivelmente, a rigidez do elemento estrutural. Segundo Saad e Lengyel (2022b), o incremento na resistência mecânica de vigas de madeira devido ao reforço com CFRP é mais significativo do que o aumento na rigidez mecânica desse elemento, que, na maioria dos casos, não ultrapassa 30%.

O efeito do reforço com tecidos de fibra de carbono na capacidade de carga e rigidez à flexão de elementos de madeira tem sido avaliado por diversos estudos ao longo dos últimos anos. Após a realização de uma busca por artigos científicos nas plataformas *Scopus*, *ScienceDirect*, *Google Scholar* e *Web of Science*, utilizando-se as palavras-chave ((*timber OR wood*) AND (*reinforcement OR strengthening*) AND (*CFRP OR carbon fibers*)), e considerando-se os trabalhos com elevado número de citações, foram selecionados os estudos apresentados na Tabela 3. Esses trabalhos apontam incrementos na capacidade de carga, variando entre 1% e 75%, e na rigidez à flexão, com aumentos entre 2% e 67%. Segundo Schober *et al.* (2015) e Bakalarz e Kossakowski (2024), a influência do reforço nas propriedades mecânicas de elementos estruturais de madeira é dependente de diversos fatores, como a espécie de madeira utilizada; o percentual, o tipo e a configuração do próprio reforço; a qualidade da linha de cola; além da temperatura e do teor de umidade do elemento. Esses fatores podem explicar as variações nos percentuais de incremento observadas nos diferentes estudos.

Como pode ser observado na Tabela 3, a maioria dos estudos apresentados utilizou os procedimentos especificados na norma BS EN 408 (CEN, 2012) para a realização dos ensaios à flexão de quatro pontos. Conforme a configuração de ensaio especificada na norma, ilustrada na Figura 4, o vão entre os apoios pode variar entre 15 e 21 vezes a altura da viga, enquanto a distância entre os pontos de aplicação da carga deve ser igual a 6 vezes a altura da viga. Para calcular o módulo de elasticidade do elemento, o deslocamento deve ser medido com um dispositivo, como um relógio comparador ou LVDT, posicionado no centro do vão.

Tabela 3. Incremento na capacidade de carga e rigidez de elementos reforçados com tecido de fibras de carbono relatado em estudos da literatura.

(continua)

Referência	Tipo de viga	Tipo de madeira	Norma	Adesivo*	e (mm)/FV (%)	Δ_{cc} (%)	$\Delta_{rigidez}$ (%)
Basterra <i>et al.</i> (2012)	MLC	Choupo	BS EN 408 (CEN, 2004)	Epóxi	0,136 mm	57,3	23,5
Wei <i>et al.</i> (2013)	LVL	Choupo	GB/T 20241 (CNS, 2006)	Epóxi	0,160 mm	40	40-67
Andor <i>et al.</i> (2015)	Serrada	Picea abies	BS EN 408 (CEN, 2004)	Epóxi	Não especificado	18,2-33	9,12-16

Tabela 3. Incremento na capacidade de carga e rigidez de elementos reforçados com tecido de fibras de carbono relatado em estudos da literatura.

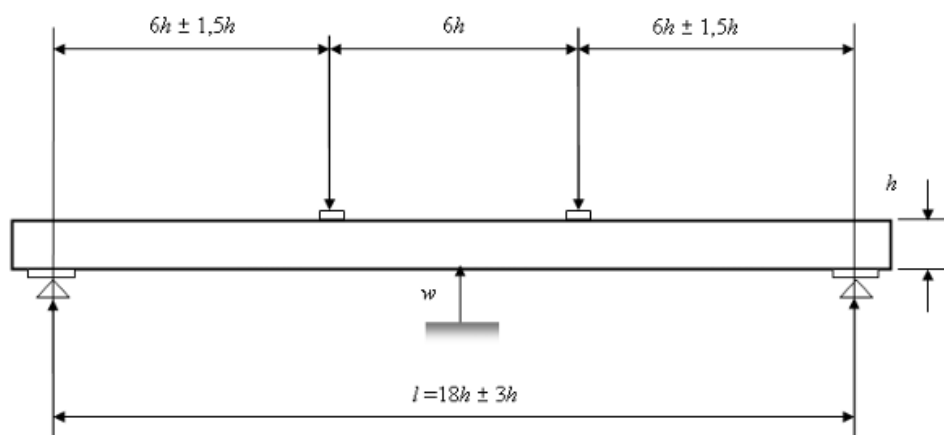
(conclusão)

Referência	Tipo de viga	Tipo de madeira	Norma	Adesivo*	e (mm)/FV (%)	Δ_{CC} (%)	$\Delta_{rigidez}$ (%)
Wang <i>et al.</i> (2015)	LVL	Choupo	GB/T 20241 (CNS, 2006)	Fenol-formaldeído	Não especificado	25,64	19,5
Nadir <i>et al.</i> (2016)	MLC	Seringueira	D198 (ASTM, 2009)	Epóxi	Não especificado	45,8-50	36,19-64
Brunetti <i>et al.</i> (2019)	MLC	Picea abies	BS EN 408 (CEN, 2012)	Epóxi e poliuretano	0,273 mm e 0,546 mm	44,6-57	7,90-16,6
Postulak e Brol (2020)	MLC	Pinheiro-silvestre	BS EN 408 (CEN, 2012)	Epóxi	Não especificado	23	36,29
İşleyen <i>et al.</i> (2021)	MLC	Pinheiro-silvestre	Não especificado	Epóxi	0,12 mm	35-75	43
Bakalarz e Kossakowski (2022a)	LVL	Pinus	PN EN 14374 (PKN, 2005) e BS EN 408 (CEN, 2012)	Epóxi	0,19-0,61%	30-35	24-33
Bakalarz e Kossakowski (2022b)	LVL	Pinus	PN EN 14374 (PKN, 2005) e BS EN 408 (CEN, 2012)	Epóxi	0,333 mm	42-51	15-43
Saad e Lengyel (2022b)	Serrada	Picea abies	BS EN 408 (CEN, 2012)	Epóxi	0,129 mm	27	13-30
Percin e Uzun (2023a)	LVL	Pinheiro-silvestre	TS 2474 (1976), TS 2478 (1976)	PVAc, fenol formaldeído e poliuretano	Não especificado	7-14,0	12-18,0
Percin e Uzun (2023b)	LVL	Pinheiro-silvestre	TS 2474 (1976), TS 2478 (1976)	Poliuretano	0,327 mm	1-4,0	2-8,0
Bakalarz e Kossakowski (2024)	LVL	Pinus	PN EN 14374 (PKN, 2005) e BS EN 408 (CEN, 2012)	Epóxi	0,189 mm e 0,333 mm	5-48	18-62

NOTA: * Adesivo utilizado na colagem entre o tecido de fibras de carbono e a madeira; e = espessura do tecido de fibras de carbono; FV = fração do volume de fibras de carbono; Δ_{CC} = incremento na capacidade de carga; $\Delta_{rigidez}$ = incremento na rigidez.

Fonte: o autor.

Figura 4. Configuração de ensaio para determinação da resistência e módulo de elasticidade à flexão de vigas.



Fonte: BS EN 408 (CEN, 2012).

Para determinar a rigidez global (EI_{global}) de vigas, reforçadas ou não com compósitos FRP, os estudos de Soriano, Pellis e Mascia (2016), Nadir *et al.* (2016) e Brunetti *et al.* (2019) utilizaram a Equação (1). Essa equação é fundamentada no cálculo teórico das deflexões de vigas simplesmente apoiadas submetidas a cargas concentradas.

$$EI_{global} = \frac{(3aL^2 - 4a^3)\Delta F}{24\Delta v} \quad (1)$$

onde ΔF é a diferença entre os valores de força correspondentes a 40% e 10% da força máxima, Δv é a diferença entre os valores de deslocamento registrados nas forças equivalentes a 40% e 10% da força máxima, L é o comprimento do vão e a é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo.

2.4.1.2 Efeito do reforço na ductilidade

A ductilidade pode ser definida como a capacidade do elemento de suportar deformações inelásticas sem perda em sua capacidade de suporte de carga antes da ruptura (Nadir *et al.*, 2016), podendo ser expressa em termos de medidas de deslocamento ou absorção de energia (Bakalarz; Kossakowski, 2022a).

De acordo com Jorissen e Fragiaco (2011), as principais razões para projetar estruturas dúcteis são: garantir que a ruptura do elemento ocorra após elevadas deformações, oferecendo um alerta prévio aos usuários; aumentar a capacidade de carga da estrutura em relação aos valores estimados com base na análise elástica, por meio da redistribuição de tensões e forças; permitir a dissipação de energia em

situações de carga sísmica; e assegurar a transferência de deslocamentos e rotações ampliados no caso de falha de um dos elementos do sistema.

Além de contribuir para o aumento da capacidade de carga e rigidez de estruturas de madeira, os materiais CFPR podem promover a ductilidade do elemento. Segundo Saad e Lengyel (2022a), vigas de madeira reforçadas com CFRP apresentam um comportamento mais dúctil em comparação às vigas de madeira não reforçadas, que geralmente apresentam ruptura frágil por tração. Com quantidades crescentes de reforço na região de tração, o comportamento mecânico torna-se dúctil devido à compressão, resultando em altos níveis de deformação (Schober *et al.*, 2015).

Distintos métodos são usados por trabalhos da literatura para calcular o índice de ductilidade de vigas de madeira reforçadas. No estudo de Bakalarz e Kossakowski (2022a), foi avaliada a influência do reforço com tecido de fibras de carbono, aramida e vidro na ductilidade e rigidez de vigas de LVL. Para determinar os índices de ductilidade, os autores utilizaram diferentes métodos, descritos nas Equações (2), (3) e (4). Como resultado, os autores observaram incrementos de 7% a 51% nos índices de ductilidade calculados com base nas Equações (3) e (4), em comparação com os LVL sem reforço. Por outro lado, o índice de ductilidade obtido pela Equação (2) apresentou variações entre -24% e 28% em relação aos LVL sem reforço.

$$D = \frac{\delta_{Fmáx,R}}{\delta_{Fmáx,NR}} \quad (2)$$

em que D é o índice de ductilidade, $\delta_{Fmáx,R}$ e $\delta_{Fmáx,NR}$ são os deslocamentos resultantes da aplicação da força máxima na viga reforçada e não reforçada, respectivamente.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3)$$

onde μ_{Δ} é o índice de ductilidade, δ_u é o deslocamento final e δ_y é o deslocamento no ponto de escoamento.

$$\mu_E = \frac{1}{2} \left(\frac{W_{tot}}{W_{el}} + 1 \right) \quad (4)$$

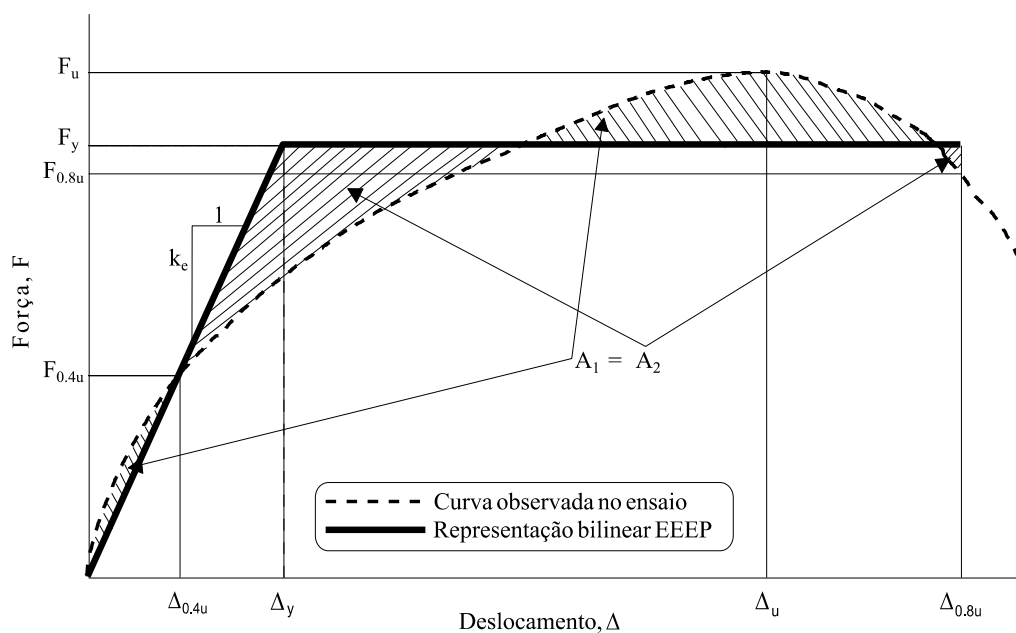
em que μ_E é o índice de ductilidade, W_{tot} é a energia total (numericamente igual a área total sob a curva força-deslocamento) e W_{el} é a energia elástica (numericamente igual a área sob o trecho linear da curva força-deslocamento).

No estudo realizado por Nadir *et al.* (2016), foi avaliado o comportamento mecânico de vigas de MLC reforçadas com polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP) e carbono (CFRP). Para determinar o índice de ductilidade das vigas analisadas, os autores utilizaram o método das energias (Equação (4)). Os resultados mostraram índices médios de ductilidade de 2,24 e 2,33 para vigas reforçadas com uma e duas camadas de CFRP, respectivamente. Esse reforço proporcionou um incremento máximo de ductilidade de 54,30% em relação à série de vigas sem reforço, cujo índice médio foi de 1,51.

Bakalarz e Kossakowski (2022a) e Ahmad (2013) destacam que a identificação do ponto de escoamento em elementos reforçados com materiais FRP pode ser difícil, constituindo um dos principais desafios para a aplicação das equações anteriormente apresentadas. Nesses casos, o método da energia equivalente elasto-plástica (do inglês - *Equivalent energy elastic-plastic* – EEEP) pode ser empregado para estimar o ponto de escoamento. Os modelos EEEP foram originalmente introduzidos por Park (1989) e posteriormente empregados por outros autores na avaliação da ductilidade de paredes estruturadas em aço.

Os modelos assumem que a energia dissipada em uma estrutura durante carregamentos monotônicos ou cíclicos é equivalente à energia definida por uma curva bilinear, conforme apresentado na Figura 5. A curva bilinear é delimitada pelo deslocamento último, assumido, normalmente, no ponto correspondente a 80% da resistência pós-pico, enquanto sua inclinação inicial é obtida a partir da rigidez (K_e) traçada no ponto que representa 40% da carga final (Rogers *et al.*, 2011). A coordenada referente ao ponto de escoamento (F_y, Δ_y) é então obtida pela interseção das duas retas que compõem a curva bilinear.

Figura 5. Método da energia equivalente elasto-plástica.



Fonte: Adaptado de Rogers *et al.* (2011).

2.4.1.3 Efeito do reforço no modo de ruptura

Franke, Franke e Harte (2015) destacam que vigas de madeira submetidas à flexão podem apresentar redução na resistência mecânica devido a presença de defeitos naturais, como nós, especialmente na região tracionada do elemento. Nesses casos, o colapso do elemento é caracterizado pela ruptura frágil da zona tracionada. Ainda segundo os autores, vigas não reforçadas tendem a apresentar predominantemente esse modo de ruptura frágil.

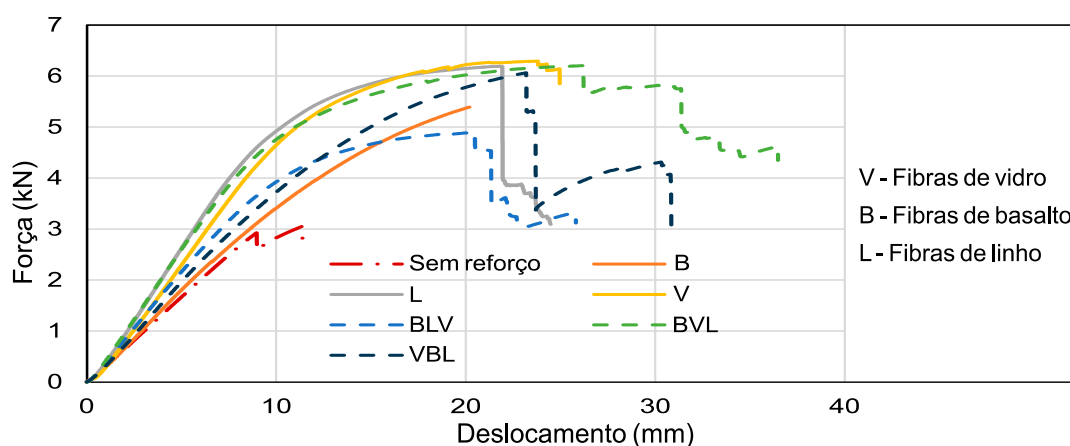
Quando uma viga de madeira é reforçada na região tracionada, o modo de ruptura pode se alterar de uma falha por tração para uma falha por compressão (Ahmad, 2013). Com o incremento do percentual de reforço, o eixo neutro da seção transversal da viga desloca-se para baixo, resultando em uma tensão de compressão superior à de tração na madeira, o que pode levar ao início do escoamento por compressão antes que ocorra a ruptura por tração (Franke; Franke; Harte, 2015).

A alteração do modo de ruptura de vigas de madeira reforçadas pode ser acompanhada de incrementos nas propriedades mecânicas e na ductilidade dos elementos. De acordo com Schober *et al.* (2015), o reforço aplicado na zona de tração atua interligando defeitos existentes, como nós, e restringe a propagação de fissuras, permitindo que a madeira suporte cargas maiores e atinja deformações de

escoamento na compressão antes da ruptura. Tais alterações podem ser observadas nos diagramas força–deslocamento dos elementos ensaiados.

No estudo de Wang *et al.* (2019), foi analisada a influência do reforço com diferentes tipos de fibras no comportamento mecânico de vigas de madeira. Os resultados apresentados pelos autores (Figura 6) evidenciam alterações tanto na resistência quanto na ductilidade dos elementos, com as séries reforçadas exibindo desempenho superior em comparação ao elemento não reforçado.

Figura 6. Curvas força-deslocamento de vigas de madeira reforçadas com três camadas de FRP.



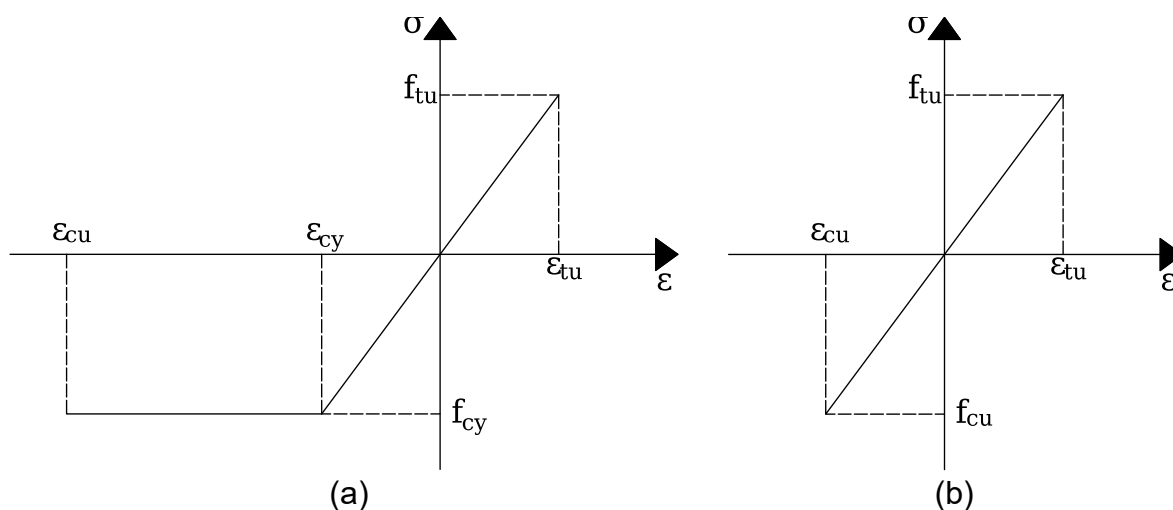
Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2019).

2.4.1.4 Estimativa por método teórico

Os métodos de previsão da resistência à flexão de vigas de madeira reforçadas com FRP dependem das propriedades mecânicas dos materiais e dos modelos de interação adotados. Quando solicitada à tração paralela às fibras, a madeira apresenta resistência mecânica proporcional à sua área de seção transversal, comportamento linear-elástico (Figura 7.a) e ruptura frágil (Buchanan, 1990). Já sob compressão paralela às fibras, a madeira é comumente representada com um comportamento linear-elástico até o escoamento. A partir do escoamento, a madeira retém certo nível de resistência mecânica residual, cuja magnitude varia para diferentes modelos da literatura. Segundo o modelo simplificado proposto por Neely (1898), a madeira apresenta comportamento elástico-perfeitamente plástico quando submetida à compressão paralela às suas fibras (Figura 7.a). Quanto ao compósito reforçado com fibras, o seu comportamento à tração pode ser entendido como sendo

linear-elástico até a ruptura (Callister; Rethwisch, 2016), conforme apresentado na Figura 7.b.

Figura 7. Comportamento mecânico dos materiais para análise teórica: (a) madeira e (b) FRP.



Fonte: Adaptado de Yeboah e Gkantou (2021).

Devido à sua simplicidade, o método da seção transformada é amplamente utilizado na análise de tensões normais em vigas compostas (i.e., constituídas de dois ou mais materiais) submetidas à flexão. Esse método consiste na “transformação” da seção transversal da viga composta em uma seção feita de um único material, por meio de um fator de transformação, de tal forma que as propriedades mecânicas e geométricas dos materiais possam ser equivalentes. Limitações desse método incluem a consideração de que os materiais apresentam apenas comportamento linear-elástico e nenhuma distinção é feita entre o comportamento à tração e à compressão (Hibbeler, 2012).

Considerando uma viga simplesmente apoiada submetida à flexão, e assumindo que a sua ruptura seja governada pela falha da madeira por tração, o momento fletor máximo resistente do elemento pode ser obtido por meio da Equação (5).

$$M = f_m \cdot \frac{I'}{\bar{y}'} \quad (5)$$

em que M é o momento fletor máximo, f_m é a resistência à flexão da viga de madeira sem reforço, I' é o momento de inércia da seção transformada, determinado através da Equação (6), e \bar{y}' é a posição da linha neutra da seção transformada medida a partir da base ou do topo da viga, obtida por meio da Equação (7).

$$I' = \sum(I'_i + A'_i d_i^2) \quad (6)$$

$$\bar{y}' = \frac{\sum(A'_i y_i)}{A'_i} \quad (7)$$

em que I'_i é momento de inércia de cada componente transformado em relação ao seu centroide, A'_i é a área transformada de cada componente, d_i é a distância vertical do centroide de cada componente ao eixo neutro, e y_i é a distância vertical do centroide de cada componente à base da viga.

Para o caso de uma viga de madeira reforçada com FRP, a homogeneização da seção transversal é realizada por meio da multiplicação da largura do compósito pelo fator de transformação (n), determinado pela razão entre o módulo de elasticidade à tração do compósito e o módulo de elasticidade à flexão da madeira. A partir da geometria da seção transformada, determinam-se a posição teórica da linha neutra e o momento de inércia equivalente, possibilitando a estimativa dos valores máximos teóricos de momento fletor e rigidez global.

No estudo de Nadir *et al.* (2016), o método da seção transformada foi empregado para estimar a rigidez global de vigas de madeira reforçadas com GFRP e CFRP, tendo resultado, em sua maioria, em valores inferiores aos observados experimentalmente. Segundo os autores, as diferenças observadas podem estar relacionadas ao efeito de laminação da MLC utilizada, decorrente do processo de colagem das lamelas, o qual pode resultar em vigas com resistência mecânica superior à das lamelas individuais que as compõem.

Bakalarz e Kossakowski (2023) estimaram o momento fletor máximo de vigas de LVL reforçadas com CFRP por meio do referido método analítico, encontrando diferenças percentuais entre -11% e 5% em relação aos valores experimentais, o que, segundo os autores, indica alta precisão do método. No estudo subsequente, Bakalarz e Kossakowski (2024) verificaram a eficácia do método na estimativa da rigidez de vigas de LVL reforçadas com GFRP e CFRP, registrando erro máximo de 6%. Contudo, foram observadas discrepâncias entre os valores teóricos e experimentais

de momento fletor, com diferenças percentuais de até 200%. De acordo com os autores, tais divergências decorrem do fato de que o método analítico assume uma distribuição linear de tensões normais na seção transversal, desconsiderando a ocorrência de deformação plástica na zona comprimida.

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura mostrou que, embora o paricá apresente rápido crescimento, facilidade de processamento e disponibilidade no mercado nacional, suas propriedades mecânicas limitadas demandam soluções para ampliar seu uso em aplicações estruturais. Nesse contexto, a produção de produtos engenheirados de madeira, como o LVL, tem se mostrado uma alternativa viável para melhorar o desempenho mecânico da madeira de paricá.

Além disso, destaca-se a importância do uso de adesivos oriundos de fontes renováveis, como o poliuretano à base de óleo de mamona, visando à produção de materiais com menor impacto ambiental. No entanto, até o momento, não foram identificados estudos que avaliaram a viabilidade do emprego desse adesivo na fabricação de LVL com madeira de paricá.

Com base nos estudos apresentados neste capítulo, a incorporação de tecido de fibras de carbono como reforço no processo de fabricação de produtos engenheirados de madeira, como o LVL, configura-se como uma estratégia viável para o aprimoramento de suas propriedades mecânicas. No entanto, observa-se uma escassez de estudos que avaliaram elementos de madeira de paricá reforçados com FRP.

Diante disso, esta pesquisa propõe investigar o efeito do reforço com tecido de fibras de carbono no desempenho mecânico de vigas de LVL produzidas com lâminas de paricá. Espera-se que os resultados obtidos contribuam para a ampliação do conhecimento técnico sobre o reforço de elementos de madeira engenheirada com compósitos, além de oferecer suporte ao uso de madeira de rápido crescimento na construção civil. A seguir, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados na condução da etapa experimental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Madeira

Para a campanha experimental deste estudo, foram utilizadas 21 toras de madeira da espécie paricá (*Schizolobium parahyba var. amazonicum*), com 5 anos de idade, provenientes de plantios florestais localizados cidade de Catu, na Bahia, cedidas pela a empresa CM Venturoli. As toras apresentavam um diâmetro médio de 18 cm e um comprimento de 3 m, com uma seção transversal composta, em sua maior parte, por alburno. Isto ficou evidenciado, depois de aparelhadas as toras em quatro faces como mostrado na Figura 8.

Figura 8. Seção transversal das toras após aparelhamento.



Fonte: o autor.

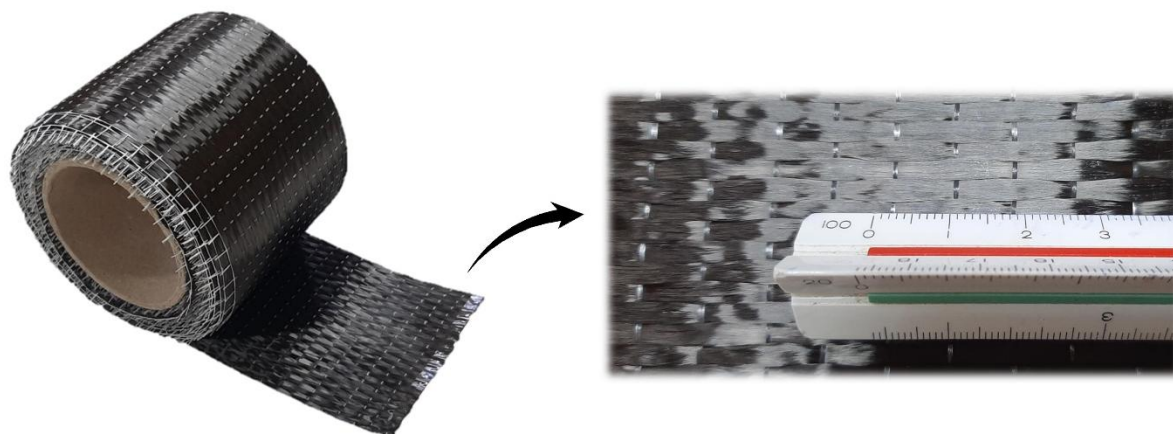
As toras foram armazenadas por um período de dois meses no Laboratório de Madeiras (LABMAD) da Universidade Federal da Bahia. Ao final desse período, observou-se o início de ataques por agentes xilófagos, como cupins, brocas marinhas, além da presença de fungos manchadores e apodrecedores. Diante disso, procedeu-se ao desdobro das toras para a confecção de lâminas e corpos de prova, mesmo sem que o material tivesse atingido o teor de umidade de equilíbrio higroscópico (15%) característico da cidade de Salvador, Bahia.

3.1.2 Tecido de fibras de carbono

O reforço das vigas de LVL foi realizado com tecido de fibras de carbono unidirecional de nome comercial *Carbon Fiber™* 300 GSM Unidirecional (Figura 9),

comercializado pela empresa Carbono Brasil. O material apresentava densidade superficial de 300 g/m^2 e espessura nominal de $0,28 \text{ mm}$ (Tabela 4).

Figura 9. Tecido de fibras de carbono unidirecional.



Fonte: O autor.

Tabela 4. Características do tecido de fibras de carbono fornecidas pela empresa.

Parâmetro	Unidade	Valor nominal
Largura	cm	10
Densidade superficial	g/m^2	300
Espessura	mm	0,28
Urdidura do tamanho do fio	-	12k
Resistência à tração	MPa	4200
Deformação na ruptura	-	2,0%

Fonte: o autor.

3.1.3 Adesivo

A colagem das lâminas de madeira e do tecido de fibras de carbono para a fabricação de vigas de LVL foi realizada com uma resina de poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona (PUR), ilustrada na Figura 10. O adesivo é composto por isocianato polimérico tipo MDI (IC 200 – componente A) e por Polioli Bio (KDG1909 – componente B), fabricados pela empresa Kehl Indústria e Comércio Ltda. As especificações técnicas do adesivo, disponibilizadas pela fabricante, encontram-se na Tabela 5. O adesivo foi empregado com uma gramatura de 200 g/m^2 para a ligação entre as lâminas de madeira e 300 g/m^2 para cada lado da ligação entre o tecido de

fibras de carbono e as lâminas, conforme adotado no estudo de Percin e Uzun (2023b).

Figura 10. Adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona.



Fonte: o autor.

Tabela 5. Propriedades do adesivo de poliuretano.

Parâmetro	Poliol	Isocianato
Densidade (25 °C)	1,24 g/cm ³	1,18 g/cm ³
Viscosidade (25 °C)	1000 cPs	196 cPs
Aparência	Amarelado	Líquido marrom

Fonte: o autor.

3.2 MÉTODOS

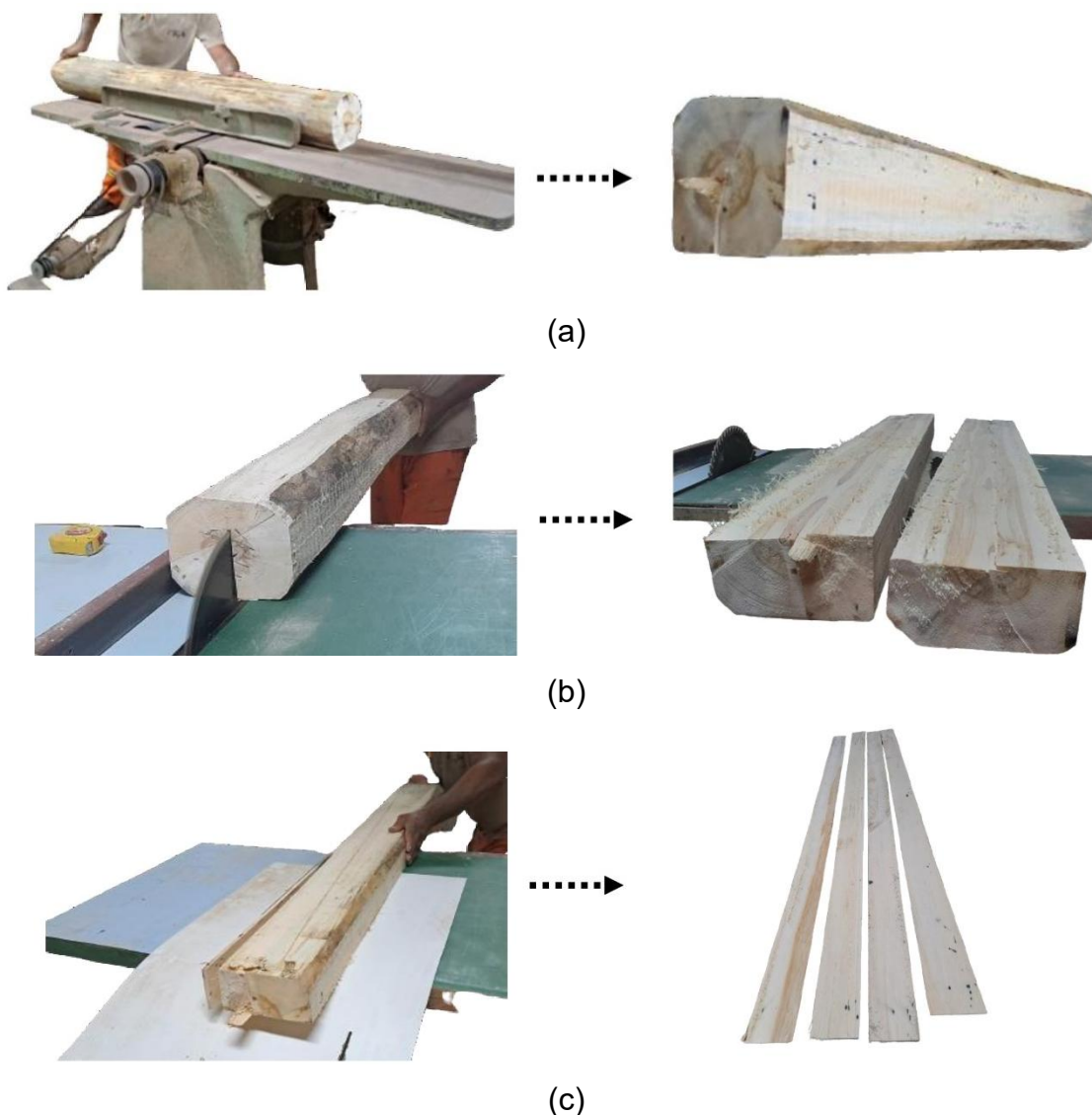
3.2.1 Beneficiamento das toras de madeira

O beneficiamento das toras de madeira foi realizado na carpintaria do Laboratório de Madeiras da UFBA (LABMAD), que dispõe de equipamentos como plaina, serra de bancada e desengrossadeira. Após o período de secagem natural das toras, iniciou-se o processo de desdobro.

A etapa inicial do desdobramento consistiu na realização de um corte transversal na metade do comprimento longitudinal de cada tora, reduzindo o comprimento de 3 m para 1,5 m. Em seguida, as peças foram encaminhadas para uma plaina para desbaste, onde suas seções transversais foram ajustadas para o formato retangular (Figura 11.a). Posteriormente, cada peça foi dividida ao meio por um corte longitudinal

(Figura 11.b). Após esse preparo, iniciou-se a confecção dos corpos de prova (CPs) para a caracterização físico-mecânica da madeira serrada e das lâminas (Figura 11.c) destinadas à produção de LVL.

Figura 11. Processo de desdobro das toras: (a) desbaste da tora para formato retangular, (b) corte longitudinal e (c) confecção das lâminas.



(c)
Fonte: o autor.

Utilizando uma serra circular, foram realizados cortes nas peças na direção tangencial, obtendo-se lâminas com espessura de 6,0 mm, largura de 70,0 mm e comprimento de 1500,0 mm. Devido ao elevado teor de umidade inicial (média de 63,70%), as lâminas foram dispostas para secagem natural em ambiente de

laboratório, conforme ilustrado na Figura 12, até atingirem aproximadamente 15% de umidade. Após o período de secagem, as lâminas foram processadas em uma desengrossadeira (Figura 13), reduzindo-se sua espessura de 6,0 mm para cerca de 3,33 mm, sendo então utilizadas na fabricação das vigas de LVL.

Figura 12. Processo de secagem ao ar das lâminas.



Fonte: o autor.

Figura 13. Processo de redução da espessura das lâminas.



Fonte: o autor.

3.2.2 Caracterização físico-mecânica da madeira serrada

Para determinar as propriedades físicas da madeira de paricá utilizada, foram realizados os ensaios de determinação de teor de umidade, densidade aparente, densidade básica e variação volumétrica. A caracterização mecânica da madeira se deu por meio da realização dos ensaios de resistência e rigidez à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Os ensaios mecânicos foram

realizados em uma máquina universal de ensaios *Instron*, com capacidade máxima de 200 kN. Para aferir os deslocamentos dos CPs durante os ensaios, foi utilizado um relógio comparador digital *Digimes*, com resolução de 0,01 mm.

Após a realização dos ensaios, os resultados de resistência e rigidez de cada corpo de prova foram corrigidos para a umidade padrão de 12%, conforme as Equações (8) e (9) presentes na NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Os valores característicos de resistência mecânica foram determinados conforme o item 4.6 da NBR 7190-3 (ABNT, 2022).

$$f_{12} = f_U \left[1 + \frac{3(U - 12)}{100} \right] \quad (8)$$

$$E_{12} = E_U \left[1 + \frac{2(U - 12)}{100} \right] \quad (9)$$

em que f e E representam, respectivamente, a resistência e a rigidez mecânica da madeira, e U é o valor médio obtido para o teor de umidade.

3.2.2.1 Ensaios das propriedades físicas

Os ensaios para determinação do teor de umidade, densidade aparente, densidade básica e variação volumétrica foram realizados com 30 CPs com dimensões de 2,0 x 3,0 x 5,0 cm³, sendo o maior comprimento orientado na direção das fibras. Foram seguidos os procedimentos descritos na norma NBR 7190-3 (ABNT, 2022).

As massas e os comprimentos das arestas de cada face dos CPs foram medidos com uma balança digital (resolução de 0,01 g) e um paquímetro digital (resolução de 0,01 mm), respectivamente. Em seguida, os CPs foram inseridos em uma estufa de secagem a uma temperatura de 103 ± 2 °C. As massas foram aferidas a cada 8 horas, até que a variação entre dois resultados consecutivos fosse inferior ou igual a 0,5%. De posse das dimensões e massas obtidas antes e após a secagem em estufa, foram determinados o teor de umidade (U) e a densidade aparente (ρ_{ap}) das amostras, conforme as Equações (10) e (11). Os equipamentos utilizados nos ensaios das propriedades físicas estão apresentados na Figura 14.

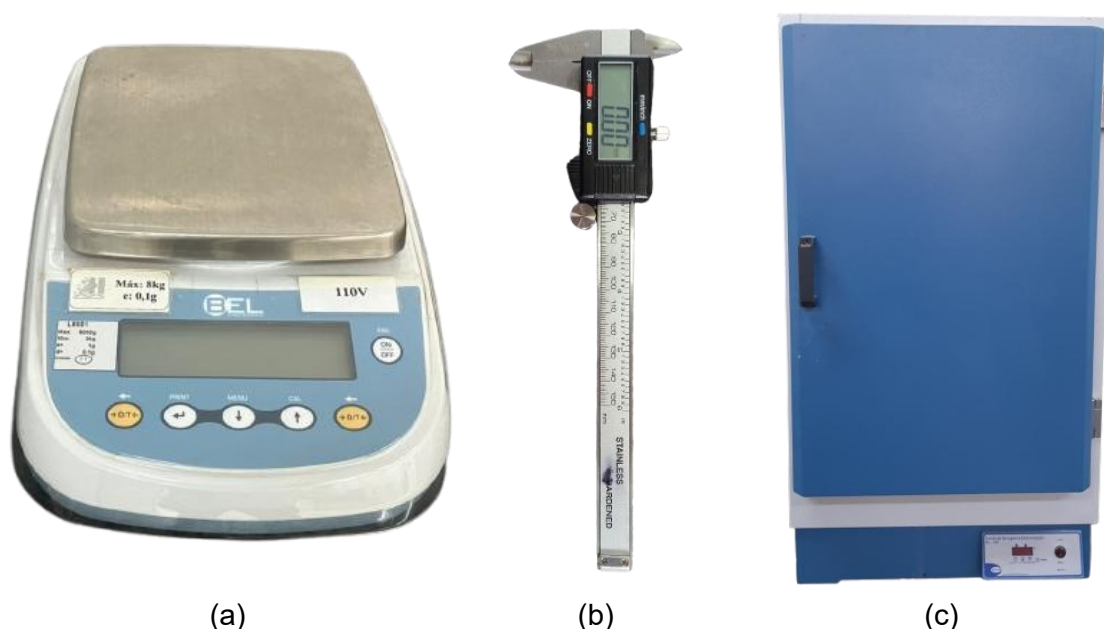
$$U = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (10)$$

onde: U é o teor de umidade, em %; m_i e m_s são, respectivamente, a massa inicial e a massa seca da amostra, em g.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{15\%}}{V_{15\%}} \quad (11)$$

em que ρ_{ap} é a densidade aparente, em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, m é a massa inicial da amostra no teor de umidade de 15%, em kg, e V é o volume da amostra no teor de umidade de 15%, em m^3 .

Figura 14. Equipamentos utilizados para a caracterização física da madeira: (a) balança digital, (b) paquímetro digital e (c) estufa de secagem.



Fonte: o autor.

Após a realização dos procedimentos descritos anteriormente, os CPs foram imersos em um recipiente com água, com o objetivo de elevar sua umidade acima do ponto de saturação das fibras. As dimensões das arestas foram medidas a cada 24 horas até que a variação entre duas leituras consecutivas fosse inferior a 0,02 mm, indicando estabilização dimensional. Com base nas dimensões obtidas nas condições seca e saturada, foi determinada a variação volumétrica da madeira de paricá, conforme a Equação (12). Além disso, foi determinada a densidade básica da madeira conforme a Equação (13).

$$\Delta V = \frac{V_{sat} - V_{seco}}{V_{sat}} \times 100 \quad (12)$$

$$\rho_{bás} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad (13)$$

em que: ΔV é a variação volumétrica, em %; V_{sat} e V_{seco} são, respectivamente, os volumes do corpo de prova na condição saturada e seca, em cm^3 ; $\rho_{bás}$ é a densidade básica, kg.m^{-3} ; m_s é a massa anidra do CP.

3.2.2.2 Ensaio de compressão paralela às fibras

A determinação das propriedades de resistência e rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de paricá foi realizada conforme a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), utilizando-se 12 corpos de prova (CPs) com dimensões de $5,0 \times 5,0 \times 15,0 \text{ cm}^3$, sendo o maior comprimento orientado na direção das fibras. A etapa inicial do ensaio consistiu na determinação da tensão máxima de ruptura de um espécime teste. Este valor foi utilizado para configurar o ciclo inicial de carga e descarga, seguido por um incremento de carga com taxa crescente de 10 MPa/min, até a ruptura do CP.

Para a medição dos deslocamentos e consequente determinação das deformações dos CPs, foram utilizados dois relógios comparadores posicionados em faces opostas, conforme ilustrado na Figura 15. Os dados de tensão e deformação foram utilizados para determinar a resistência (f_{c0}) e o módulo de elasticidade (E_{c0}) à compressão paralela às fibras do lote de madeira conforme as Equações (14) e (15), respectivamente.

$$f_{c0} = \frac{F_{c0,max}}{A} \quad (14)$$

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (15)$$

em que: $F_{c0,max}$ é a máxima força aplicada durante o ensaio, em N; A é a área inicial da seção transversal do CP, mm^2 ; $\sigma_{50\%}$ e $\sigma_{10\%}$ são as tensões em 50% e 10% da tensão de ruptura, em MPa; $\varepsilon_{50\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$ são as deformações longitudinais específicas do CP registradas nas tensões em 50% e 10% da tensão de ruptura.

Figura 15. Configuração do ensaio de compressão paralela às fibras.

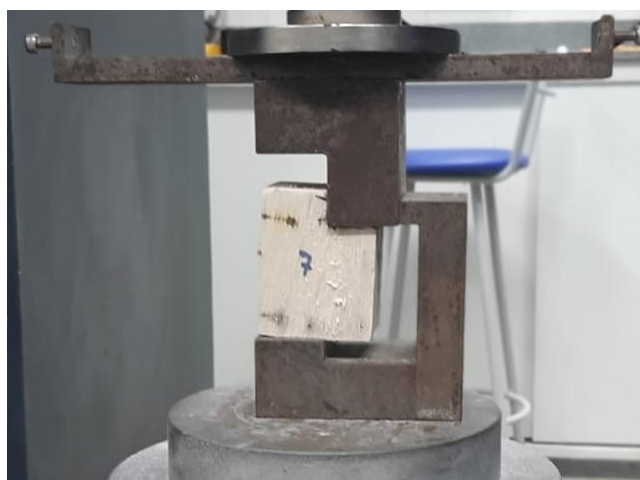


Fonte: o autor.

3.2.2.3 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foi avaliada segundo a norma NBR 7190-3 (ABNT, 2022), utilizando 12 CPs de dimensões iguais a 5,0 x 5,0 x 6,4 cm³. Com o CP posicionado no aparato de ensaio (Figura 16), foi aplicada uma taxa de carregamento crescente de 2,5 MPa/min até a sua ruptura. A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras do lote foi determinada conforme a Equação (16).

Figura 16. Configuração do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.



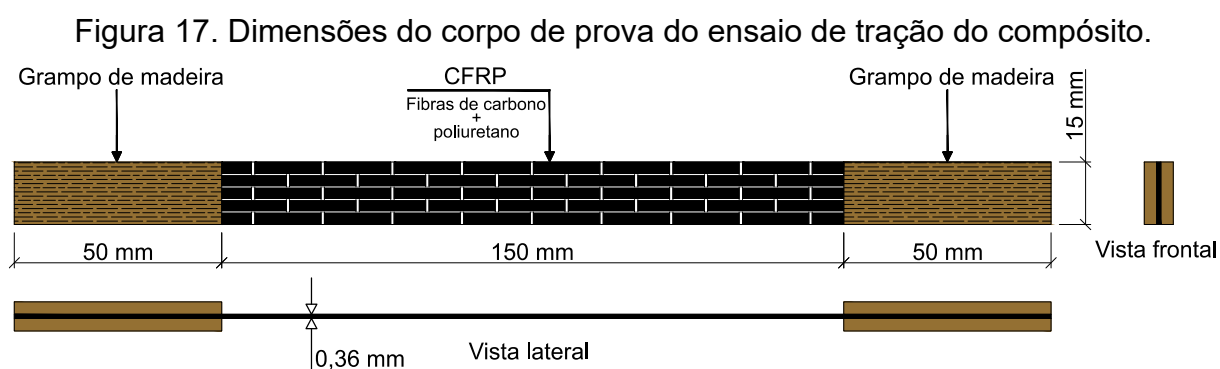
Fonte: o autor.

$$f_{vo} = \frac{F_{v0,máx}}{A_{v0}} \quad (16)$$

em que: f_{vo} é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, em MPa; $F_{vo,máx}$ é máxima força aplicada durante o ensaio, em N; A_{vo} é a área da seção crítica do CP, em mm².

3.2.3 Caracterização mecânica do CFRP

Para determinar o módulo de elasticidade do compósito formado pelo tecido de fibras de carbono e o adesivo de poliuretano, necessário para a utilização do método teórico da seção transformada (ver item 3.2.1.2), foi realizado o ensaio de tração do compósito, seguindo os critérios metodológicos estabelecidos pela norma D 3039 (ASTM, 2014). Foram utilizados 5 CPs, com comprimento longitudinal de 250 mm (na direção das fibras), largura de 15 mm e espessura de 0,36 mm (Figura 17).



Fonte: o autor.

A confecção dos CPs teve início com o corte do tecido de fibras de carbono nas dimensões especificadas, seguido da aplicação da matriz adesiva com gramatura de 300 g/m² em ambas as faces do tecido. Após esse processo, os CPs foram armazenados em laboratório por, no mínimo, 7 dias, a fim de garantir a cura completa do adesivo antes da realização do ensaio.

O ensaio foi realizado em uma Máquina de Teste Universal Zwick 1445, com capacidade máxima de 10 kN, equipada com garras apropriadas para ensaios de tração. Para aumentar o atrito com as garras e evitar concentrações de tensão, foram colados grampos de madeira nas extremidades dos CPs (Figura 17). Com o CP posicionado no aparato de ensaio (Figura 18), foi aplicada uma taxa constante de deslocamento de 2 mm/min, conforme recomendado pela D 3039 (ASTM, 2014). Com

o auxílio de um transdutor de deslocamento linear (LVDT), foram aferidos os deslocamentos resultantes da aplicação de cargas nos CPs.

Figura 18. Ensaio de tração do CFRP.



Fonte: o autor.

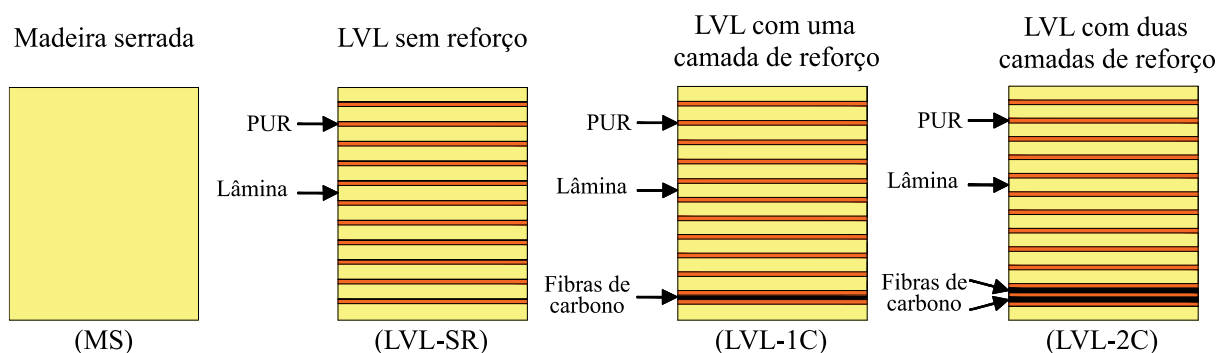
O módulo de elasticidade do compósito foi determinado através da Equação (17), utilizando-se as tensões referentes aos pontos de 40% e 10% ($\sigma_{40\%}$ e $\sigma_{10\%}$) da tensão de ruptura e as suas respectivas deformações ($\varepsilon_{40\%}$ e $\varepsilon_{10\%}$).

$$E_{FRP} = \frac{\sigma_{40\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{40\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (17)$$

3.2.4 Produção das vigas

Com o objetivo de avaliar a influência do reforço com tecido de fibras de carbono nas propriedades mecânicas de elementos de paricá submetidos à flexão, foram produzidos quatro tipos de vigas: (1) vigas de madeira serrada de paricá (MS); (2) vigas de LVL sem a presença do reforço (LVL-SR); (3) vigas de LVL reforçadas com uma camada de tecido de fibras de carbono (LVL-1C); e (4) vigas de LVL reforçadas com duas camadas de tecido de fibras de carbono (LVL-2C). Os índices de reforço das séries LVL-1C e LVL-2C, obtidos pela razão entre a área de reforço e a área total da seção transversal, foram de 0,9% e 1,8%, respectivamente. Na Figura 19 está ilustrado a seção transversal das séries produzidas.

Figura 19. Configurações das vigas produzidas.



Fonte: o autor.

Para cada tipo de viga, foram produzidos 12 CPs. As lâminas produzidas foram submetidas a uma inspeção visual, com o objetivo de excluir aquelas que apresentavam defeitos, tais como medula e fissuras. As vigas de LVL foram confeccionadas com 12 lâminas, selecionadas aleatoriamente, com espessura média de 3,33 mm cada, coladas paralelamente entre si. Nas séries reforçadas, o tecido de fibras de carbono foi inserido entre a última e a penúltima lâmina da face inferior da viga, região submetida a esforços normais de tração sob flexão. As etapas do processo de confecção dessas vigas são descritas a seguir:

- a) limpeza das superfícies das lâminas com auxílio de pincel, visando à remoção de pó de madeira e/ou outros contaminantes (Figura 20);

Figura 20. Limpeza da superfície das lâminas.



Fonte: o autor.

- b) preparação do adesivo poliuretano na proporção de 1:2 (uma parte do componente A para duas partes do componente B, em massa) (Figura 21);

Figura 21. Preparação do adesivo.



Fonte: o autor.

- c) aplicação do adesivo sobre a superfície das lâminas com auxílio de seringa, respeitando uma gramatura de aproximadamente 200 g/m² (Figura 22);

Figura 22. Aplicação do adesivo sobre as lâminas.



Fonte: o autor.

- d) dispersão do adesivo sobre a superfície das lâminas com auxílio de pincel (Figura 23);

Figura 23. Dispersão do adesivo.



Fonte: o autor.

- e) sobreposição de uma lâmina sobre a outra, mantendo sua orientação paralela (Figura 24);

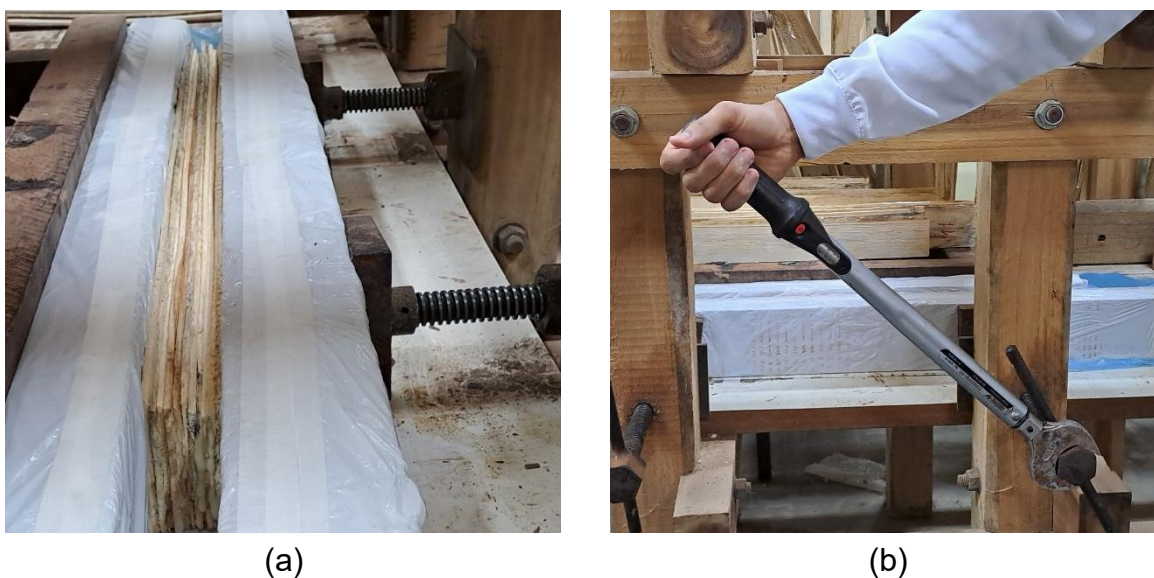
Figura 24. Sobreposição das lâminas.



Fonte: o autor.

- f) aplicação e dispersão do adesivo, como realizado nos itens c) e d), sobre as superfícies das lâminas;
- g) prensagem das lâminas em prensa manual disponível no LABMAD-UFBA (Figura 25.a), sob uma pressão de aproximadamente 0,7 MPa por um período de 24 horas. O aperto dos parafusos foi realizado por meio de um torquímetro (Figura 25.b);

Figura 25. Processo de prensagem do LVL: (a) configuração da prensagem e (b) aplicação do torque.



Fonte: o autor.

- h) recorte do tecido de fibras de carbono nas dimensões necessárias para o reforço;
- i) preparação do adesivo para colagem do tecido de fibras de carbono sobre a superfície da lâmina de madeira;
- j) aplicação e dispersão do adesivo sobre a superfície da lâmina de madeira (Figura 26), com gramatura de aproximadamente 300 g/m², conforme adotado por Coelho *et al.* (2017) e Percin e Uzun (2023b);

Figura 26. Aplicação do adesivo sobre a superfície da lâmina adjacente ao reforço.



Fonte: o autor.

- k) posicionamento da camada do tecido de fibras de carbono unidirecional sobre a superfície com adesivo (Figura 27), mantendo a direção das fibras alinhada à das lâminas de madeira;

Figura 27. Aplicação da camada de reforço.



Fonte: o autor.

- l) eliminação de possíveis bolhas de ar presentes entre o adesivo e o tecido de fibras de carbono por meio de rolete tira bolhas (Figura 28);

Figura 28. Eliminação de bolhas de ar.



Fonte: o autor.

- m) aplicação da última lâmina, com sua superfície previamente adesivada, sobre o tecido de fibras de carbono (Figura 29);

Figura 29. Aplicação da última lâmina de madeira.



Fonte: o autor.

- n) prensagem da viga sob uma pressão de 0,7 MPa, durante 24 horas.

Após o período de prensagem, as vigas foram armazenadas por, no mínimo, sete dias para a cura completa dos adesivos. Em seguida, foram aparelhadas até atingirem as dimensões finais de 40 mm de espessura (na direção perpendicular ao plano das lâminas), em conformidade com a espessura mínima de 38 mm

estabelecida pela norma EN 14374 (CEN, 2004) para elementos de LVL, além de 30 mm de largura e 720 mm de comprimento (na direção longitudinal).

3.2.1 Ensaio à flexão

Todas as vigas de LVL, reforçadas ou não, bem como vigas de madeira serrada de paricá, foram submetidas a ensaios de flexão em quatro pontos, seguindo os critérios metodológicos estabelecidos pela norma EN 408 (CEN, 2012). Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios *Instron*, equipada com célula de carga de capacidade máxima de 200 kN (Figura 30.a).

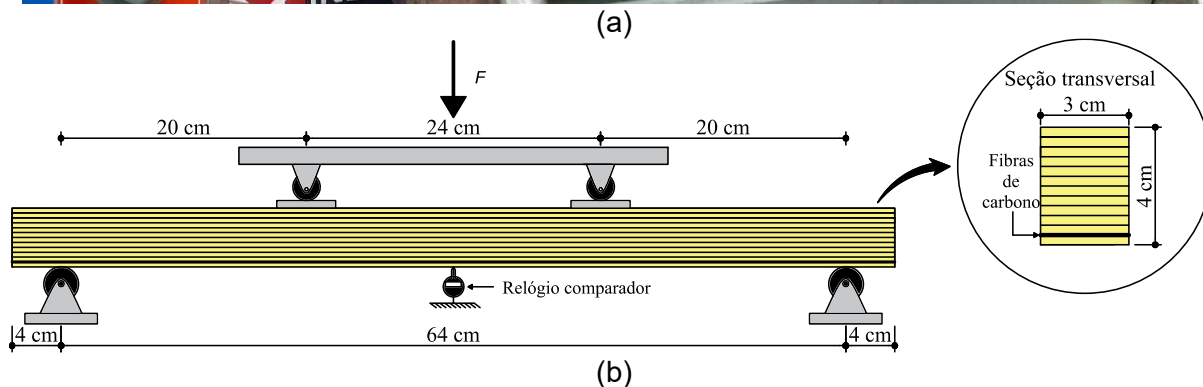
Como ilustrado na Figura 30.b, o ensaio foi realizado com uma distância entre os apoios (vão) de 64 cm, equivalente a 16 vezes a altura da viga. A distância entre os pontos de aplicação da força foi de 24 cm, correspondente a 6 vezes a altura da viga. Para evitar concentrações de tensões, foram utilizadas chapas de aço no local de aplicação da carga. A força (F) foi aplicada a uma taxa constante de deslocamento da célula de carga de 4 mm/s até a ruptura do corpo de prova, de modo que o ensaio tivesse duração mínima de 3 minutos, conforme estabelecido pela referida norma. No caso da série LVL-2C, o ensaio foi encerrado quando ocorreu a ruptura do corpo de prova ou quando o deslocamento no centro do vão atingiu 45 mm, em razão da limitação da altura do aparato utilizado no ensaio dessa série. Para registrar o deslocamento global de cada CP durante os ensaios, foi utilizado um relógio comparador posicionado no meio do vão.

Os dados de força e deslocamento obtidos durante os ensaios foram utilizados para a construção de gráficos de força *versus* deslocamento, possibilitando a análise do desempenho mecânico das vigas. Com o objetivo de avaliar a influência do reforço nos modos de ruptura, as falhas dos CPs foram observadas e registradas por meio de fotografias, permitindo a comparação entre as séries.

Os valores máximos de força obtidos nos ensaios foram utilizados no cálculo do momento fletor máximo de cada CP, conforme a Equação (18), em que M é o momento fletor máximo, $F_{m\acute{a}x}$ é a força máxima aplicada e a é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo (igual a 20 cm para a configuração de ensaio proposto).

$$M = a \cdot \frac{F_{m\acute{a}x}}{2} \quad (18)$$

Figura 30. Configuração do ensaio de flexão: (a) realização do ensaio e (b) dimensões do ensaio.



Fonte: o autor.

O incremento do deslocamento medido no ponto central da face tracionada da viga, juntamente com o incremento da força aplicada, foi utilizado para o cálculo da rigidez global dos espécimes, conforme a Equação (19), adotada nos estudos de Soriano, Pellis e Mascia (2016), Brunetti *et al.* (2019) e Nadir *et al.* (2016).

$$EI_{global} = \frac{(3aL^2 - 4a^3)}{48} \cdot \frac{(F_{40\%} - F_{10\%})}{(\delta_{40\%} - \delta_{10\%})} \quad (19)$$

sendo $F_{40\%}$ e $F_{10\%}$ as forças correspondentes a 40% e 10% da força máxima, respectivamente; $\delta_{40\%}$ e $\delta_{10\%}$ os valores de deslocamento registrados nas forças equivalentes a 40% e 10% da força máxima, L é o comprimento do vão e a é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo.

Para avaliar a influência do reforço na ductilidade das vigas, foram empregadas as Equações (3) e (4), apresentadas na página 34 deste trabalho. A coordenada

referente ao ponto de escoamento no plano cartesiano de cada diagrama de força-deslocamento, necessária para o cálculo dos índices de ductilidade dos CPs, foram determinadas por meio do método EEEP, descrito no item 2.4.1.2. Para esse método, o deslocamento último foi definido como o menor valor entre o deslocamento correspondente a 80% da força máxima pós-pico e o deslocamento de 45 mm.

Adicionalmente, foram determinados a resistência (f_M) e o módulo de elasticidade à flexão (E_M) das vigas de LVL não reforçadas, conforme as Equações (20) e (21), respectivamente. Esses valores foram utilizados nas análises teóricas descritas a seguir, empregadas para estimar as propriedades mecânicas das vigas reforçadas.

$$f_M = \frac{M \cdot c}{I} \quad (20)$$

$$E_M = \frac{(3aL^2 - 4a^3) \cdot (F_{40\%} - F_{10\%})}{48 \cdot I \cdot (\delta_{40\%} - \delta_{10\%})} \quad (21)$$

sendo M o momento fletor referente à força máxima resistida; c a distância entre a linha neutra e a extremidade da seção transversal da viga; I o momento de inércia da seção transversal em relação à linha neutra; $F_{40\%}$ e $F_{10\%}$ as forças correspondentes a 40% e 10% da força máxima, respectivamente; $\delta_{40\%}$ e $\delta_{10\%}$ os valores de deslocamento registrados nas forças equivalentes a 40% e 10% da força máxima; L o comprimento do vão e a é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio mais próximo.

3.2.1.1 Análise estatística

Os resultados obtidos no ensaio de flexão foram submetidos a tratamento estatístico por meio de análise descritiva e análise inferencial. A análise inferencial foi conduzida com o objetivo de avaliar a influência do reforço com tecido de fibras de carbono nas propriedades estudadas, comparando-se as médias das diferentes séries. Inicialmente, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados. Em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA), ao nível de significância de 5%, para cada propriedade avaliada, nomeadamente momento fletor máximo, rigidez global e ductilidade, a fim de verificar a existência de diferenças significativas entre os grupos. Quando identificada uma diferença significativa em pelo menos um dos grupos, procedeu-se à aplicação do teste de comparações múltiplas

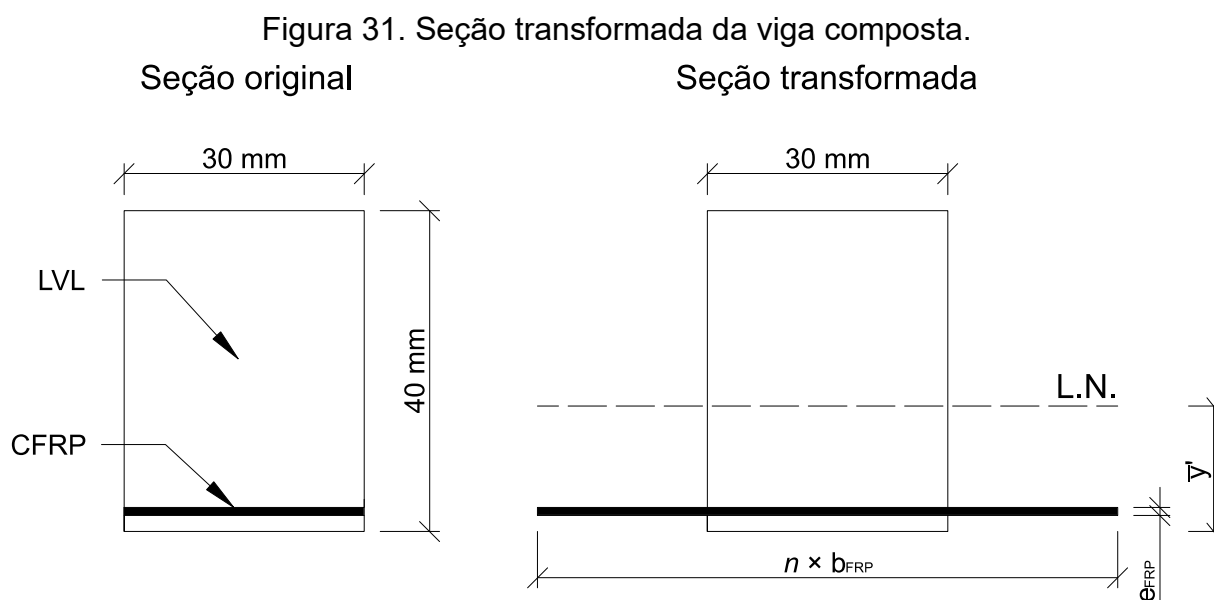
de Tukey, ao nível de significância de 5%, com o objetivo de identificar quais pares de médias diferiam significativamente entre si.

3.2.1.2 Análise analítica

O método analítico da seção transformada foi empregado neste estudo com o objetivo de estimar o momento fletor máximo resistente das vigas reforçadas. Nesse método, a seção transversal das vigas reforçadas foi homogeneizada por meio da conversão da área da fibra de carbono em uma área equivalente de madeira, conforme ilustrado na Figura 31. Esta conversão foi realizada multiplicando-se a largura do tecido de fibras de carbono (b_{FRP}) pelo fator de transformação n , determinado por meio da Equação (22).

$$n = \frac{E_{FRP}}{E_{LVL}} \quad (22)$$

onde E_{FRP} é módulo de elasticidade à tração do compósito reforçado com fibra de carbono; E_{LVL} é módulo de elasticidade à flexão da viga LVL não reforçada.



Fonte: o autor.

Após a homogeneização da seção transversal da viga, foram determinados a altura da linha neutra e o momento de inércia equivalente da seção transformada por meio das Equações (7) e (6), respectivamente. De posse dessas propriedades

geométricas e da resistência média à flexão do LVL sem reforço, foi possível calcular o momento fletor teórico por meio da Equação (5), bem como determinar a rigidez global teórica dos elementos reforçados a partir do produto entre o momento de inércia equivalente e o módulo de elasticidade do LVL (E_{LVL}). O detalhamento do cálculo realizado para determinação do momento fletor teórico está apresentado no Apêndice A.

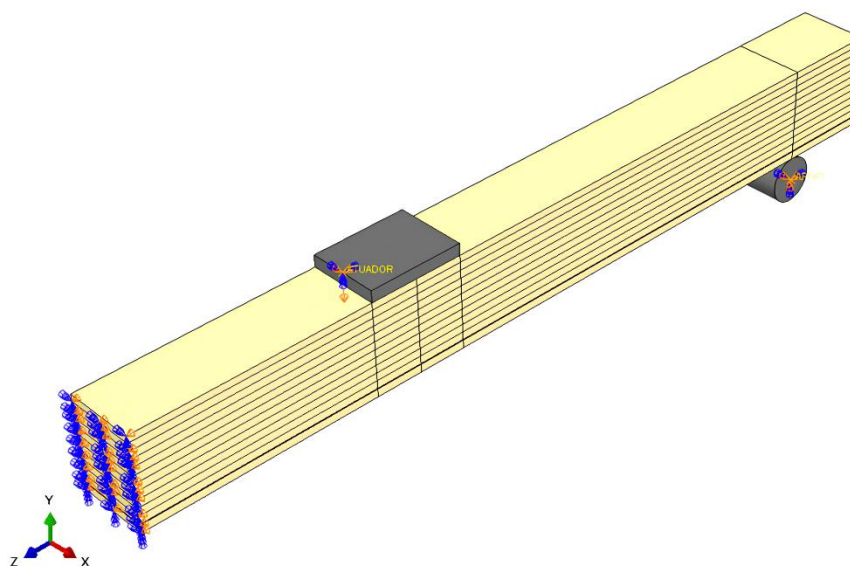
Os valores de momento fletor máximo e de rigidez global estimados por meio do método supracitado foram comparados com os observados nos ensaios experimentais. A eficiência do método teórico foi determinada por meio da razão entre os valores experimentais e teóricos.

3.2.1.3 Análise numérica

Além do método analítico, foi conduzida uma análise numérica utilizando o método dos elementos finitos, visando à estimativa do momento fletor máximo e da rigidez global das séries de LVL consideradas neste estudo. Para isso, foram desenvolvidos modelos tridimensionais utilizando o *software* SIMULIA Abaqus (Dassault Systèmes, 2020).

Devido à simetria da configuração de ensaio à flexão, apenas metade da viga foi considerada no modelo (Figura 32), enquanto as partes omitidas foram representadas por restrições de simetria apropriadas, reduzindo o esforço computacional de processamento. No modelo, o LVL foi definido com a sobreposição de 12 lâminas de 3,33 mm de espessura cada, sendo a(s) camada(s) de CFRP de 0,36 mm de espessura, no caso das vigas reforçadas, posicionado entre a penúltima e a última lâmina, conforme adotado na campanha experimental. O apoio foi representado por um cilindro de diâmetro igual a 20 mm, enquanto a chapa do ponto de aplicação da carga foi definida como um paralelepípedo com dimensões de 30 mm × 40 mm × 5 mm (largura, comprimento e espessura). As partes correspondentes à madeira e ao CFRP foram modeladas como elementos sólidos 3D deformáveis, enquanto o apoio e a chapa foram definidos como elementos do tipo casca (*shell*) 3D não deformáveis (*discrete rigid*).

Figura 32. Modelo tridimensional do LVL reforçado com uma camada de CFRP.



Fonte: o autor.

As camadas correspondentes ao adesivo não foram consideradas no modelo numérico deste estudo, sendo as propriedades de interação entre as lâminas de madeira, bem como entre as lâminas e o CFRP, assumidas como perfeitamente aderida, ou seja, sem deslizamento relativo, por meio da utilização da opção “*tie*” disponível no *software* Abaqus. Para a interação entre a madeira, o apoio e a chapa do atuador, foi adotado um coeficiente de atrito igual a 0,4, conforme empregado no estudo de Fernandes (2018).

Com o objetivo de distinguir o comportamento mecânico da madeira quando solicitada à tração e à compressão paralelas às fibras, foram adotados dois modelos constitutivos para esse material, conforme realizado em estudos da literatura (Glišović *et al.*, 2017; Kawecki; Podgórski, 2020a). Para as seis lâminas localizadas na parte superior da viga, pressupondo-se a atuação de esforços de compressão paralela às fibras nesses elementos quando a viga está submetida à flexão, foi adotado um modelo constitutivo ortotrópico com comportamento bilinear elástico–perfeitamente plástico (Figura 33), considerando-se comportamento similar nas direções radial e tangencial, conforme empregado em estudos da literatura (Szczecina, 2023; Mercimek, 2024). A resistência média à compressão paralela às fibras (f_{co}), obtida na caracterização mecânica da madeira serrada, foi adotada como sendo a tensão de

escoamento no modelo constitutivo utilizado. Para esse modelo, o critério de Hill para materiais ortotrópicos foi utilizado como condição para a transição do estado elástico para o estado plástico. As relações entre as tensões normais de plastificação nas diferentes direções, bem como as tensões de cisalhamentos nos diferentes planos, necessárias para o emprego do critério, foram adotadas conforme o estudo de Christoforo *et al.* (2022), sendo os valores dos coeficientes apresentados na Tabela 6.

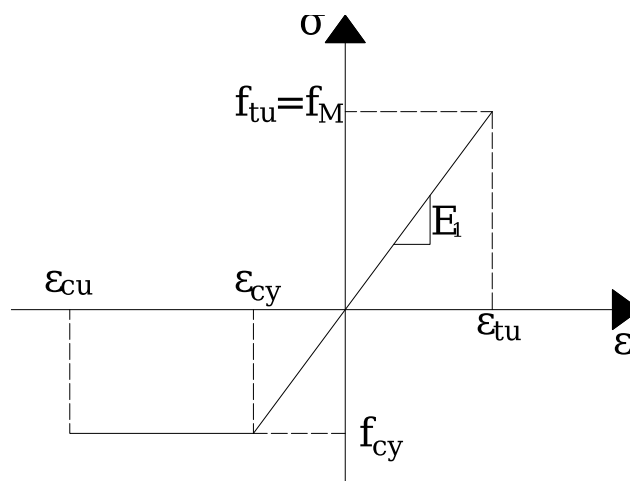
Tabela 6. Coeficientes de plasticidade para o critério de Hill.

R_{zz}	R_{xx}	R_y	R_{zx}	R_{zy}	R_{xy}
1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,025

Fonte: Adaptado de Christoforo *et al.* (2022).

Para as demais lâminas, foi adotado um modelo constitutivo ortotrópico com comportamento linear-elástico até a tensão de ruptura por tração (f_{t0}), a qual foi considerada igual à resistência média à flexão (f_M) da série de LVL não reforçada (Figura 33), devido a impossibilidade de realização de ensaios de tração paralela às fibras da madeira, conforme recomendação da NBR 7190-3 (ABNT, 2022). Para o módulo de elasticidade longitudinal (E_z), foi adotado o valor médio obtido no ensaio de flexão das vigas de LVL sem reforço.

Figura 33. Modelo constitutivo adotado para a madeira.



Fonte: o autor.

Para a aplicação do modelo ortotrópico, foi necessário definir as constantes elásticas da madeira, nomeadamente o módulo de elasticidade, o módulo de elasticidade transversal, e o coeficiente de Poisson nas direções longitudinal, radial e tangencial. Os valores dos módulos de elasticidade foram estimados por meio das Equações (23) e (24), presentes na NBR 7190-1 (2022), que relacionam o módulo de elasticidade longitudinal (E_z) aos demais módulos de elasticidade. As relações entre os coeficientes de Poisson, apresentadas nas Equações (25) e (26), foram obtidas do estudo de Molina e Calil Junior (2009).

$$E_x = E_y = \frac{E_z}{20} \quad (23)$$

$$G_{zx} = G_{zy} = G_{xy} = \frac{E_z}{16} \quad (24)$$

$$v_{zx} = v_{zy} = 0,013 \quad (25)$$

$$v_{xy} = 0,23 \quad (26)$$

em que E_z , E_x e E_y representam os módulos de elasticidade nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente; G_{zx} , G_{zy} e G_{xy} são os módulos de elasticidade transversal nos planos z-x, z-y e x-y, respectivamente; e v_{12} , v_{13} e v_{23} representam os coeficientes de Poisson nos planos z-x, z-y e x-y, respectivamente.

No caso das vigas reforçadas, o compósito CFRP foi modelado como um material anisotrópico com comportamento linear-elástico e isotropia transversal, conforme adotado por Glišović *et al.* (2017). A resistência à tração e o módulo de elasticidade longitudinal (E_z) do reforço foram determinados por meio do ensaio de tração descrito no item 3.2.3, enquanto as demais constantes elásticas foram obtidas do estudo de İşleyen *et al.* (2023). As propriedades elásticas adotadas para a madeira e para o CFRP estão apresentadas na Tabela 7.

Para a malha de elementos finitos das partes correspondentes à madeira e ao CFRP, foram adotados elementos hexaédricos do tipo C3D8R (elemento sólido linear de 8 nós, com integração reduzida e controle de distorção), com tamanho de malha de 4 mm para a madeira e de 2 mm para o CFRP (Figura 34). O apoio foi modelado com elementos triangulares R3D3 (faceta triangular rígida tridimensional com 3 nós) de 3 mm, enquanto a chapa foi modelada com elementos quadriláteros R3D4

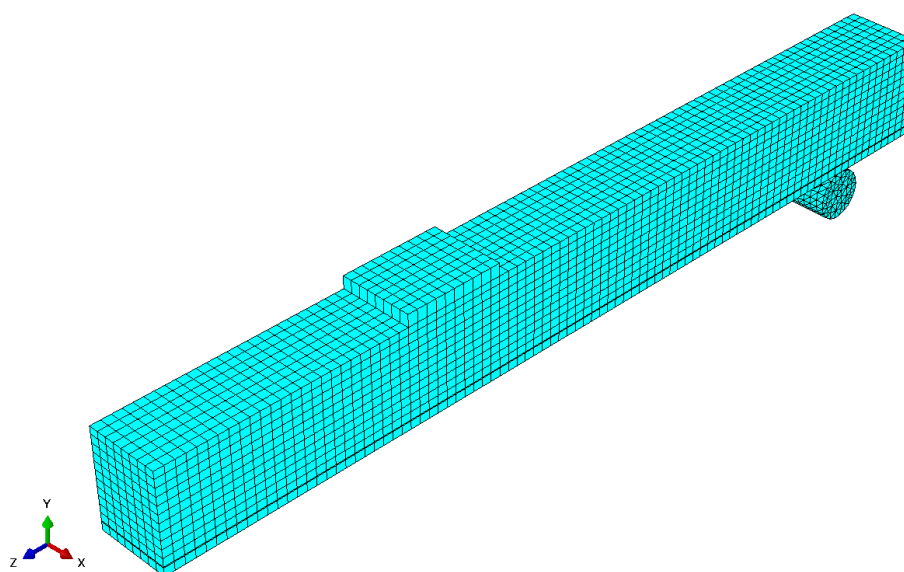
(quadrilátero rígido bilinear tridimensional com 4 nós), com tamanho de malha de 4 mm.

Tabela 7. Propriedades elásticas adotadas no modelo numérico.

Propriedades	Madeira	CFRP
Módulo de elasticidade E (MPa)		
E_z	6061,80	50661
E_x	303,09	10000
E_y	303,09	10000
Módulo de elasticidade Transversal G (MPa)		
G_{zx}	378,86	5000
G_{zy}	378,86	5000
G_{xy}	378,86	1000
Coeficiente de Poisson ν (-)		
ν_{zx}	0,013	0,3
ν_{zy}	0,013	0,3
ν_{xy}	0,23	0,03

Fonte: o autor.

Figura 34. Malha de elementos finitos adotada para o modelo.



Fonte: o autor.

O processo de convergência foi conduzido por meio de um esquema automático de incrementos de deslocamento, adotando-se um número máximo de 10^4 incrementos, com valor inicial de 0,01, incremento máximo de 0,1 e incremento mínimo de 10^{-15} . Tais incrementos de deslocamento foram aplicados na chapa do ponto de aplicação da carga, com limite máximo de 30 mm. Para a análise, foi considerado os efeitos da não linearidade geométrica dos elementos. Para fins de avaliação da capacidade resistente, considerou-se como força de ruptura aquela correspondente ao instante em que a lâmina situada na parte inferior da viga atingiu a tensão máxima de tração, adotada como critério de falha nos modelos numéricos.

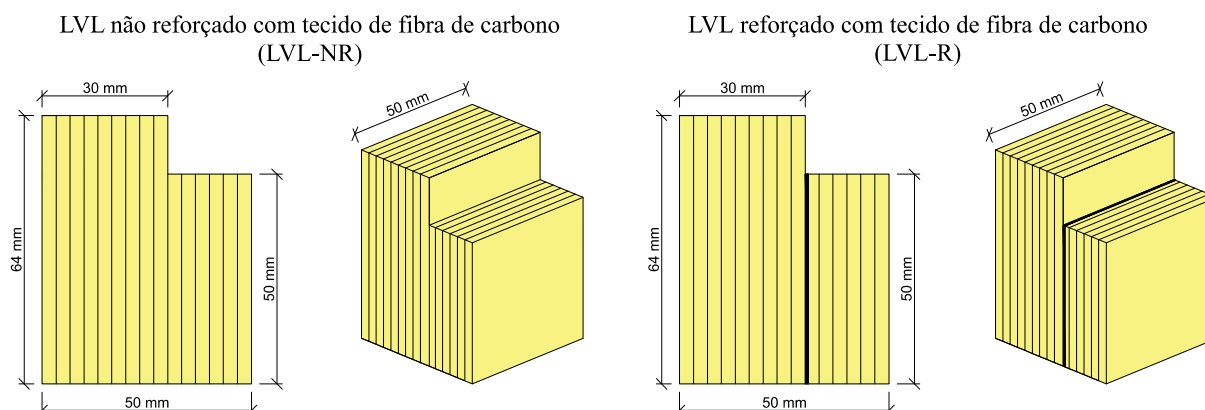
Para a construção dos diagramas de força-deslocamento dos modelos numéricos, foram registrados, ao longo dos incrementos de deslocamento, a força de reação no apoio e o deslocamento do ponto localizado na extremidade inferior da seção transversal, na metade do vão da viga. Em seguida, foram determinados o momento fletor máximo e a rigidez global de cada modelo numérico, por meio das Equações (18) e (19), respectivamente. A eficiência do método numérico foi determinada por meio da razão entre os valores experimentais e simulados.

3.2.2 Ensaio de cisalhamento na linha de cola

Para avaliar a qualidade da aderência proporcionada pelo adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, tanto entre o tecido de fibras de carbono e as lâminas de madeira quanto entre as próprias lâminas, foram realizados ensaios de cisalhamento na linha de cola em elementos de LVL. Foram produzidos dois tipos de CPs, ambos compostos por 15 lâminas de madeira de paricá coladas com poliuretano à base de óleo de mamona, diferindo pela presença das fibras de carbono na área crítica de cisalhamento, conforme apresentado na Figura 35.

Os ensaios foram realizados de acordo com as diretrizes da NBR 7190-3 (ABNT, 2022), utilizando-se 10 CPs por série. Para a execução dos ensaios, foi empregada uma máquina universal de ensaio Instron, com capacidade máxima de 200 kN, e aplicada uma taxa de 2,5 MPa/min. A resistência ao cisalhamento na linha de cola de cada CP foi determinada por meio da razão entre a forma máxima resistida e a área crítica cisalhada, conforme a Equação (16).

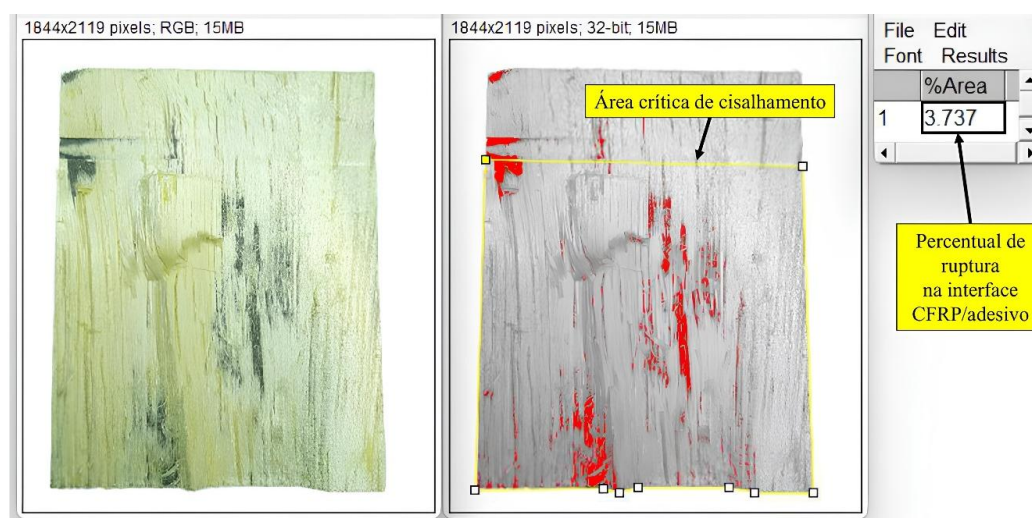
Figura 35. Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: o autor.

Objetivando avaliar a influência do tecido de fibra de carbono na qualidade da aderência, os resultados de resistência ao cisalhamento na linha de cola das duas séries foram comparados por meio do teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. Além da resistência mecânica, o local de ruptura (na madeira, no adesivo ou no tecido de fibras de carbono) foi utilizado como parâmetro de comparação entre as duas séries. Com o auxílio do *software ImageJ* (Figura 36), foram realizadas aferições do percentual de ruptura na madeira em relação a área total de cisalhamento.

Figura 36. Procedimento para obtenção do percentual de ruptura nos CPs cisalhados.



Fonte: o autor.

Conforme apresentado na Figura 36, que ilustra um exemplar rompido da série LVL-R, foi possível determinar, por meio de ferramentas do *software*, o percentual de ruptura na área correspondente à interface entre a madeira e o CFRP/adesivo. Subtraindo-se esse valor do percentual total da área crítica de cisalhamento (100%), determinou-se o percentual de ruptura na madeira. Como exemplo, o valor obtido no *software*, apresentado na Figura 36 (3,737%), corresponde a um percentual de ruptura na madeira de 96,263%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no programa experimental, organizados em quatro partes. A primeira corresponde à caracterização físico-mecânica da madeira serrada de paricá. Em seguida, são apresentados os resultados da caracterização do CFRP. Na sequência, são apresentados os resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos realizados nos diferentes tipos de vigas produzidas, bem como das análises analítica e numérica. Por fim, são apresentados os resultados referentes ao ensaio de cisalhamento na linha de cola.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DA MADEIRA SERRADA

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização físico-mecânica da madeira de paricá estão apresentados na Tabela 8. Os valores correspondentes a cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice B. O teor de umidade médio encontrado foi de 14,92%, valor compatível com a classe de umidade 2, conforme a NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Esse resultado indica que o lote de madeira utilizado nos ensaios estava em equilíbrio higroscópico com o ambiente, cuja umidade relativa do ar, durante o período de estocagem, foi de aproximadamente 75% (INMET, 2025).

Tabela 8. Resultados da caracterização físico-mecânica da madeira serrada.

	U (%)	ρ_{ap} (kg/m ³)	$\rho_{bás}$ (kg/m ³)	ΔV (%)	f_{v0} (MPa)	Compressão paralela às fibras (MPa)	
						f_{c0}	E_{c0}
Máximo	15,22	380,40	325,61	9,54	6,50	22,96	11512
Média	14,92	270,37	228,60	6,78	4,24	17,75	9166
Mínimo	14,56	202,33	173,98	4,41	2,94	14,71	5830
D.P	0,15	49,88	39,51	1,25	1,25	2,67	1858
C.V (%)	0,99	18,45	17,28	18,46	29,48	15,04	20,28
Média*	-	-	-	-	4,62	19,31	9701
f_k^*	-	-	-	-	3,44	16,44	-

NOTA: * Valor corrigido para o teor de umidade padrão de 12%; U = teor de umidade; ρ_{ap} = densidade aparente; $\rho_{bás}$ = densidade básica; ΔV = variação volumétrica; f_{v0} = resistência ao cisalhamento paralelo às fibras; f_{c0} e E_{c0} = resistência e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras, respectivamente; D.P = desvio padrão; C.V = coeficiente de variação; f_k = valor característico.

Fonte: o autor.

Para as propriedades de densidade aparente e densidade básica da madeira de paricá, foram encontrados valores médios de 270,37 kg/m³ e 228,60 kg/m³, respectivamente. Esses resultados classificam a madeira analisada como de baixa densidade, conforme a NBR 7190-1 (ABNT, 2022), corroborando as afirmações de Melo e Del Menezzi (2014), que descrevem o paricá como uma madeira clara e de baixa densidade, com valores inferiores a 400 kg/m³. Comparando-se com dados da literatura, o valor médio de densidade aparente encontrado é semelhante ao reportado por Lima *et al.* (2022), que obtiveram 275,57 kg/m³ para madeira de paricá com 5 anos de idade.

Quanto à variação volumétrica, os resultados obtidos variaram de 4,41% a 9,54%, com valor médio de 6,78%. Esses resultados são semelhantes aos reportados na literatura, como os de Mascarenhas (2015), que obteve 5,36%; Macedo *et al.* (2012), com 7,80%; e Jesus (2004), que encontrou 7,11%. Conforme destacado por Lima *et al.* (2022b) e Vidaurre *et al.* (2018), a madeira de paricá apresenta estabilidade dimensional considerada normal e coeficiente anisotrópico inferior aos normalmente observados em madeiras do gênero *Eucalyptus*, o que resulta em menor ocorrência de defeitos após a secagem, sendo essa uma característica favorável à produção de laminados.

Considerando a umidade padrão de 12%, a madeira de paricá analisada neste estudo apresentou resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras de 4,62 MPa e resistência característica de 3,44 MPa. Comparando-se com dados da literatura, o valor médio encontrado é aproximadamente 69,85% superior ao obtido por Terezo *et al.* (2015), que reportaram 2,72 MPa para madeira de paricá com 6 anos de idade, e 17,20% inferior ao observado por Modes *et al.* (2020), que obtiveram 5,58 MPa para madeira de paricá com 14 anos de idade.

No ensaio de compressão paralela às fibras, foram obtidos valores médio e característico de resistência de 17,75 MPa e 16,44 MPa, respectivamente. Para o módulo de elasticidade, foi encontrado valor médio de 9166 MPa. O valor característico obtido foi inferior ao valor de referência da classe de resistência D20, estabelecido na norma NBR 7190-1 (ABNT, 2022), que atribui 20 MPa a essa propriedade mecânica.

No estudo de Cavalheiro *et al.* (2016), que realizou a caracterização físico-mecânica da madeira de paricá com 12 anos de idade, foi encontrado um valor

característico de 20 MPa para essa propriedade. De modo semelhante, Almeida *et al.* (2013) encontraram 21,00 MPa para a resistência à compressão paralela às fibras em amostras de paricá com 10 anos de idade. A inferioridade dos valores obtidos neste estudo, em comparação aos reportados na literatura, pode estar associada à menor idade das árvores, bem como às condições de crescimento do material utilizado.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CFRP

Os resultados de resistência à tração, deformação na ruptura e de módulo de elasticidade longitudinal do compósito CFRP estão apresentados na Tabela 9. As propriedades mecânicas obtidas para o compósito foram inferiores aos valores especificados para o tecido de fibras de carbono (ver item 3.1.2). De acordo com Kawecki e Podgórski (2020b), os adesivos poliuretanos apresentam maior flexibilidade (isto é, menor módulo de elasticidade) quando comparados a outros adesivos convencionais utilizados como matriz de compósitos e em ligações estruturais, como os adesivos epoxídicos. Nesse sentido, a impregnação do poliuretano à base de óleo de mamona nas fibras de carbono pode ter aumentado a seção transversal efetiva do compósito, porém reduzido as propriedades mecânicas do produto final, em razão da discrepância entre as propriedades mecânicas dos dois materiais.

Tabela 9. Propriedades do CFRP.

CP	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	519,97	1,06	55129
2	626,87	1,68	46636
3	872,57	1,76	54067
4	782,31	1,62	49862
5	400,26	0,87	47611
Média	640,40	1,40	50661
D.P	191,30	0,40	3798
C.V (%)	29,87	28,87	7,50

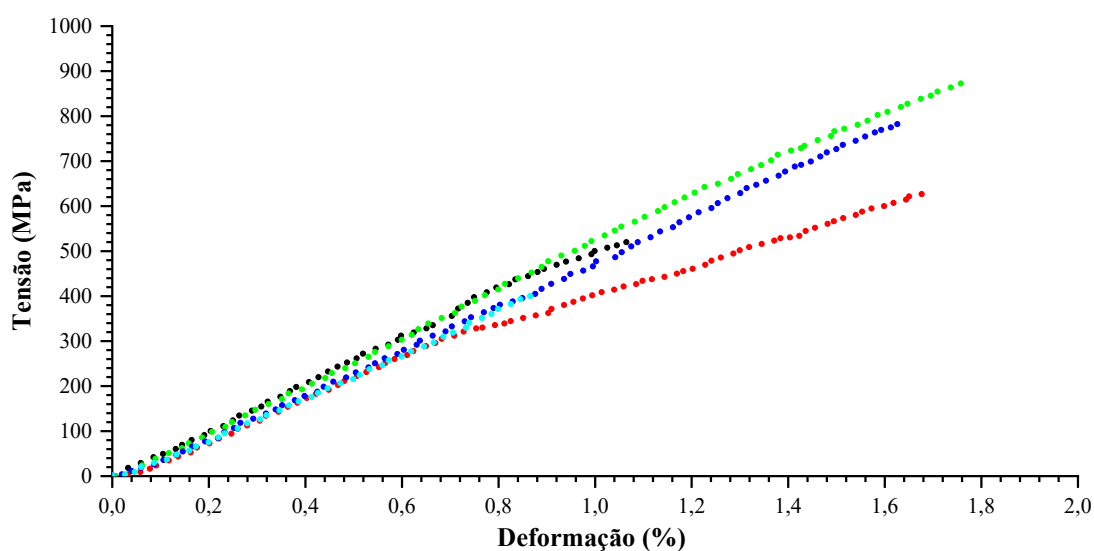
Fonte: o autor.

Como pode ser observado, foram registrados valores elevados de coeficiente de variação, especialmente para a resistência à tração. Esse comportamento é recorrente em materiais CFRPs, devido à distribuição aleatória de defeitos nas fibras

de carbono, relacionada ao controle de qualidade e ao processo produtivo (Wang; Li; Liu, 2024). Maierhofer *et al.* (2014) ressaltam que, ao longo do processo de fabricação de compósitos CFRP, não é possível eliminar completamente defeitos microscópicos aleatórios na interface fibra-resina, nem defeitos macroscópicos, como poros e ondulações nas fibras, as quais influenciam diretamente o desempenho do material sob tração.

O comportamento mecânico dos compósitos CFRP está representado pelas curvas tensão-deformação apresentadas na Figura 37. Observa-se que as curvas apresentam comportamento aproximadamente linear-elástico até a ruptura dos compósitos, em concordância com o reportado em outros estudos da literatura (Zhang; Shi; Li, 2019; Naresh *et al.*, 2018).

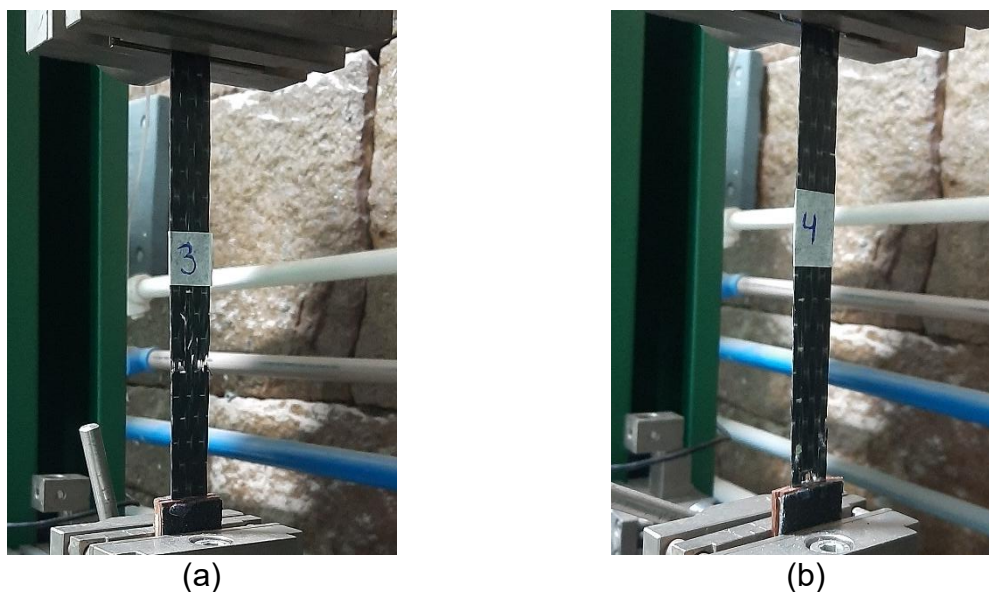
Figura 37. Curvas tensão-deformação dos CPs de CFRP.



Fonte: o autor.

Os CPs apresentaram o modo de ruptura caracterizado por falha transversal à direção de carregamento, com ruptura frágil das fibras e da matriz adesiva, conforme apresentado na Figura 38. As rupturas ocorreram próximas ao meio do comprimento longitudinal e nas extremidades laterais, correspondentes à região de fixação dos grampos de madeira, como observado no estudo de Barile *et al.* (2022).

Figura 38. Ruptura dos compósitos CFRP: (a) próximo ao meio do comprimento longitudinal e (b) à extremidade.



Fonte: o autor.

4.3 ENSAIO À FLEXÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados das propriedades analisadas nas vigas submetidas aos ensaios de flexão, bem como os modos de ruptura observados nos corpos de prova e as análises analítica e numérica.

A série de LVL sem reforço apresentou valores médios de resistência e módulo de elasticidade à flexão de 31,72 MPa e 6062 MPa, respectivamente. No estudo de Amorim (2013), foi observado um valor médio de 36,10 MPa para a resistência à flexão de LVL de paricá colado com PVA, valor este considerado semelhante ao obtido no presente estudo.

Os valores médios, desvios padrão (D.P) e coeficientes de variação (C.V) obtidos para as propriedades de densidade aparente, força máxima, momento fletor máximo e rigidez global das séries analisadas estão apresentados na Tabela 10. Os resultados por corpo de prova estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 10. Resumo das propriedades obtidas para as vigas.

Propriedades		MS	LVL-SR	LVL-1C	LVL-2C
Densidade aparente (kg/m ³)	Média	323,35 a*	375,37 b	388,53 bc	399,10 c
	D.P	73,66	21,28	14,16	24,17
	C.V (%)	22,78	5,67	3,64	6,06
Força máxima (kN)	Média	2,64 a	2,53 a	2,75 a	3,22 b
	D.P	0,43	0,38	0,23	0,33
	C.V (%)	16,15	15,10	8,46	10,30
Momento fletor Máximo (kN.cm)	Média	26,44 a	25,33 a	27,48 a	32,21 b
	D.P	4,27	3,82	2,33	3,32
	C.V (%)	16,15	15,10	8,46	10,30
E _{global} (kN.cm ²)	Média	10583 a	9684 a	9275 a	12587 b
	D.P	1471	990	1216	1228
	C.V (%)	13,90	10,23	13,12	9,75

NOTA: * Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre as médias; MS: viga de madeira serrada; LVL-SR: viga de LVL sem o reforço; LVL-1C e LVL-2C: viga de LVL reforçada com uma e duas camadas de tecido de fibras de carbono, respectivamente.

Fonte: o autor.

A densidade aparente das séries avaliadas foi determinada por meio da relação massa/volume de cada viga completa, considerando o teor de umidade no momento do ensaio. Com relação a esta variável, as séries LVL-2C, LVL-1C e LVL-SR apresentaram incrementos de 25,73%, 22,40% e 18,26%, respectivamente, em comparação à série de vigas de madeira serrada, configurando uma diferença significativa ($P \leq 0,05$).

A utilização de uma camada de reforço nas vigas LVL, aliada à aplicação de uma maior gramatura de adesivo, não resultou em um aumento significativo da densidade aparente dos elementos, quando comparados às vigas LVL sem reforço. Da mesma forma, quando comparados às vigas LVL-1C, os elementos da série LVL-2C não apresentaram incremento significativo na densidade aparente.

No estudo de Heliodoro, Palma e Ballarin (2020), foi realizada a caracterização físico-mecânica da madeira serrada de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake) e de LVL fabricados com a mesma espécie. Os autores observaram que a densidade aparente média do LVL foi aproximadamente 41,9% superior à da madeira serrada. Resultados semelhantes foram reportados por Costa *et al.* (2020), Berger,

Pertuzatti e Haselein (2018), Guimarães Junior *et al.* (2015) e Shukla e Kamdem (2012), os quais também identificaram valores médios de densidade aparente mais elevados para LVL em comparação à madeira serrada utilizada em sua produção.

Segundo Costa *et al.* (2020), o aumento da densidade aparente em produtos engenheirados pode ser atribuído, em parte, à aplicação de adesivos, que geralmente possuem densidade superior à da madeira. Além disso, o processo de prensagem das lâminas durante a fabricação do LVL promove a densificação do material, contribuindo para o incremento da densidade aparente no produto final.

No que se refere aos resultados de força e momento fletor máximo, a série LVL-2C apresentou os maiores valores médios, seguida por LVL-1C, MS e LVL-SR. Embora a literatura aponte que o processo de industrialização da madeira serrada tende a resultar em produtos engenheirados com propriedades mecânicas superiores, o LVL sem reforço produzido neste estudo não apresentou desempenho mecânico superior a madeira serrada. Tal comportamento pode estar associado à disposição aleatória das lâminas na composição das vigas de LVL.

A inserção de uma camada de reforço com tecido de fibras de carbono nas vigas LVL resultou em um incremento de capacidade de carga de 8,49% em relação à série LVL-SR e de 3,91% em relação à série MS. De acordo com a análise inferencial realizada, tais incrementos de resistência mecânica não foram significativos ($P > 0,05$). Esse comportamento também foi observado por alguns autores da literatura após realizarem o reforço de elementos em madeira com fibras de carbono.

Rosa *et al.* (2019) avaliaram a resistência mecânica de vigas de MLC de paricá reforçadas com diferentes fibras sintéticas coladas com adesivo à base de resorcinol. Os autores observaram que a utilização de tecido de fibras de carbono com gramatura de 200 g/m² resultou em um incremento de apenas 0,38% na resistência mecânica em comparação ao elemento não reforçado. Segundo os mesmos autores, a baixa aderência observada entre a madeira e o reforço, decorrente da ausência de penetração do adesivo nas fibras, e concentração de tensões na lamela adjacente ao reforço podem ter limitado o ganho de resistência mecânica do elemento.

Percin e Uzun (2023b), ao avaliarem o efeito da adição de tecido de fibras de carbono, em diferentes configurações, nas propriedades mecânicas de vigas de LVL de faia (*Fagus orientalis* Lipsky) coladas com poliuretano, observaram baixos

incrementos na capacidade de carga dos elementos reforçados. Para a configuração em que o tecido de fibras de carbono foi aplicado entre as duas lâminas inferiores das vigas, conforme adotado neste trabalho, foi registrado um aumento de apenas 3% na resistência à flexão.

Esses resultados diferem de outros encontrados na literatura, nos quais foram observados aumentos significativos na capacidade de carga de vigas reforçadas com uma camada de tecido de fibras de carbono na região tracionada. Wei *et al.* (2013) notaram um incremento de aproximadamente 40% na resistência à flexão de vigas LVL de madeira de choupó com a utilização de reforço. Bakalarz e Kossakowski (2024) observaram uma diferença de aproximadamente 37% na força máxima resistente entre vigas de LVL de pinus com e sem reforço. Ao reforçarem vigas de MLC de madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*), Nadir *et al.* (2016) encontraram um aumento de 45,86% no módulo de ruptura em relação aos espécimes não reforçados.

Espera-se que o reforço de vigas de madeira com compósitos de fibras de carbono resulte em aumento significativo da resistência à flexão, uma vez que esses compósitos apresentam propriedades mecânicas superiores às da madeira (Schober *et al.*, 2015; Saad; Lengyel, 2022a). No entanto, como destacado por Fiorelli (2002), fatores como o percentual de reforço utilizado (em relação a área da seção transversal da viga) e a qualidade da aderência entre a madeira e o compósito podem influenciar no ganho de resistência mecânica do elemento.

Neste estudo, o emprego do percentual de reforço igual a 1,8%, correspondente à série LVL-2C, resultou em incrementos na capacidade de carga de 17,24% em comparação com a série LVL-1C, 27,19% em relação à série LVL-SR e 21,83% em relação à série MS. Conforme apresentado na Tabela 10, tais incrementos representaram diferenças significativas entre as séries. De forma semelhante, estudos da literatura também relataram aumentos significativos na capacidade de carga de vigas de madeira quando mais de uma camada de CFRP foi aplicada.

No estudo de Wang *et al.* (2019), foi investigada a influência do tipo de fibra e número de camadas de reforço no comportamento mecânico de vigas de madeira serrada de Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.). Em comparação com as amostras não reforçadas, foram observados incrementos de 14,3%, 50% e 107,1% na capacidade de carga de vigas reforçadas com 1, 2 e 3 camadas de compósito

reforçado com fibras de basalto, respectivamente. Fenômeno semelhante foi observado por Rescalvo *et al.* (2021), que verificaram um aumento significativo na resistência à flexão de vigas reforçadas com duas camadas de tecido de fibras de carbono em relação àquelas reforçadas com apenas uma camada.

Para os resultados de rigidez global ($E_{I_{global}}$) apresentados na Tabela 10, a série LVL-2C apresentou o maior valor médio (12587 kN.cm²), representando um aumento de 35,71% em relação à série LVL-1C, 29,99% em comparação com a série LVL-SR e 18,94% em relação à série MS. De acordo com a análise inferencial, foi identificada diferença significativa entre o valor médio da série LVL-2C e os das demais séries. No entanto, não houve diferença significativa entre as séries LVL-1C e LVL-SR, indicando que a utilização de apenas uma camada de reforço com fibras de carbono não influenciou a rigidez global dos elementos.

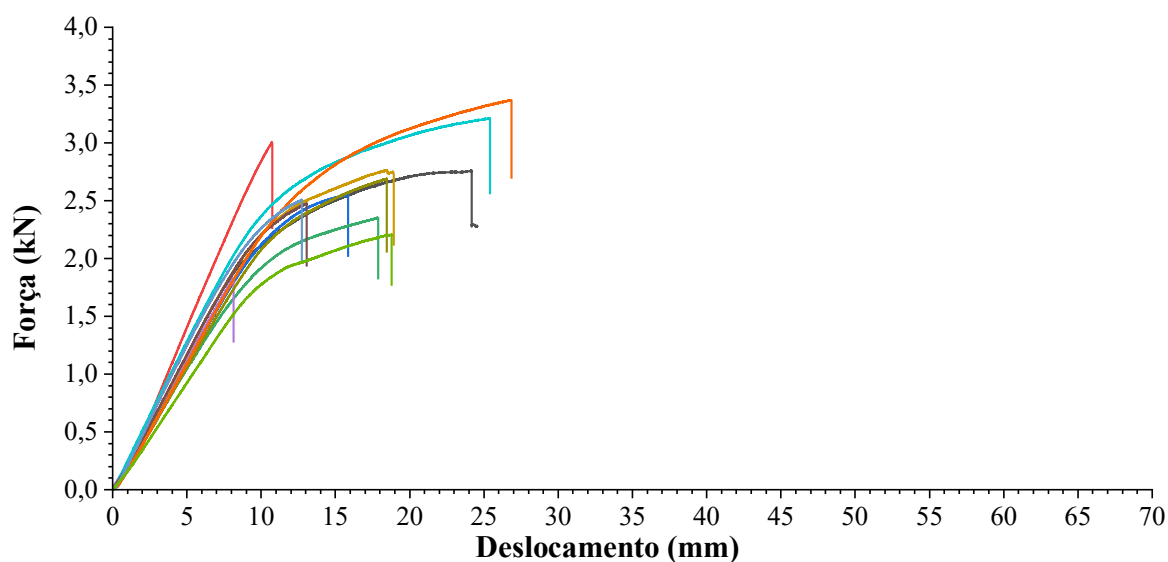
Segundo Saad e Lengyel (2022a), a técnica de reforço de vigas de madeira com CFRP geralmente resulta em incrementos modestos de rigidez à flexão. O aprimoramento de tal propriedade mecânica, por meio do uso de reforço com CFRP, foi objeto de investigação de diversos estudos da literatura, os quais observaram comportamentos mecânicos distintos entre si. Nadir *et al.* (2016) encontraram incrementos de 36,19% e 64,12% na rigidez global de vigas de MLC reforçadas com uma e duas camadas, respectivamente, em comparação com vigas não reforçadas. Vahedian, Shrestha e Crews (2019) observaram aumentos de rigidez de até 64% ao reforçarem vigas de MLC. Andor *et al.* (2015) notaram um aumento de rigidez de até 16% ao reforçarem vigas de madeira serrada de abeto-da-noruega (*Picea abies*). Por outro lado, Corradi *et al.* (2017) observaram incrementos de apenas 4,7% e 7,9% na rigidez à flexão de vigas de madeira de carvalho e abeto reforçadas, respectivamente, em comparação aos elementos não reforçados.

Saad e Lengyel (2022a) destacam que a preparação do reforço com tecido de fibras carbono é um dos principais fatores que podem conduzir a um aumento moderado da rigidez à flexão. Ainda segundo os autores, o método de preparação *in situ*, no qual o tecido é impregnado com o adesivo e conectado à madeira simultaneamente, embora apresente vantagens como a possibilidade de aplicação em campo e boa aderência entre as fibras e a madeira, pode levar à ocorrência de defeitos no reforço, como ondulações nas fibras. Isso ocorre porque as fibras de carbono, extremamente finas, são sensíveis a ações diferentes da tração axial (por exemplo,

flexão), o que compromete a rigidez do compósito. Considerando que os espécimes utilizados na campanha experimental deste estudo foram produzidos manualmente, é possível que o defeito mencionado tenha comprometido a rigidez global da série LVL-1C.

Na Figura 39 está apresentada a relação força-deslocamento para todos os elementos testados da série de vigas de madeira serrada (MS) no ensaio de flexão. O comportamento mecânico dos CPs pode ser descrito como inicialmente elástico, com as curvas força-deslocamento aproximando-se de uma reta. Em seguida, observam-se dois comportamentos distintos: (1) a presença de um pequeno patamar de plastificação antes da ruptura, caracterizado por comportamento não linear; e (2) uma queda abrupta da força, sem ocorrência prévia de deformações plásticas significativas. Tais comportamentos são semelhantes aos observados em estudos da literatura (Brunetti *et al.*, 2019), sendo característicos de vigas de madeira não reforçadas submetidas à flexão, onde a ruptura abrupta ocorre por tração das fibras inferiores do elemento, podendo ou não ser precedida por plastificação na região comprimida (Corradi *et al.*, 2017).

Figura 39. Curvas força-deslocamento da série MS.

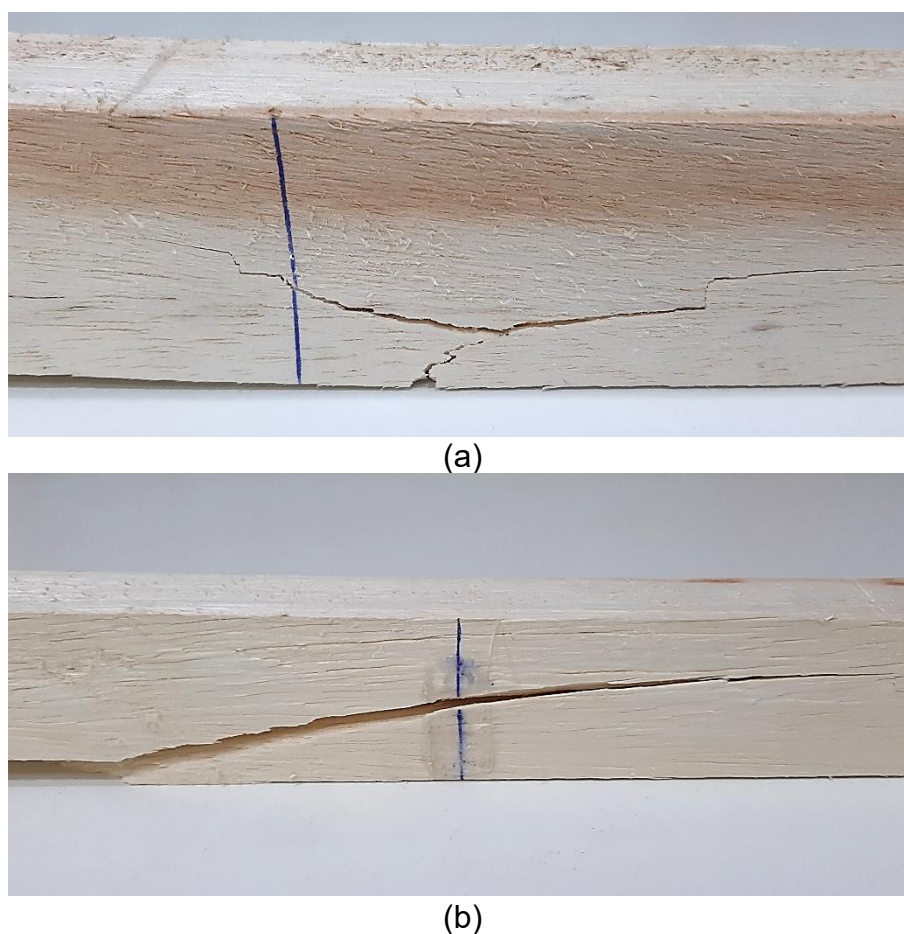


Fonte: o autor.

Os modos de ruptura identificados nas vigas da série MS estão apresentados na Figura 40. Foram observados dois modos de ruptura, ambos caracterizados pela falha

frágil da madeira na zona de tração. Cada tipo de ruptura ocorreu em 50% dos corpos de prova. De acordo com Corradi *et al.* (2017), o modo de ruptura por tração simples (Figura 40.a) ocorre em vigas de veios retos, enquanto o modo de ruptura por tração desviada (Figura 40.b), sendo o mais comum, é causado por uma força de tração atuando obliquamente à fibra, geralmente associado à presença de defeitos.

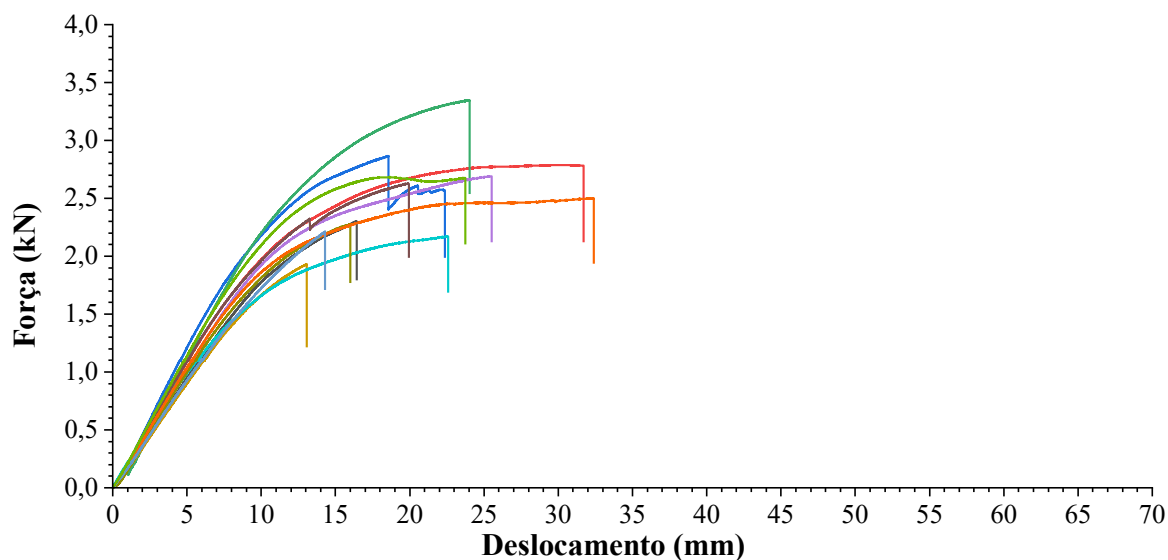
Figura 40. Modos de ruptura observados na série MS: (a) tração simples e (b) tração desviada.



Fonte: o autor.

As curvas força-deslocamento referentes às vigas da série LVL-SR estão apresentadas na Figura 41. Em comparação à série MS, as vigas de LVL sem reforço apresentaram um maior patamar de deformações plásticas (comportamento não linear) antes da queda abrupta da força, ao atingirem a resistência máxima.

Figura 41. Curvas força-deslocamento da série LVL-SR.



Fonte: o autor.

Assim como na série MS, foram observados dois modos de ruptura nas vigas da série LVL-SR, ambos caracterizados por falha por tração das fibras na região tracionada (Figura 42). Foi observada ruptura por tração simples em 75% dos corpos de prova, enquanto os demais romperam por tração desviada. Bakalarz e Kossakowski (2024) também observaram rupturas frágeis por tração em vigas de LVL não reforçadas. Durante a inspeção visual dos espécimes, não foram identificadas falhas por delaminação entre as lâminas, o que indica uma aderência satisfatória proporcionada pelo adesivo utilizado.

Na Figura 43 está apresentada a relação força-deslocamento registrada no ensaio à flexão das vigas da série LVL-1C. Em comparação às séries MS e LVL-SR (ver Figura 39 e Figura 41), as curvas das vigas reforçadas com fibras de carbono exibiram uma região plástica superior, atingindo maiores deslocamentos ao final do ensaio. Além disso, foi possível verificar uma menor dispersão nos valores máximos de força em relação às demais séries, o que está de acordo com o menor coeficiente de variação apresentado para essa propriedade (ver Tabela 10). Esse comportamento está de acordo com o observado por Percin e Altunok (2017), os quais destacam que o reforço de vigas de madeira com fibras de carbono reduz a variabilidade das propriedades mecânicas do elemento.

Figura 42. Modos de ruptura observados na série LVL-SR: (a) tração simples e (b) tração desviada.



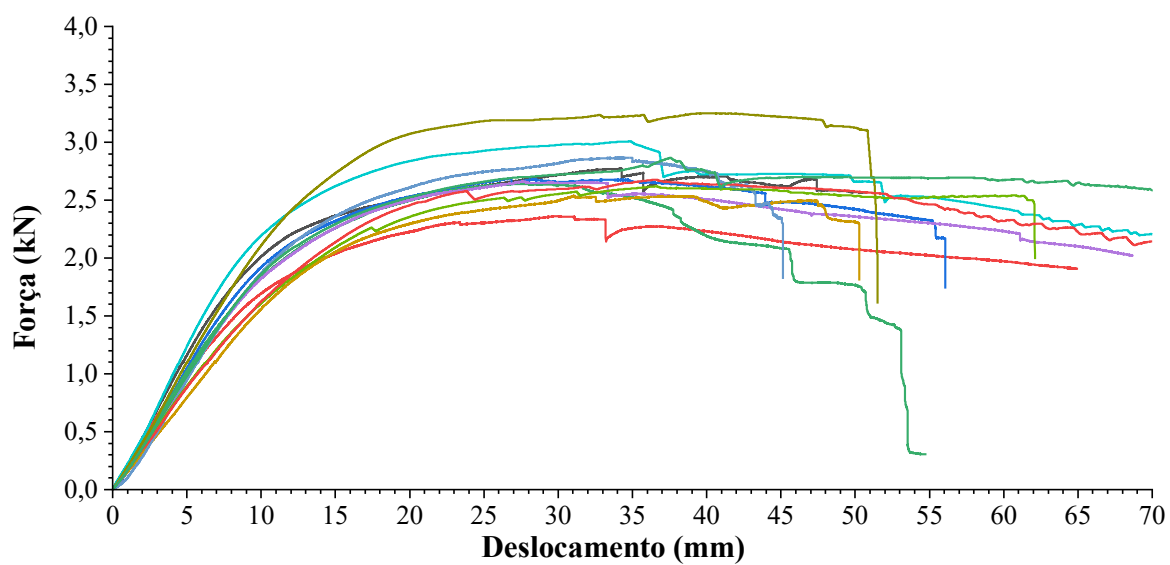
(a)



(b)

Fonte: o autor.

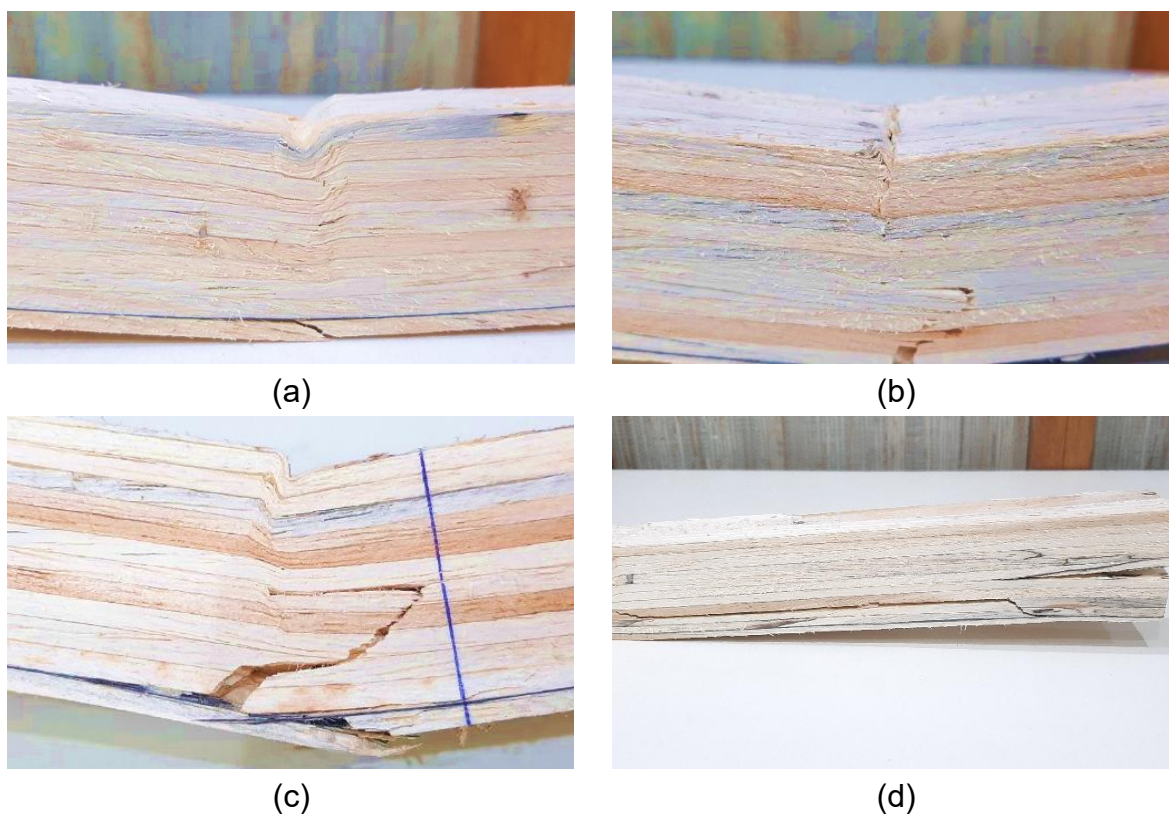
Figura 43. Curvas força-deslocamento da série LVL-1C.



Fonte: o autor.

A utilização do reforço com uma camada de tecido de fibras de carbono promoveu alterações nos modos de ruptura das vigas de LVL em relação às séries não reforçadas. Conforme ilustrado na Figura 44, foram identificados os seguintes modos de ruptura: falha da lâmina mais externa por tração; esmagamento por compressão normal às fibras no local de aplicação da carga; esmagamento por compressão paralela às fibras na face comprimida; e ruptura simultânea das fibras de carbono e das lâminas de madeira. Não foi observada delaminação da interface madeira-fibras de carbono.

Figura 44. Modos de ruptura observados na série LVL-1C: (a) tração da lâmina inferior e esmagamento por compressão normal, (b) esmagamento por compressão paralela na face comprimida, (c) ruptura por tração das fibras de carbono e das lâminas do LVL e (d) cisalhamento horizontal.



Fonte: o autor.

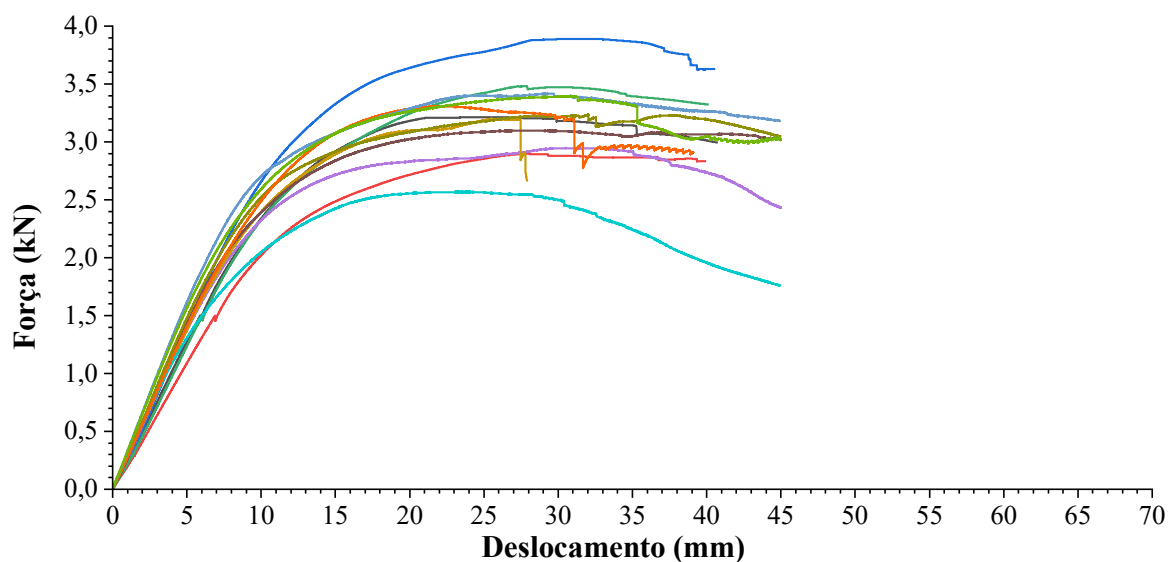
Cerca de 41,67% dos CPs apresentaram esmagamento das fibras na região comprimida (Figura 44.b), o que justifica os maiores deslocamentos observados nas curvas correspondentes a essa série (Figura 43), em comparação às séries não

reforçadas. Aproximadamente 59% dos espécimes exibiram o seguinte comportamento: ruptura por tração da lâmina mais externa, seguida por grandes deslocamentos e esmagamento das fibras por compressão normal no ponto de aplicação da carga (Figura 44.a). O primeiro registro de queda abrupta de força nas curvas força-deslocamento da série LVL-1C corresponde à ruptura da lâmina mais externa. Cerca de 33% dos corpos de prova apresentaram ruptura das fibras de carbono, enquanto o cisalhamento horizontal foi observado em apenas um espécime.

Para a maioria dos CPs, a camada de reforço atuou como uma barreira à propagação de fissuras na última lâmina de madeira, impedindo que estas se estendessem às lâminas subsequentes. Esse comportamento também foi observado por Wei *et al.* (2013) ao avaliarem o reforço de vigas de LVL com CFRP.

O comportamento mecânico dos elementos da série LVL-2C está representado na Figura 45. De forma semelhante ao observado para a série LVL-1C, as vigas reforçadas com duas camadas de fibras de carbono apresentaram inicialmente um trecho de resposta linear, seguido de elevadas deformações plásticas.

Figura 45. Curvas força-deslocamento da série LVL-2C.

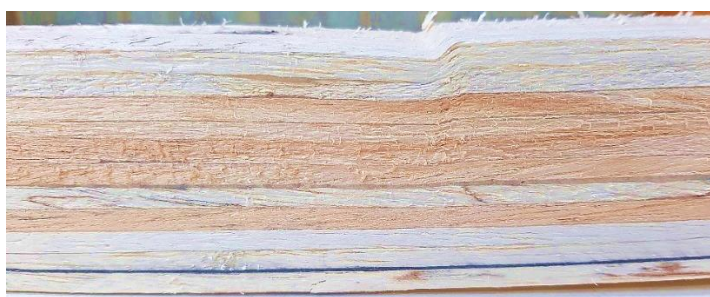


Fonte: o autor.

Os modos de rupturas observados nos elementos da série LVL-2C estão apresentados na Figura 46. O modo de ruptura por tração da lâmina inferior seguido

da compressão normal nos pontos de aplicação da carga (Figura 46.a), semelhante ao registrado na série LVL-1C, foi observado em todas as vigas reforçadas com duas camadas de fibras de carbono. Da mesma forma, aproximadamente 91,67% dos elementos apresentaram esmagamento das fibras na face superior (Figura 46.b), comportamento característico da ruptura por compressão paralela às fibras da madeira. A falha na interface madeira-CFRP (Figura 46.c), atribuída à falta de adesão que pode ter sido consequência da aplicação insuficiente de adesivo durante o processo de fabricação, foi identificada em apenas um dos elementos, correspondendo a aproximadamente 8,33% do total.

Figura 46. Modos de ruptura observados na série LVL-2C: (a) tração da lâmina inferior e esmagamento por compressão normal, (b) esmagamento por compressão paralela na face comprimida e (c) falha da interface madeira-CFRP.



(a)



(b)



(c)

Fonte: o autor.

Os índices de ductilidade obtidos para as séries de vigas analisadas estão apresentados na Tabela 11. A análise inferencial indicou diferença significativa entre as séries reforçadas e não reforçadas com fibras de carbono, sendo a LVL-2C a que apresentou os maiores valores médios, seguida pelas séries LVL-1C, LVL-SR e MS. A série LVL-2C apresentou aumentos de 9,95% em relação à série LVL-1C, 96,77% em comparação com a série LVL-SR e 127,65% em relação à série MS no índice de ductilidade baseado nos deslocamentos (μ_{Δ}). Para o índice de ductilidade por energia (μ_E), A série LVL-2C apresentou aumentos de 10,08% em relação à série LVL-1C, 101,20% em comparação com a série LVL-SR e 137,37% em relação à série MS. Esses resultados estão de acordo o comportamento mecânico observados para as séries, em que foram registradas maiores deformações plásticas para as vigas reforçadas com as fibras de carbono.

Tabela 11. Índices de ductilidade registrados para as vigas no ensaio de flexão.

	MS		LVL-SR		LVL-1C		LVL-2C	
	μ_{Δ}	μ_E	μ_{Δ}	μ_E	μ_{Δ}	μ_E	μ_{Δ}	μ_E
Média	1,72 a*	1,75 A	1,98 a	2,06 A	3,55 b	3,76 B	3,90 b	4,14 B
D.P	0,32	0,34	0,48	0,52	0,40	0,44	0,85	0,93
C.V (%)	18,47	19,38	24,43	25,40	11,28	11,74	21,73	22,53

NOTA: * Letras diferentes para o mesmo tipo de índice de ductilidade indicam diferença significativa entre as médias; MS: viga de madeira serrada; LVL-SR: viga de LVL sem o reforço; LVL-1C e LVL-2C: viga de LVL reforçada com uma e duas camadas de tecido de fibras de carbono, respectivamente; μ_{Δ} e μ_E : índices de ductilidade baseados nos métodos dos deslocamentos e das energias, respectivamente.

Fonte: o autor.

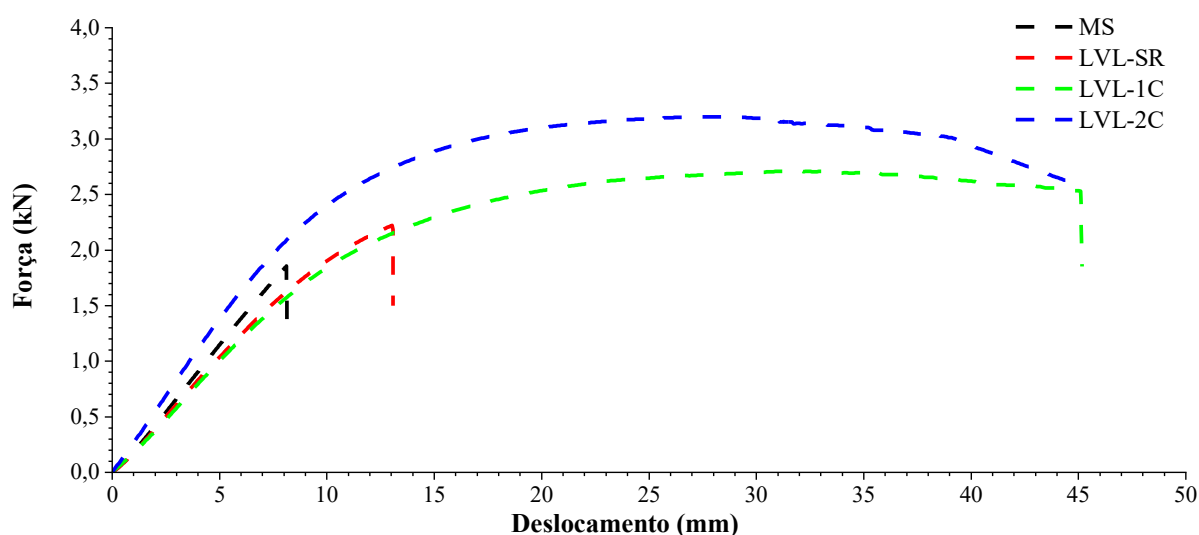
Os resultados de ductilidade obtidos neste trabalho foram semelhantes aos reportados por Nadir *et al.* (2016), que observaram índices de ductilidade, pelo método da energia, de até 2,33 em vigas de MLC reforçadas com CFRP, representando um incremento de 54,30% em relação aos elementos não reforçados (1,51). De forma semelhante, Bakalarz e Kossakowski (2022a) identificaram um aumento de 51% no índice de ductilidade de vigas de LVL reforçadas com CFRP. Já Ahmad (2013) reportou incrementos de até 88,24% no índice de ductilidade, também pelo método da energia, ao reforçar vigas de madeira maciça com CFRP. Segundo Cruz *et al.*

(2025), o reforço com fibras de carbono permite que a madeira atinja sua faixa elastoplástica na compressão, o que resulta em uma maior ductilidade.

Franke, Franke e Harte (2015) destacam que vigas submetidas à flexão tendem a apresentar ruptura frágil por tração na região inferior, sendo esta considerada uma falha crítica devido ao colapso súbito da estrutura. Por outro lado, falhas por compressão excessiva são desejáveis sob o ponto de vista da segurança estrutural, por apresentarem comportamento dúctil e com deformações plásticas perceptíveis.

Para comparar os comportamentos mecânicos das séries analisadas, a Figura 47 apresenta o diagrama força–deslocamento com as curvas médias de cada grupo, obtidas por meio da ferramenta *Average Multiple Curves* do *software* Origin. Como é possível observar, a curva da série LVL-2C apresentou uma inclinação inicial superior às demais, coerente com o maior valor de rigidez global obtido para esse grupo. Além disso, os valores de força máxima e de deslocamento na ruptura das séries reforçadas foram superiores aos registrados para as séries MS e LVL-SR, indicando que o uso do tecido de fibras de carbono como reforço proporcionou ganhos tanto em resistência mecânica quanto em ductilidade.

Figura 47. Curvas médias das séries analisadas.



Fonte: o autor.

4.3.1 Análise teórica

Neste item são apresentados os resultados dos métodos teóricos (analítico e numérico) utilizados para estimar o momento fletor máximo e a rigidez global das vigas de LVL produzidas neste estudo. Os valores das propriedades mecânicas estimadas pelo método analítico e a comparação destes com os valores médios obtidos experimentalmente estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Comparação entre os resultados experimentais e analíticos do momento fletor máximo e da rigidez global das vigas reforçadas.

Tipo de viga	Momento fletor máximo (kN.cm)			Rigidez global (kN.cm ²)		
	Experimental	Analítico	Exp/analít	Experimental	Analítico	Exp/analít
LVL-1C	27,48	30,78	0,89	9275	11088	0,84
LVL-2C	32,21	35,85	0,90	12587	12239	1,03

Nota: Exp/analít: razão entre valor experimental e analítico.

Fonte: o autor.

Como pode ser observado, todos os resultados obtidos pelo método analítico (seção transformada), com exceção da rigidez global da série LVL-2C, foram superiores aos determinados experimentalmente. Para a série LVL-1C, os valores teóricos superaram os experimentais em 12,03% para o momento fletor máximo e em 19,54% para a rigidez global. Já para a série LVL-2C, as diferenças foram menores, com valor teórico superior em 10,91% para o momento fletor máximo e inferior em 2,76% para a rigidez global.

Os resultados indicam que o método analítico baseado na seção transformada tende a superestimar o momento fletor máximo das vigas reforçadas. Como destacado no estudo de Bakalarz e Kossakowski (2023), essa superestimação pode estar associada às hipóteses simplificadoras adotadas no modelo analítico, como a consideração de aderência perfeita entre a madeira e o CFRP, comportamento linear elástico dos materiais até a ruptura e distribuição uniforme de tensões na seção transversal.

Além disso, o método não considera a presença de defeitos naturais da madeira, bem como a variabilidade das propriedades mecânicas do CFRP, o que reduz a sua

eficácia. Nesse sentido, as menores diferenças registradas para a série LVL-2C indicam que o aumento da taxa de reforço tende a reduzir a influência desses efeitos, aproximando o comportamento real das hipóteses assumidas pelo modelo analítico. Ainda assim, as diferenças identificadas, especialmente em termos de momento fletor máximo, indicam a necessidade de ajustes no modelo analítico, como a introdução de fatores de correção ou a consideração de modelos constitutivos mais realistas para os materiais.

A Tabela 13 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e numéricos do momento fletor máximo e da rigidez global das vigas de LVL. De modo geral, observa-se uma elevada concordância entre os valores experimentais e numéricos para o momento fletor máximo, com razões Exp/num próximas da unidade para todas as séries. Para a série LVL-SR, foi observada uma diferença de apenas 0,05 kN.cm entre os resultados, indicando que o modelo numérico foi capaz de representar adequadamente o comportamento resistente da viga sem reforço.

Tabela 13. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos das propriedades mecânicas das vigas de LVL.

Tipo de viga	Momento fletor máximo (kN.cm)			Rigidez global (kN.cm ²)		
	Experimental	Numérico	Exp/num	Experimental	Numérico	Exp/num
LVL-SR	25,33	25,38	1,00	9684	9917	0,98
LVL-1C	27,48	28,37	0,97	9275	11040	0,84
LVL-2C	32,21	31,32	1,03	12587	12078	1,04

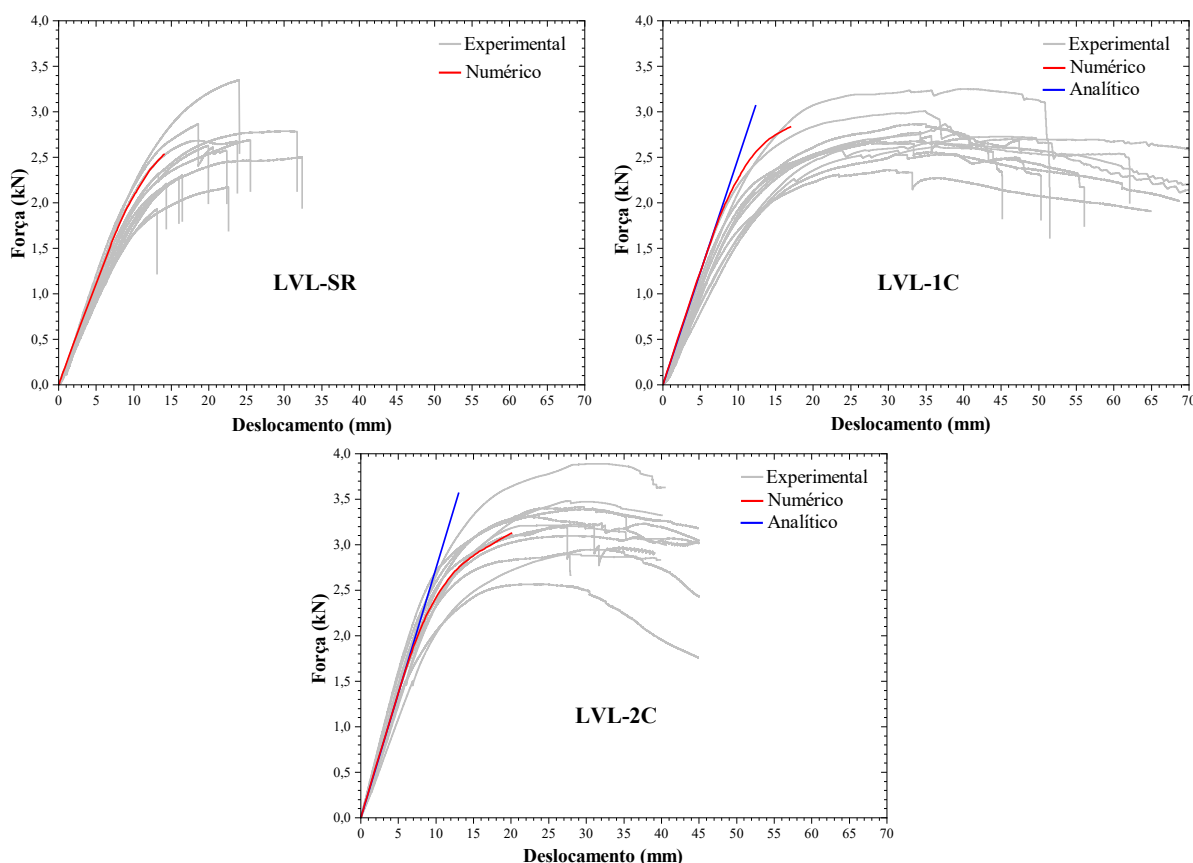
Nota: Exp/num: razão entre valor experimental e numérico.

Fonte: o autor

Em relação à rigidez global, é possível observar uma maior dispersão entre os resultados experimentais e numéricos. Assim como verificado na análise analítica, a série LVL-1C apresentou as maiores diferenças entre os valores teóricos e experimentais dentre as séries, com o resultado numérico superestimando o valor médio experimental em 19,03%. Ainda assim, o modelo numérico apresentou alta precisão na estimativa das propriedades das séries avaliadas, mostrando-se mais preciso que o modelo analítico, em concordância com o observado por Bakalarz e Kossakowski (2024).

Na Figura 48 está apresentada as curvas força-deslocamento obtidas experimentalmente e pelos métodos teóricos para as séries avaliadas, permitindo a comparação entre o comportamento mecânico real das vigas e aquele estimado pelos modelos. Observa-se que as curvas de ambos os modelos apresentam comportamento semelhante no trecho inicial, caracterizado por um regime linear elástico, com inclinações aproximadamente iguais. No entanto, nas proximidades da força última, o modelo numérico apresenta melhor aproximação às curvas experimentais em comparação ao método analítico, uma vez que o mesmo considera a distinção entre os comportamentos à tração e à compressão, incluindo a plasticidade da madeira sob compressão.

Figura 48. Comparação das curvas experimentais, teóricas e numéricas de força *versus* deslocamento.

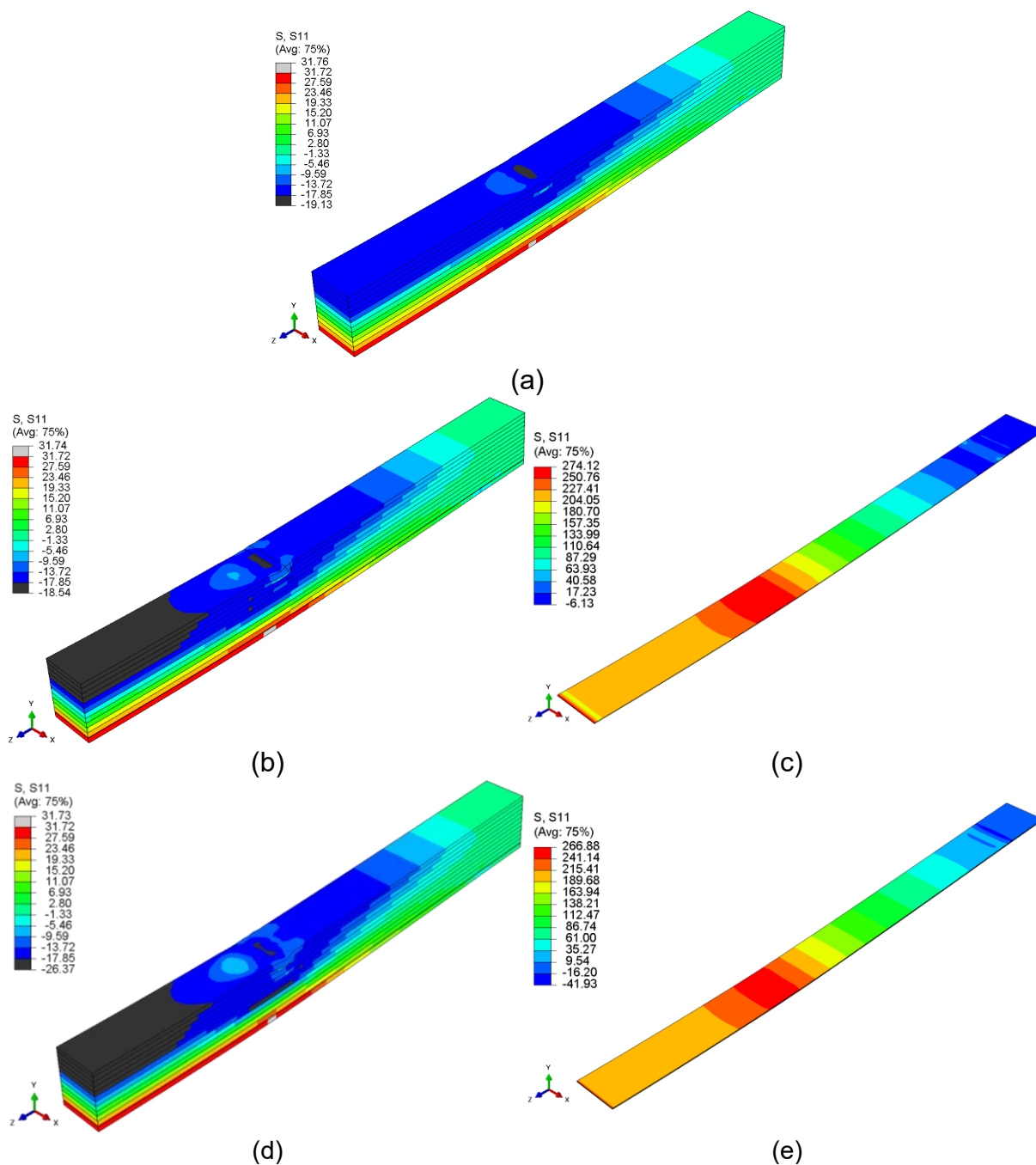


Fonte: o autor.

Além de estimar as propriedades mecânicas das vigas, como o momento fletor máximo e a rigidez global, o modelo numérico possibilitou a análise da distribuição

das tensões normais e das distorções geométricas dos elementos, fornecendo uma compreensão mais detalhada do comportamento estrutural das vigas. Essa análise está apresentada na Figura 49, na qual o estado de tensões normais atuantes nas vigas corresponde à força última registrada em cada modelo.

Figura 49. Distribuição da tensão normal S11 (em MPa) na força máxima: (a) LVL-SR, (b) LVL-1C, (c) CFRP do LVL-1C, (d) LVL-2C e (e) CFRP do LVL-2C.



Fonte: o autor.

Para todos os modelos analisados, a tensão última de tração inicia-se na lâmina localizada na extremidade inferior do LVL, nas proximidades do ponto de aplicação da carga. Esse comportamento é coerente ao observado nos ensaios experimentais, nos quais a primeira queda abrupta da curva força–deslocamento, registrada para as séries, esteve associada à ruptura frágil da lâmina inferior, também nas proximidades do ponto de aplicação da carga.

De forma semelhante aos modos de ruptura observados experimentalmente, os modelos simulados apresentaram deformações plásticas por compressão normal às fibras no ponto de aplicação da carga, especialmente nas séries reforçadas, decorrentes do contato entre a chapa de carregamento e a madeira. Esse comportamento está associado à concentração de tensões de compressão perpendicular às fibras na região de aplicação da carga e ao baixo módulo de elasticidade da madeira sob esse tipo de sollicitação.

Como pode ser observado na Figura 49, o modelo da série LVL-2C apresentou a maior região de escoamento por compressão paralela às fibras, evidenciada por valores inferiores a $-17,85$ MPa, dentre os modelos analisados, enquanto o modelo da série LVL-SR praticamente não apresentou esse comportamento. Esse resultado indica que a presença do reforço contribuiu para uma maior redistribuição das tensões normais ao longo da seção transversal, aumentando os níveis de compressão paralela às fibras na região superior do elemento, ao passo que, no modelo sem reforço, as tensões permaneceram predominantemente no regime elástico. Esse fenômeno está de acordo com o observado nos ensaios experimentais, nos quais se verificou o modo de ruptura por compressão paralela às fibras apenas para as vigas reforçadas, o que contribuiu para a obtenção de valores mais elevados de ductilidade.

Quanto às tensões normais atuantes no reforço, foram observados valores máximos de tensão à tração de $274,12$ MPa para a série LVL-1C e de $264,28$ MPa para a série LVL-2C. Esses valores são inferiores à resistência média à tração obtida na caracterização do CFRP ($640,40$ MPa), o que pode explicar a baixa ocorrência da ruptura do compósito nos ensaios experimentais, especialmente para as vigas com duas camadas de reforço.

4.4 CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA

Os resultados de resistência e percentual de ruptura na madeira obtidos para as séries analisadas no ensaio de cisalhamento na linha de cola estão apresentados na Tabela 14. Os valores correspondentes a cada corpo de prova estão apresentados no Apêndice D.

Tabela 14. Resumo das propriedades obtidas no ensaio de cisalhamento na linha de cola.

Propriedades		LVL-NR	LVL-R
Resistência (MPa)	Média	5,21 a*	4,94 a
	D.P	0,45	0,84
	C.V (%)	8,73	17,02
Percentual de ruptura na madeira (%)	Média	92,13 a	93,57 a
	D.P	11,31	3,68
	C.V (%)	12,28	3,94

NOTA: * Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre as médias; LVL-NR e LVL-R: LVL não reforçado e reforçado com CFRP, respectivamente.

Fonte: o autor.

Conforme apresentado na Tabela 14, a série LVL-R apresentou valor médio de resistência ao cisalhamento inferior ao observado para a série LVL-NR, com diferença percentual de -5,18%. No entanto, como indicado pelo resultado do teste de hipóteses, não foi observada diferença estatisticamente significativa entre as duas séries. Tal resultado infere que a presença do tecido de fibras de carbono no LVL não influenciou significativamente a propriedade avaliada no ensaio de cisalhamento na linha de cola.

No estudo de Silva (2022), foi investigada a aderência de tecido de fibras de carbono em elementos de MLC de *Eucalyptus urophylla* colados com poliuretano à base de óleo de mamona. Por meio do ensaio de cisalhamento na linha de cola, foi observada uma diferença de apenas 0,5 MPa entre as resistências dos elementos colados com e sem reforço, indicando que a presença do tecido de fibras de carbono exerceu influência não significativa sobre a propriedade analisada, assim como observado no presente estudo.

No que se refere aos resultados do percentual de ruptura na madeira, a série LVL-R apresentou o maior valor médio (93,57%), com um acréscimo de 1,56% ao observado para a série LVL-NR (92,13%). Como indicado pelo teste de comparação das médias, os valores das duas séries não apresentaram diferença significativa entre si.

Segundo a norma D 2559-12a (ASTM, 2018), que fornece especificações para o uso de adesivos em elementos estruturais de madeira colados para aplicação externa, as amostras ensaiadas em cisalhamento na linha de cola não devem apresentar um percentual de ruptura na madeira inferior a 75%. Nesse contexto, as séries analisadas neste estudo atenderam a esse requisito, indicando boa qualidade de adesão. Conforme destacado por Bianche *et al.* (2017), quando a ruptura ocorre majoritariamente na madeira, isso indica que tanto a coesão do adesivo quanto a qualidade da ligação entre adesivo e substrato superam a própria resistência do material lenhoso.

5 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso de tecido de fibras de carbono como reforço de vigas de LVL de paricá coladas com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, investigando a sua influência nas propriedades mecânicas desses elementos. Com base nos resultados obtidos, destacam-se as seguintes conclusões:

- a) O reforço com duas camadas de tecido de fibras de carbono proporcionou aumentos significativos tanto em rigidez como em resistência mecânica em relação às demais séries analisadas;
- b) O reforço com uma camada de tecido fibras de carbono proporcionou incrementos de até 8% no momento fletor máximo resistido das vigas de LVL, embora esse aumento não tenha sido estatisticamente significativo;
- c) A incorporação de apenas uma camada de reforço não promoveu o aumento da rigidez global das vigas de LVL;
- d) A presença do reforço alterou os modos de ruptura das vigas de LVL, promovendo falhas mais dúcteis em comparação às vigas não reforçadas, o que pode indicar maior segurança estrutural dos elementos reforçados;
- e) O método analítico empregado superestimou os valores de momento fletor das vigas, enquanto o método numérico apresentou resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente. Ainda assim, ambos os métodos mostraram-se adequados para a estimativa das propriedades mecânicas das vigas de LVL analisadas neste estudo;
- f) Com base nos modos de ruptura observados e nos resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento na linha de cola, o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona apresentou desempenho eficaz na colagem entre as lâminas de madeira e entre estas e o tecido de fibras de carbono.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, são apresentadas a seguir sugestões para trabalhos futuros relacionadas ao comportamento mecânico e aos materiais empregados.

- a) Avaliar a influência de diferentes tipos de fibras de carbono (unidirecionais, bidirecionais e tecidos multiaxiais) no comportamento mecânico de vigas de LVL de paricá;
- b) Comparar o desempenho do reforço com CFRP com outros materiais compósitos, como fibras de vidro (GFRP) ou fibras naturais, mantendo o uso do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona;
- c) Comparar o desempenho do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona com outros adesivos, como o epóxi, na colagem do CFRP à madeira;
- d) Avaliar o desempenho mecânico de elementos estruturais de LVL de paricá, em escala real, reforçados com CFRP, considerando diferentes configurações, camadas e dimensões do sistema de reforço;
- e) Avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de CFRP em vigas de LVL de paricá para aplicações estruturais.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, Y. Ductility of timber beams strengthened using fiber reinforced polymer. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 7, n. 5, p. 535, 2013.
- AHMED, S.; AROCHO, I. Mass timber building material in the US construction industry: Determining the existing awareness level, construction-related challenges, and recommendations to increase its current acceptance level. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 1, p. 100007, 2020.
- ALFONSO, A. T.; SÁNCHEZ, M. C.; FRANCO, J. M. Impact of the processing method on the properties of castor oil/cellulose acetate polyurethane adhesives for bonding wood. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 116, p. 103153, 2022.
- ALMEIDA, D. H. D.; SCALIANTE, R. D. M.; MACEDO, L. B. D.; MACÊDO, A. N.; DIAS, A. A.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JUNIOR, C. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, v. 37, p. 1175-1181, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 143: Standard methods of testing small clear specimens of timber. Philadelphia, USA, 1994.
- _____. ASTM D 198: Methods of static tests of timbers in structural sizes. Philadelphia, 1984.
- _____. ASTM D 198: Methods of static tests of timbers in structural sizes. Philadelphia, 2009.
- _____. **ASTM D 2559-12a (2018)**: Standard specification for adhesives for bonded structural wood products for use under exterior exposure conditions. West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- _____. ASTM D 5456:2001 - Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products. Philadelphia, USA, 2001.
- AMORIM, M. R. S. **Agrupamento de espécies madeireiras amazônicas para a produção de painéis de lâminas paralelas (LVL)**. 2013. 103p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais – Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.
- AMORIM, V. D. S. S.; MONTEIRO, K. M. S.; SOUSA, G. O.; DAMASCENA, J. F.; PEREIRA, J. A.; MORAES, W. S. Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, 2021.
- ANDOR, K.; LENGYEL, A.; POLGÁR, R.; FODOR, T.; KARÁCSONYI, Z. Experimental and statistical analysis of spruce timber beams reinforced with CFRP fabric. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 200-207, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190 - 1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- _____. ABNT NBR 7190 - 3: Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. ABNT NBR 7190 - 4: Projeto de estruturas de madeira - Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização peças estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. ABNT NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: 1997.

_____. PN02: 126.10-0001-1. (ANBT NBR 7190): Projeto de estruturas de madeira – revisão. Rio de Janeiro: ABNT. 2018.

ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS DE BASE FLORESTAL – APRE.
Estudo setorial 2022. Curitiba: 2022.

AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 159p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

BAKALARZ, M. M.; KOSSAKOWSKI, P. G. Application of transformed cross-section method for analytical analysis of laminated veneer lumber beams strengthened with composite materials. **Fibers**, v. 11, n. 3, p. 24, 2023.

BAKALARZ, M. M.; KOSSAKOWSKI, P. G. Ductility and stiffness of laminated veneer lumber beams strengthened with fibrous composites. **Fibers**, v. 10, n. 2, p. 21, 2022a.

BAKALARZ, M. M.; KOSSAKOWSKI, P. G. Strengthening of full-scale laminated veneer lumber beams with CFRP sheets. **Materials**, v. 15, n. 19, p. 6526, 2022b.

BAKALARZ, M. M.; KOSSAKOWSKI, P. G. Strengthening of Laminated Veneer Lumber Slabs with Fiber-Reinforced Polymer Sheets—Preliminary Study. **Fibers**, v. 12, n. 3, p. 22, 2024.

BAKALARZ, M. M.; KOSSAKOWSKI, P. G. The flexural capacity of laminated veneer lumber beams strengthened with AFRP and GFRP sheets. **Technical Transactions**, v. 116, n. 2, p. 85-95, 2019.

BARILE, C.; PARAMSAMY KANNAN, V.; DEL CORE, L.; CASAVOLA, C. Tensile and shear behavior of plain weave fabric carbon fiber reinforced polymer at elevated temperatures. **Polymer Composites**, v. 43, n. 9, p. 6536–6547, 2022.

BASTERRA, L. A.; ACUNA, L.; CASADO, M.; LOPEZ, G.; BUENO, A. Strength testing of Poplar duo beams, *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. I-214, with fibre reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 90-96, 2012.

BERGER, C.; PERTUZATTI, A.; HASELEIN, C. R. Influência da posição de lâminas de duas espécies exóticas nas propriedades mecânicas de painéis LVL. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 9, n. 1, p. 19-29, 2018.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, R. V. O.; DELLA LUCIA, R. M. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00077114, 2017.

BIBLIS, E. J. Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. **Forest Products Journal**, v. 15, n. 2, p. 81-8, 1965.

BILIK, A. C. B.; TRIANOSKI, R. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de compensado e madeira laminada de *Pinus glabra* Walt. **Floresta**, v. 52, n. 2, pág. 323-331, 2022.

- BRAGA, G. H. R.; CERVI, R. G.; OLIVEIRA, P. A. Aferição dos custos da qualidade na produção de compensados de madeira pelo método de custeio ABC (Activity Based Costing) e por Absorção. **Custos e agronegócio online**, v. 16, n. 3, p. 382-410, 2020.
- BRUNETTI, M.; CHRISTOVASILIS, I. P.; MICHELONI, M.; NOCETTI, M.; PIZZO, B. Production feasibility and performance of carbon fibre reinforced glulam beams manufactured with polyurethane adhesive. **Composites Part B: Engineering**, v. 156, p. 212-219, 2019.
- BUCHANAN, A. H. Bending strength of lumber. **Journal of Structural Engineering**, v. 116, n. 5, p. 1213–1229, 1990.
- CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 125p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- CALLISTER, W. D. Jr; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. [S.I.]: LTC, 2016.
- CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. D.; ALMEIDA, T. D.; ARAUJO, V. D.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Mechanical properties of Paricá wood using structural members and clear specimens. **International Journal of Materials Engineering**, v. 6, n. 2, p. 56-59, 2016.
- CERESANA. **Market Study. Adhesives - World 6th Edition**. Disponível em: <<https://ceresana.com/en/produkt/adhesives-market-report-world>>. Acesso em: 01 dez. 2024.
- CHEN, Y. H.; WU, C. H.; CHEN, Y. C. Optimized condition for eco-friendly wood composites manufactured from castor oil-based polyurethane. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124789, 2021.
- CHINA NATIONAL STANDARD. **GB/T 20241: Laminated veneer lumber**. Beijing, China, 2006.
- CHRISTOFORO, A. L.; GOMES, A. F. F.; ARROYO, F. N.; MASCARENHAS, F. J. R.; SANTOS, H. F. D.; TOPOLNIAK, L.; AKASAKI, J. L. Reinforcement of timber beams with steel bars: parametric analysis using the finite element method. **Buildings**, v. 12, n. 7, p. 1036, 2022.
- COELHO, L. K.; ROSA, T. O.; TEREZO, R. F.; RIGHEZ, J. L. B. Madeira laminada colada de paricá reforçada com fibras sintéticas. In: **III CBCTEM – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**, Florianópolis, 2017.
- ÇOLAK, S.; ÇOLAKOĞLU, G.; AYDIN, I. Effects of logs steaming, veneer drying and aging on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 93-98, 2007.
- COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. **COPANT 455: método de ensayo de flexion estatica**. Caracas: 1972.
- COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICAS. **COPANT 464: método de determinación de la compresión parallel al grano**. Caracas: 1972.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION. BS EN 408 - Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 1995.

_____. BS EN 408 - Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 2012.

_____. BS EN 408 - Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, 2004.

CORDEIRO, I. M. C. C.; BARROS, P. L. C. D.; LAMEIRA, O. A.; GAZEL FILHO, A. B. Avaliação de plantios de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) de diferentes idades e sistemas de cultivo no município de Aurora do Pará-PA (Brasil). **Ciência Florestal**, v.25, p.679-687, 2015.

CORRADI, M.; BORRI, A.; RIGHETTI, L.; SPERANZINI, E. Uncertainty analysis of FRP reinforced timber beams. **Composites Part B: Engineering**, v. 113, p. 174-184, 2017.

COSTA, A. A.; MASCARENHAS, A. R. P.; SANTOS, C. M. M.; FARIA, C. E. T.; DUARTE, P. J.; CRUZ, T. M. Caracterização tecnológica de painéis engenheirados produzidos com madeira de paricá. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e786986089, 2020.

COSTA, M. A. **Efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades de compensados e painéis de lâminas paralelas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke)**. 2015. 148p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2015.

CRUZ, C.; BRAVO, R.; RESCALVO, F. J.; FUENTES-GARCÍA, Y.; LAFUENTE-BOLÍVAR, F. J.; GALLEGRO, A. Development of high-performance glulam beams of *Pinus nigra* with embedded CFRP for its application for a real case for structural rehabilitation. **Structure**, p. 109344, 2025.

DASSAULT SYSTÈMES. **Abaqus 2020 Documentation**. Version 2020. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2020.

DEWI, A. P.; TIHURUA, E. F.; WULANSARI, T. Y. I. Trachea features and fiber dimensions of fast-growing tree: A case study on wood samples from eastern Indonesia. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**., 2022.

FARIA, D. L.; RIBEIRO, L. P.; OLIVEIRA, K. M.; JÚNIOR, J. B. G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (PLP) produzidos com madeira de *Hevea brasiliensis*. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 10, n. 3, 2019.

FERNANDES, F. P. D. **Análise numérica de vigas mistas de madeira e concreto em situação de incêndio**. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos, SP. 2002.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. **Materials research**, v. 6, p. 193-202, 2003.

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, 2015.

GAO, M.; LIU, W.; WANG, H.; SHAO, X.; SHI, A.; AN, X.; NIE, L. Emission factors and characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from adhesive application in indoor decoration in China. **Science of the Total Environment**, v. 779, p. 145169, 2021.

GARCÍA, P. R.; ESCAMILLA, A. C.; GARCÍA, M. Nieves González. Analysis of the flexural stiffness of timber beams reinforced with carbon and basalt composite materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 86, p. 152-159, 2016.

GLIŠOVIĆ, I.; PAVLOVIĆ, M.; STEVANOVIĆ, B.; TODOROVIĆ, M. Numerical analysis of glulam beams reinforced with CFRP plates. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 23, n. 7, p. 868–879, 2017.

HELIODORO, J. C. A.; BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Painéis LVL de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake). In: GONÇALVES, F. G. (org.). **Engenharia industrial madeireira: tecnologia, pesquisa e tendências**. Guarujá: Científica Digital, cap. 16, p. 243-253, 2020.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

HIZIROGLU, S. Laminated Veneer Lumber (LVL) as a Construction Material. **OSU Extension**. jul. 2016. Disponível em: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/laminated-veneer-lumber-lvl-as-a-construction-material.html?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 de dez. 2024.

HUANG, S.; BACHTIAR, E. V.; YAN, L.; KASAL, B. Bond behaviour and thermal stability of flax/glass hybrid fibre reinforced polymer–timber structures connected by polyurethane. **Construction and Building Materials**, v. 322, p. 126456, 2022.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (Ibá). **Relatório Ibá 2019**. São Paulo: 2019.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (Ibá). **Relatório Ibá 2025**. São Paulo: 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Catálogo de Estações Automáticas**. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A401>>. Acesso em: 05 de maio de 2025.

İŞLEYEN, Ü. K.; GHOROUBI, R.; MERCİMEK, Ö.; ANIL, Ö.; ERDEM, R. T. 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, 2021.

İŞLEYEN, Ü. K.; GHOROUBI, R.; MERCİMEK, Ö.; ANIL, Ö.; ERDEM, R. T. Investigation of impact behavior of glulam beam strengthened with CFRP. **Structures**, v. 51, p. 196-214, 2023.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M. D.; PINTO, J. A.; VIANA, L. C.; SOUZA, M. M. D.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V. C. Produção de painéis laminados unidirecionais - LVL com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. **Cerne**, v. 16, n. 4, p. 557-563. 2010.

JESUS, R. C. S. D. Características anatômicas e físicas da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. ducke), plantado em diferentes espaçamentos e condições ambientais no município de aurora do Pará-PA. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA. 2004.

JORISSEN, A.; FRAGIACOMO, M. General notes on ductility in timber structures. **Engineering structures**, v. 33, n. 11, p. 2987-2997, 2011.

JUNIOR, J. B. G.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES, B. M. R.; DE SIQUEIRA, H. F. Qualidade de painéis LVL produzidos com madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 307-313, 2015.

KAWECKI, B.; PODGÓRSKI, J. 3D ABAQUS simulation of bent softwood elements. **Archives of Civil Engineering**, v. 66, n. 3, 2020a.

KAWECKI, B.; PODGÓRSKI, J. The effect of glue cohesive stiffness on the elastic performance of bent wood–CFRP beams. **Materials**, v. 13, n. 22, p. 5075, 2020b.

LIEBANA, D. C. S. **Parametric analysis of the fire performance of laminated veneer lumber**. 2023. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade de Queensland, 2023.

LIMA, V. D. S.; NASCIMENTO, S. L.; SILVA, M. G. S. D.; SIVIERO, M. A.; CÉSAR, S. F.; MOLINA, J. C.; DIAS, J. M. S. Caracterização física e mecânica de painéis LVL de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke)) colados com ureia-formaldeído. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, p. e20230178, 2023.

LIMA, V. S.; Nascimento, S. L.; Santos, M. C., Nascimento; B. L. M.; César, S. F.; Dias, J. M. S. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) utilizada na indústria de compensados no Estado do Maranhão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, 2022b.

LIMA, V. S.; NASCIMENTO, S. L. L.; SANTOS, M. C.; DIAS, J. M. S.; NASCIMENTO, B. L. M. Avaliação geográfica e econômica das indústrias de compensados no Brasil. **The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC**, v. 08, n. 04, 2022a.

LIU, K.; MIAO, S.; SU, Z.; SUN, L.; MA, G.; ZHANG, S. Castor oil-based waterborne polyurethanes with tunable properties and excellent biocompatibility. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 118, n. 10, p. 1512-1520, 2016.

LIU, P.; PETERMAN, K. D.; YU, C.; SCHAFFER, B. W. Cold-formed steel shear walls in ledger-framed buildings. In: **ANNUAL STABILITY CONFERENCE**. Structural Stability Research Council, v. 4, n. 1, p. 27–47, 2012.

MA, Y.; ZHU, X.; ZHANG, Y.; LI, X.; CHANG, X.; SHI, L.; LV, S.; ZHANG, Y. Castor oil-based adhesives: A comprehensive review. **Industrial Crops and Products**, v. 209, p. 117924, 2024.

MACEDO, L. B. D.; ALMEIDA, D. H. D.; SCALIANTE, R. D. M.; VARANDA, L. D.; CALIL JÚNIOR, C. Caracterização de algumas propriedades físicas da madeira de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb). In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Metalúrgica E Industrial-CONEMI**. 2012.

MAIERHOFER, C.; RÖLLIG, M.; EHRIG, K.; MEINEL, D.; CÉSPEDES-GONZALES, G. Validation of flash thermography using computed tomography for characterizing

inhomogeneities and defects in CFRP structures. **Composites Part B: Engineering**, v. 64, p. 175–186, 2014.

MARAIS, B. N.; BRISCHKE, C.; MILITZ, H. Wood durability in terrestrial and aquatic environments—A review of biotic and abiotic influence factors. **Wood Material Science & Engineering**, v. 17, n. 2, p. 82-105, 2022.

MASCARENHAS, A. R. P. **Indicadores de qualidade ambiental e caracterização tecnológica da madeira em sistema agroflorestal multiestratificado**. 2015. 80p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Rondônia, Rolim de Moura, RO. 2015.

MASHGARI, H.; LIU, X.; NGYUEN, T.; NGO, T. Performance, Methodology and Opportunities in FRP Strengthening Techniques for Timber Structures: A State-of-The-Art Review. **Journal of Building Engineering**, p. 111073, 2024.

MATHUROS, A.; THONGCHOM, C.; BUI, L. V. H.; JONGVIVATSAKUL, P. Monotonic and cyclic flexural performance of timber beams strengthened with glass fiber-reinforced polymer rods using near-surface mounted technique. **Structures**, v. 65, p. 106729, 2024.

MATOS, A. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; BORGES, C. C.; MATOS, L. C.; FERREIRA, J. C.; MENDES, L. M. Influência de diferentes composições de lâminas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby e *Pinus oocarpa* var. *oocarpa* (Schiede ex Schltdl) para produção de compensados multilaminados. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 124, p. 799-810, 2019.

MERCIMEK, Ö.; GHOROUBI, R.; AKKAYA, S. T.; TÜRER, A.; ANIL, Ö.; İŞLEYEN, Ü. K. Flexural behavior of finger joint connected glulam wooden beams strengthened with CFRP strips. **Structures**, v. 66, p. 106853, 2024.

MELINDA, A. P.; HIGUCHI, S.; YORESTA, F. S.; YAMAZAKI, Y.; NHUT, P. V.; NURYANTI, P.; MATSUMOTO, Y. Bending performance of laminated veneer lumber timber beams strengthened in the compression side with near-surface mounted CFRP plates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, p. e03418, 2024.

MELO, R. R. Avaliação de variáveis tecnológicas na produção de painéis LVL confeccionados com paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). 2012. 164p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Effects of grading of veneers on properties of LVL made from *Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, p. 677-683, 2015b.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Estimativas das propriedades de compostos LVL produzidos com paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) por meio de stress wave. **Revista Árvore**, v. 38, n.6, p. 1155-1163, 2014.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Influence of adhesive type on the properties of LVL made from Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke) plantation trees. **Drvna industrija**, v. 66, n. 3, p. 205-212, 2015a.

MERCİMEK, Ö.; GHOROUBI, R.; AKKAYA, S. T.; TÜRER, A.; ANIL, Ö.; İŞLEYEN, Ü. K. Flexural behavior of finger joint connected glulam wooden beams strengthened with CFRP strips. **Structures**, v. 66, p. 106853, 2024.

MODES, K. S.; JÚNIOR, G. B.; VIVIAN, M. A.; SANTOS, L. M. H. Propriedades físico-mecânicas da madeira sólida de *Schizolobium amazonicum*. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 2, p. 989-995, 2020.

MOGHADAM, P. N.; YARMOHAMADI, M.; HASANZADEH, R.; NURI, S. Preparation of polyurethane wood adhesives by polyols formulated with polyester polyols based on castor oil. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 68, p. 273-282, 2016.

MOLINA, J. C.; CALIL JUNIOR, C. Estratégia para modelagem numérica de sistemas mistos considerando diferentes modelos de ruptura para os materiais. **Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería**, v. 17, n. 2, p. 256–266, 2009.

MORITANI, F. Y. Proposta de classes de resistência para peças estruturais de madeira: *Eucalyptus urograndis*, *Pinus taeda* e *Schizolobium amazonicum* (Paricá). 2018. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

NADIR, Y.; NAGARAJAN, P.; AMEEN, M; ARIF M, M. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 547-555, 2016.

NARESH, K.; SHANKAR, K.; VELMURUGAN, R.; GUPTA, N. K. Statistical analysis of the tensile strength of GFRP, CFRP and hybrid composites. **Thin-Walled Structures**, v. 126, p. 150–161, 2018.

NEELY, S. T. Relation of compression-endwise to breaking load of beam. **Progress in Timber Physics**, p. 13-17, 1898.

NOWAK, T. P.; JASIEŃKO, J.; CZEPIŻAK, D. Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 197-206, 2013.

OLIVEIRA, S. S.; NASCIMENTO, G.; SOUZA, D. P.; NASCIMENTO, L.; OLIVEIRA, S.; OLIVEIRA, S.; OLIVEIRA, E. Growth of parica seedlings (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) cultivated in different organic substrates. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 6, p. 303-310, 2019.

PARK, R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. **Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering**, v. 22, n. 3, p. 155–166, 1989.

PATALAS, F.; BROL, J.; NOWAK, T. P. Numerical analysis, experimental tests and non-linear analytical models in the study of bent timber beams reinforced with FRP strips. **Construction and Building Materials**, v. 399, p. 132531, 2023.

PERCIN, O.; UZUN, O. Physical and mechanical properties of laminated wood made from heat-treated scotch pine reinforced with carbon fiber. **BioResources**, v. 18, n. 3, p. 5146, 2023a.

PERCIN, O.; UZUN, O. Properties of Heat-Treated Beech Laminated Veneer Lumber Reinforced with Carbon Fiber Fabric. **BioResources**, v. 18, n. 3, 2023b.

PERCIN, O; ALTUNOK, M. Some physical and mechanical properties of laminated veneer lumber reinforced with carbon fiber using heat-treated beech veneer. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, p. 193-201, 2017.

POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY. PN-EN 14374: Konstrukcje Drewniane - Fornir Klejony Warstwowo (LVL) - Wymagania. Warszawa, Poland, 2005.

POSTULAK, A. W.; BROL, J. Ductility of the Tensile Zone in Bent Wooden Beams Strengthened with CFRP Materials. **Materials**, v. 13, n. 23, p. 5451, 2020.

RAFTERY, G. M.; HARTE, A. M. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 724-735, 2011.

RAFTERY, G. M.; RODD, P. D. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. **Construction and building materials**, v. 91, p. 116-125, 2015.

RAMAGE, M. H.; BURRIDGE, H.; BUSSE-WICHER, M.; FEREDAY, G.; REYNOLDS, T.; SHAH, D. U.; WU, G.; YU, L.; FLEMING, P.; TINGLEY, D. D.; ALLWOOD, J.; DUPREE, P.; LINDEN, P.F.; SCHERMAN, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333–359, 2017.

RAMKUMAR, V. R.; ANAND, N.; PRAKASH, V.; SUJATHA, D.; MURALI, G. Experimental study on the performance of fiber-reinforced laminated veneer lumber produced using *Melia dubia* for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 417, p. 135325, 2024.

RESCALVO, F. J.; TIMBOLMAS, C.; BRAVO, R.; VALVERDE-PALACIOS, I.; GALLEGO, A. Improving ductility and bending features of poplar glued laminated beams by means of embedded carbon material. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 124469, 2021.

RESCALVO, F. J.; VALVERDE-PALACIOS, I.; SUAREZ, E.; GALLEGO, A. Experimental comparison of different carbon fiber composites in reinforcement layouts for wooden beams of historical buildings. **Materials**, v. 10, n. 10, p. 1113, 2017.

ROGERS, C. A.; BALH, N.; ONG-TONE, C.; SHAMIM, I.; DABREO, J. Development of seismic design provisions for steel sheet sheathed shear walls. In: **STRUCTURES CONGRESS 2011**. Reston: ASCE, 2011. p. 676–687.

ROSA, T. O.; TEREZO, R. F.; MASCIA, N. T.; RIGHEZ, J. L. B. Glued laminated timber of paricá reinforced with synthetic fibers. **Floresta, Curitiba**, v. 49, n. 3, 2019.

SAAD, K.; LENGYEL, A. Experimental, Analytical, and Numerical Assessments for the Controversial Elastic Stiffness Enhancement of CFRP-Strengthened Timber Beams. **Polymers**, v. 14, n. 19, p. 4222, 2022b.

SAAD, K.; LENGYEL, A. Strengthening timber structural members with CFRP and GFRP: A state-of-the-art review. **Polymers**, v. 14, n. 12, p. 2381, 2022a.

SAHOO, S.; KALITA, H.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. Synthesis and characterization of vegetable oil based polyurethane derived from low viscous bio aliphatic isocyanate: Adhesion strength to wood-wood substrate bonding. **Macromolecular Research**, v. 25, p. 772-778, 2017.

SALES, A. **Análise técnica e econômica do cultivo de paricá em sistema agrissilvicultural**. 2018. 67p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2018.

- SCHOBER, K. U.; HARTE, A. M.; KLIGER, R.; JOCKWER, R.; XU, Q.; CHEN, J. F. FRP reinforcement of timber structures. **Construction and building materials**, v. 97, p. 106-118, 2015.
- SENA, C. S. **Proposta de LVL produzido com lâminas de eucalipto (Eucalyptus pellita) tratadas com CCA-C**. 2020. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020.
- SHUKLA, S. R.; KAMDEM, D. P. Effect of copper based preservatives treatment of the properties of southern pine LVL. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 593-601, 2012.
- SILVA, C. B. R.; SANTOS JUNIOR, J. A.; ARAÚJO, A. J. C.; SALES, A.; SIVIERO, M. A.; ANDRADE, F. W. C.; MELO, L. E. Properties of juvenile wood of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (paricá) under different cropping systems. **Agroforestry Systems**, v. 94, p. 583-595, 2019.
- SILVA, M. L. J. S. **Estudo da aderência da fibra de carbono em elementos de madeira lamelada colada**. 2022. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.
- SILVA, M. R. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. 135p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- SOKOLOVIĆ, N. M.; GAVRILOVIĆ-GRMUŠA, I.; ZDRAVKOVIĆ, V.; IVANOVIĆ-ŠEKULARAC, J.; PAVIĆEVIĆ, D.; ŠEKULARAC, N. Flexural Properties in Edgewise Bending of LVL Reinforced with Woven Carbon Fibers. **Materials**, v. 16, n. 9, p. 3346, 2023.
- SORIANO, J.; PELLIS, B. P.; MASCIA, N. T. Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars. **Composite Structures**, v. 150, p. 200-207, 2016.
- SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. **Ambiente construído**, v. 18, p. 309-326, 2018.
- SUBHANI, M.; GLOBALA, A.; AL-AMERI, R.; MOLONEY, J. Effect of grain orientation on the CFRP-to-LVL bond. **Composites Part B: Engineering**, v. 129, p. 187-197, 2017.
- SZCZECINA, M. Study of Complexity of Numerical Models of a Strengthened Timber Beam. **Materials**, v. 16, n. 9, p. 3466, 2023.
- TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A.; VALLE, Â.; SAMPAIO, C. A. D. P.; STÜPP, Â. M. Propriedades da madeira de paricá em diferentes idades para uso estrutural. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 3, 2015.
- THEAKSTON, F. H. A feasibility study for strengthening timber beams with fiberglass. **Can. Agric. Eng.**, v. 7, n. 1, p. 17-19, 1965.
- 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**, v. 115, p. 300-307, 2017.
- TS 2474. Wood – Determination of ultimate strength in static bending. TSE Standards, Turkey, 1976.

TS 2478. Wood – Determination of modulus of elasticity in static bending. TSE Standards, Turkey, 1976.

VAHEDIAN, ABBAS; SHRESTHA, RIJUN; CREWS, KEITH. Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments. **Composites Part B: Engineering**, v. 164, p. 377-389, 2019.

VIDAURRE, G. B.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. D. C.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; MOULIN, J. C.; SILVA, J. G. M. D.; SORANSO, D. R. Physical and mechanical properties of juvenile *Schizolobium amazonicum* wood. **Revista Árvore**, v. 42, n. 1, p. 1-9, 2018.

WANG, A.; LI, R.; LIU, X. Analysis of the tensile properties and probabilistic characteristics of large-tow carbon fiber-reinforced polymer composites. **Polymers**, v. 16, n. 15, p. 2197, 2024.

WANG, B.; BACHTIAR, E. V.; YAN, L.; KASAL, B.; FIORE, V. Flax, basalt, E-glass FRP and their hybrid FRP strengthened wood beams: An experimental study. **Polymers**, v. 11, n. 8, p. 1255, 2019.

WANG, J.; GUO, X.; ZHONG, W.; WANG, H.; CAO, P. Evaluation of mechanical properties of reinforced poplar laminated veneer lumber. **BioResources**, v. 10, n. 4, p. 7455-7465, 2015.

WEI, P.; WANG, B. J.; ZHOU, D.; DAI, C.; WANG, Q.; HUANG, S. Mechanical Properties of Poplar Laminated Veneer Lumber Modified by Carbon Fiber Reinforced Polymer. **BioResources**, v. 8, n. 4, 2013.

YANG, H.; GAO, M.; WANG, J.; MU, H.; QI, D. Fast Preparation of high-performance wood materials assisted by ultrasonic and vacuum impregnation. **Forests**, v. 12, n. 5, p. 567, 2021.

YEBOAH, D.; GKANTOU, M. Investigation of flexural behaviour of structural timber beams strengthened with NSM basalt and glass FRP bars. **Structures**, v. 33, p. 390-405, 2021.

ZHANG, X.; SHI, Y.; LI, Z. X. Experimental study on the tensile behavior of unidirectional and plain weave CFRP laminates under different strain rates. **Composites Part B: Engineering**, v. 164, p. 524–536, 2019.

ZHANG, Y.; ZHANG, W.; WANG, X.; DONG, Q.; ZENG, X.; QUIRINO, R. L.; ZHANG, C. Waterborne polyurethanes from castor oil-based polyols for next generation of environmentally-friendly hair-styling agents. **Progress in Organic Coatings**, v. 142, p. 105588, 2020.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DO MÉTODO ANALÍTICO

As propriedades do LVL e do CFRP, obtidas na campanha experimental e necessárias para a aplicação do método analítico na estimativa do momento fletor e da rigidez global das vigas reforçadas estudadas, estão apresentadas na Tabela A.1.

Tabela A.1. Propriedades do LVL e do CFRP.

Propriedades do LVL			Propriedades do CFRP				
Seção transversal			E_{LVL} (MPa)	$e_{lâmina}$ (mm)	f_{LVL} (MPa)	E_{CFRP} (MPa)	e_{CFRP} (mm)
Altura (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)					
40	30	1200	6062	3,3	31,72	50661	0,36

Fonte: o autor.

Os cálculos apresentados a seguir referem-se à viga de LVL reforçada com apenas uma camada de CFRP. O primeiro passo do método consistiu na determinação do fator de transformação (n), que relaciona os módulos de elasticidade dos materiais usados, conforme o cálculo apresentado a seguir.

$$n = \frac{E_{FRP}}{E_{LVL}} = \frac{50661 \text{ (N/mm}^2\text{)}}{6062 \text{ (N/mm}^2\text{)}} = 8,36$$

Em seguida, foi realizada a transformação da seção transversal da viga por meio do produto entre a área original do CFRP e o fator de transformação, resultado na área de CFRP equivalente à madeira (A_{CFRP*}), como mostrado a seguir.

$$A_{CFRP*} = n \times Largura \times e_{CFRP} = 8,36 \times 30 \text{ (mm)} \times 0,36 \text{ (mm)} = 90,26 \text{ mm}^2$$

Com a seção devidamente transformada, foram determinados a posição do centro geométrico da nova seção (\bar{y}'), em relação a extremidade inferior da viga, e o momento de inércia equivalente (I_{eq}), conforme os procedimentos de cálculo descritos a seguir.

$$\begin{aligned}\bar{y}' &= \frac{A_{LVL} \times y_{LVL} + A_{CFRP} \times y_{CFRP}}{A_{LVL} + A_{CFRP}} \\ &= \frac{1200 \text{ (mm}^2\text{)} \times 20 \text{ (mm)} + 90,26 \text{ (mm}^2\text{)} \times 3,48 \text{ (mm)}}{1200 \text{ (mm}^2\text{)} + 90,26 \text{ (mm}^2\text{)}} = 18,84\text{mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_{eq} &= I_{LVL} + A_{LVL} \times d_{LVL}^2 + I_{CFRP} + A_{CFRP*} \times d_{CFRP}^2 \\ &= \frac{30 \text{ (mm)} \times 40^3 \text{ (mm}^3\text{)}}{12} + 1200 \text{ (mm}^2\text{)} \times (20 - 18,84)^2 \text{ (mm}^2\text{)} \\ &\quad + \frac{30 \text{ (mm)} \times 0,36^3 \text{ (mm}^3\text{)}}{12} + 90,26 \text{ (mm}^2\text{)} \times (3,48 - 18,84)^2 \text{ (mm}^2\text{)} \\ &= 182911 \text{ mm}^4\end{aligned}$$

Por fim, após a determinação das propriedades geométricas da seção transformada, foram determinados o momento fletor (M_{teo}) e a rigidez global (EI_{teo}) das vigas, como mostrado a seguir.

$$M_{teo} = \frac{f_{LVL} \times I_{eq}}{y} = \frac{31,72 \text{ (N/mm}^2\text{)} \times 182666 \text{ (mm}^4\text{)}}{18,86 \text{ (mm)}} = 307226 \text{ N} \cdot \text{mm} \cong 30,78 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$EI_{teo} = E_{LVL} \times I_{eq} = 606,2 \text{ (kN/cm}^2\text{)} \times 18,2666 \text{ (cm}^4\text{)} = 11087,69 \text{ kN} \cdot \text{cm}^2$$

Para as vigas reforçadas com duas camadas de CFRP, foi considerada uma espessura de reforço de 0,72 mm, sendo adotados os mesmos procedimentos de cálculo descritos anteriormente. Nesse caso, foi obtivo um valor de 35,85 kN.cm para o momento fletor e de 12238,99 kN.cm² para a rigidez global.

APÊNDICE B – PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DA MADEIRA SERRADA

Os resultados das propriedades físicas (teor de umidade, densidade básica e aparente e variação volumétrica) de cada corpo de prova avaliado estão apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1. Valores das propriedades físicas avaliadas para cada corpo de prova.

(continua)

CP	Teor de umidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Densidade básica (kg/m ³)	Variação volumétrica (%)
1	15,00	245,38	206,90	5,02
2	15,04	258,39	221,26	5,11
3	14,99	216,89	184,57	4,99
4	14,97	303,79	260,19	5,77
5	15,06	203,31	174,41	5,98
6	15,00	229,22	195,39	6,58
7	14,98	208,35	181,03	4,41
8	14,92	263,79	223,16	6,07
9	14,88	287,25	245,43	5,17
10	14,96	281,23	237,38	8,00
11	15,04	306,30	260,50	7,89
12	14,78	279,31	233,94	8,40
13	15,17	232,13	198,71	5,88
14	14,97	260,46	220,28	8,14
15	15,01	217,48	184,26	7,52
16	14,80	278,25	240,31	7,09
17	14,84	261,86	219,92	8,22
18	15,22	303,33	258,11	8,05
19	14,84	257,23	216,95	6,95
20	15,08	204,81	175,81	5,70
21	14,56	264,48	229,12	6,74
22	14,63	278,10	241,52	6,31
23	14,86	330,76	282,53	7,60
24	14,68	202,33	173,98	6,29

Tabela B.1. Valores das propriedades físicas avaliadas para cada corpo de prova.

(conclusão)

CP	Teor de umidade (%)	Densidade aparente (kg/m ³)	Densidade básica (kg/m ³)	Varição volumétrica (%)
25	14,85	228,36	196,47	5,71
26	14,83	266,08	220,23	9,54
27	14,99	376,32	267,21	7,72
28	14,93	314,69	267,47	7,65
29	14,80	370,70	315,49	7,23
30	15,05	380,40	325,61	7,55

Fonte: o autor.

Os resultados das propriedades mecânicas (resistência ao cisalhamento e à compressão paralela às fibras e módulo de elasticidade à compressão paralela às fibras) de cada corpo de prova de madeira serrada estão apresentados na Tabela B.2.

Tabela B.2. Valores das propriedades mecânicas de cada corpo de prova.

CP	Cisalhamento paralelo às fibras			Compressão paralela às fibras			
	Área (mm ²)	Força máxima (kN)	Resistência (MPa)	Área (mm ²)	Força máxima (kN)	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
1	2447,66	15,33	6,26	2424,36	44,68	18,43	9019,26
2	2457,14	8,54	3,47	2552,27	39,49	15,47	8391,90
3	2472,51	8,43	3,41	2520,53	49,18	19,51	11300,16
4	2472,12	13,00	5,26	2512,37	50,62	20,15	6342,33
5	2531,09	7,43	2,94	2566,81	38,27	14,91	8184,43
6	2463,85	11,61	4,71	2520,53	57,88	22,96	9579,45
7	2504,97	10,23	4,08	2542,43	38,08	14,98	9689,76
8	2403,93	7,07	2,94	2522,76	37,10	14,71	9849,90
9	2479,28	16,11	6,50	2448,41	50,75	20,73	11506,42
10	2494,50	11,84	4,75	2429,12	39,74	16,36	11512,28
11	2403,36	7,51	3,12	2545,49	45,84	18,01	5830,92
12	2507,00	8,72	3,48	2431,30	40,91	16,83	8284,65

Fonte: o autor.

APÊNDICE C – PROPRIEDADES OBTIDAS NO ENSAIO À FLEXÃO

Os resultados de densidade aparente (ρ_{ap}), momento fletor máximo ($M_{m\acute{a}x}$) e rigidez global (EI_{global}), para cada viga avaliada no ensaio de flexão, estão apresentados na Tabela C.1.

Tabela C.1. Propriedades obtidas para as vigas avaliadas neste estudo.

CP	ρ_{ap} (kg/m ³)				$M_{m\acute{a}x}$ (kN.cm)				EI_{global} (kN.cm ²)			
	MS	LVL-SR	LVL-1C	LVL-2C	MS	LVL-SR	LVL-1C	LVL-2C	MS	LVL-SR	LVL-1C	LVL-2C
1	285	361	399	411	27,58	23,02	27,72	32,14	11392	8971	10605	11722
2	525	364	366	394	30,08	27,88	23,63	29,00	13808	10085	9024	9977
3	304	398	414	448	25,54	28,64	26,88	38,91	10455	11285	10125	13033
4	353	424	381	432	23,52	33,46	26,40	34,83	9731	11261	9144	11502
5	335	366	382	383	18,31	26,92	26,64	29,47	8411	9564	9203	12590
6	313	368	371	404	27,64	19,32	25,37	32,01	10895	8315	7212	12310
7	317	362	403	382	32,12	21,72	30,11	25,69	11519	8671	11382	11960
8	296	379	388	381	24,75	26,28	32,57	30,99	10798	10030	10096	13236
9	255	359	388	363	26,89	22,76	28,67	32,35	9972	9554	9753	13473
10	362	367	394	402	33,72	25,01	26,21	33,07	9724	9549	7977	12654
11	304	406	401	411	25,10	22,11	26,81	34,18	11687	8486	7737	14540
12	230	380	377	379	22,07	26,83	28,72	33,94	8601	10432	9040	14050

Nota: MS: viga de madeira serrada; LVL-SR: viga de LVL sem o reforço; LVL-1C e LVL-2C: viga de LVL reforçada com uma e duas camadas de tecido de fibras de carbono, respectivamente.

Fonte: o autor.

APÊNDICE D – PROPRIEDADES OBTIDAS NO ENSAIO DE CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA

Os valores de resistência e percentual de ruptura na madeira de cada corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento na linha de cola estão apresentados na Tabela D.1.

Tabela D.1. Propriedades obtidas para as séries de LVL submetidas ao ensaio de cisalhamento na linha e cola.

CP	LVL-NR		LVL-R	
	Resistência (MPa)	Percentual de ruptura na madeira (%)	Resistência (MPa)	Percentual de ruptura na madeira (%)
1	5,57	81,20	3,78	93,24
2	4,63	100,00	4,67	94,44
3	4,37	100,00	4,21	100,00
4	5,83	68,09	5,28	92,56
5	5,08	100,00	4,82	85,08
6	4,96	100,00	5,61	94,48
7	5,54	100,00	6,31	95,35
8	5,30	100,00	5,67	94,01
9	5,31	84,18	5,25	92,19
10	5,51	87,78	3,79	94,36

NOTA: LVL-NR e LVL-R: LVL não reforçado e reforçado com CFRP, respectivamente.

Fonte: o autor.