CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS: REDUÇÃO DE FLECHAS EM VIGAS DE MADEIRA ATRAVÉS DE REFORÇO DA ESTRUTURA COM MATERIAIS COMPÓSITOS

Sustainable Constructions: reducing deflections in timber beams by strengthening with composite materials

Juscelina Rosiane Ferreira
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | juscelina.ferreira@uemg.br

Larissa Ferreira Lima
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | lariissa.liima.ferreiira@gmail.com

Tábata Santos Stefaneli
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade, Minas Gerais | tabatastefaneli@hotmail.com

Resumo

A madeira é um material de construção renovável que apresenta excelente resistência mecânica e baixo peso específico, conduzindo a um elevado índice de resistência, superior ao concreto e ao aço. Sua produção gera baixo impacto ambiental e consome pouca energia, sendo um material de baixo carbono. No entanto, a madeira é suscetível à fluência, um comportamento importante de se entender em estruturas submetidas a cargas de longa duração. Esse artigo avalia, experimentalmente, as flechas e o efeito da fluência em vigas de madeira das espécies pinus e maçaranduba reforçadas com compósitos de fibra de carbono e fibra de vidro. Os resultados evidenciaram a eficácia do reforço na redução das flechas. Embora, as vigas reforçadas apresentem acréscimos nos coeficientes de fluência ao longo do tempo, exibindo maiores valores, esse comportamento não significa necessariamente pior desempenho viscoelástico, mas sim que o parâmetro, é sensível a reduções iniciais muito expressivas na flecha.

Palavras-chave: Plástico reforçado por fibra de carbono; Plástico reforçado por fibra de vidro; Material de baixo carbono; Fluência; Deformação lenta.

ABSTRACT

Wood is a renewable construction material that presents excellent mechanical strength and low specific weight, leading to a high resistance index, superior to concrete and steel. Its production generates low environmental impact and consumes little energy, being a low-carbon material. However, wood is susceptible to creep, an important behavior to understand in structures subjected to long-term loads. This article experimentally evaluates the deflections and the effect of creep in pinus and maçaranduba wood beams strengthened by carbon fiber and fiberglass composites. The results demonstrated the effectiveness of the strengthening in reducing deflections. Although the strengthened beams present increases in the creep coefficients over time, exhibiting higher values, this behavior does not necessarily mean worse viscoelastic performance, but rather that the parameter is sensitive to very significant initial reductions in deflection.

Keywords: Carbon fiber reinforced plastic; Glass fiber reinforced plastic; low-carbon material; creep; cold flow.

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material muito utilizado na construção civil, destacando-se pelas excelentes propriedades mecânicas e baixo peso específico. Essas características resultam numa elevada relação entre resistência e peso (índice de resistência), superior ao concreto e ao aço (Pfeil e Pfeil, 2003; Falk, 2010). A produção de madeira gera baixo impacto ambiental, pois consome pouca energia. Além disso, a madeira é um material renovável, sendo reconhecida como uma opção de baixo carbono. O cultivo de florestas manejadas para produção de madeira contribui para o sequestro de carbono, auxiliando na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Tazmeen e Mir, 2024; Akiner *et al*. 2022; Bissoli-Dalvi, *et al.* 2017).

Uma das desvantagens da madeira como material de construção é efeito da fluência que é bastante significativo (Hering e Niemz, 2012; Granello e Palermo, 2019; Jockwer *et al.*, 2021). Fluência é o fenômeno do aumento lento da deformação do material ao longo do tempo, mesmo quando a carga aplicada se mantém constante, ou seja, a madeira é um material viscoelástico, cuja deformação sob esforços depende da duração do carregamento. A madeira quando solicitada por uma carga constante ao longo do tempo, tende a diminuir a resistência e aumentar a deformação, podendo gerar uma deformação permanente (plástica) e, em alguns casos, levar à ruptura do material.

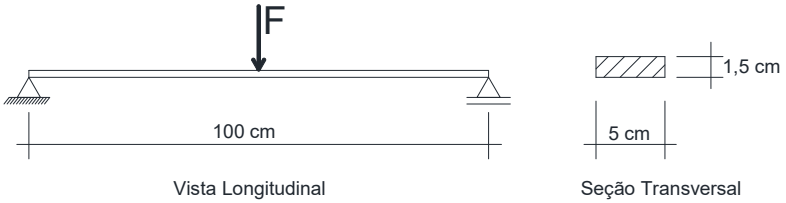
Nesse contexto, o uso de Plásticos Reforçados com Fibras (PRF) no reforço das estruturas de madeira tem se mostrado uma alternativa eficiente (Li *et al.*, 2014; Nadir et al, 2016; Ling *et al.*, 2020; Işleyen e Kesik, 2021; Corradi *et al.*, 2021; Balanco *et al.*, 2021; Saad e Lengyel, 2022; A; Albuja-Sánchez, *et al.* 2024), pois os PRF contribuem para a redução das deformações e para o aumento da capacidade de carga do elemento estrutural reforçado, aumentando a sua durabilidade. Os tecidos de PRF são maleáveis e fabricados de forma contínua permitindo o uso em locais de difícil acesso e em elementos estruturais de grandes dimensões. Além disso, as elevadas propriedades mecânicas do PRF e o baixo peso próprio permitem elevados ganhos de resistência sem aumentar as dimensões do elemento reforçado. O baixo peso próprio ainda facilita o transporte e a aplicação, contribuindo também com pouquíssima adição de carga à estrutura reforçada.

Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento viscoelástico de vigas de madeira das espécies Pinus e Maçaranduba, por meio da análise das flechas sob carregamento constante ao longo do tempo. Foram investigadas vigas reforçadas com PRFC (Plástico Reforçado com Fibras de Carbono) e PRFV (Plástico Reforçado com Fibras de Vidro), cujos desempenhos foram comparados com as vigas não reforçadas, utilizadas como referência.

2 METODOLOGIA

As vigas foram produzidas tendo 5cm de base (b), 1,5cm de altura (h) e 100cm de comprimento longitudinal (L), com apoios articulados e uma carga F aplicada no centro, caracterizando o ensaio de flexão em três pontos, conforme Figura 1.

Figura 1: Esquema estrutural do ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: Autoria própria

A Eq.1 apresenta a condição limite, considerando as tensões normais de flexão, para ruptura a tração:

$$f_{t0,m} \leq \frac{M}{w} \quad (1)$$

Onde: $f_{t0,m}$ = resistência média à tração paralela às fibras;

M = momento fletor máximo. Para a viga biapoiada com carga concentrada no meio do vão, $M = \frac{P \times L}{4}$;

w = módulo de resistência da seção transversal. Para seção retangular $w = \frac{b \times h^2}{6}$;

Substituindo as definições anteriores e fazendo os ajustes, chega-se a Eq.2:

$$P \geq \frac{2 \times f_{t0,m} \times b \times h^2}{3 \times L} \quad (2)$$

Adotando-se o valor recomendado pela NBR 7190 (ABNT, 1997), $f_{t0,m}$=138,5MPa e $f_{t0,m}$=66MPa, respectivamente, para maçaranduba e pinus, b=50mm, h=15mm e L=1000mm, obtém-se P=1039N e P=495N, respectivamente, para maçaranduba e pinus. Desta forma, foi adotada o mesmo valor de carga aplicada em todas as vigas, F=100N, correspondente a 10% da carga de ruptura P para a viga de maçaranduba e 20% para a viga de pinus. Para aplicação da carga F foi utilizado um cilindro de concreto, com massa em torno de 10kg (aproximadamente 100N), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Viga ensaiada com a carga aplicada.



Fonte: Autoria própria

A Tabela 1 apresenta a nomenclatura utilizada, os valores da carga F, que teve pequena variação conforme massa do cilindro de concreto, bem como as dimensões exatas da seção transversal de cada viga ensaiada.

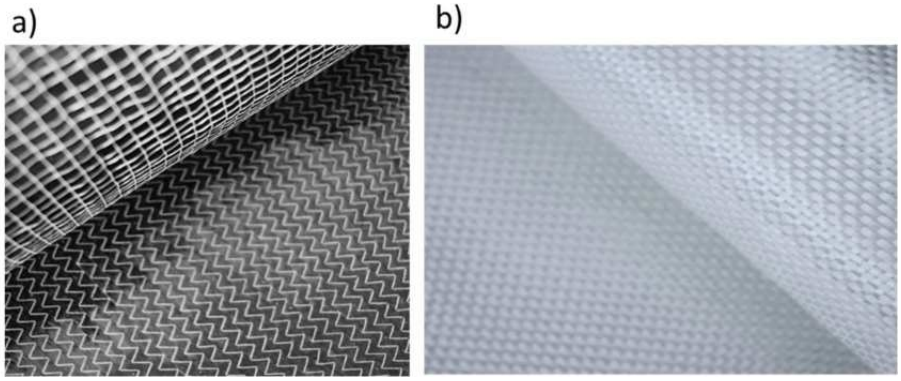
Tabela 1: Características das vigas ensaiadas.

Vigas	Nomenclatura	F(N)	b(mm)	h(mm)
Viga de Pinus de Referência	Pi-Ref	100,8	49,0	15,1
Viga de Pinus Reforçada com PRFC	Pi-PRFC	103,2	50,5	15,8
Viga de Pinus Reforçada com PRFV	Pi-PRFV	103,8	49,1	15,0
Viga de Paçaranduba de Referência	Ma-Ref	105,5	50,0	16,5
Viga de Maçaranduba Reforçada com PRFC	Ma-PRFC	101,6	52,0	16,1
Viga de Maçaranduba Reforçada com PRFV	Ma-PRFV	101,7	51,8	15,9

Fonte: Autoria própria

A aplicação de PRFC e PRFV na superfície da madeira foi feita pelo processo de laminação manual. A Figura 3 apresenta os tecidos unidirecionais de fibra de carbono e de vidro que foram usados para reforçar as vigas.

Figura 3: Tecidos unidirecionais usados para reforçar as vigas. a) PRVC e b) PRFV



Fonte: e-composites

O processo de laminação manual foi realizado considerando 60% de fibra e 40% de sistema resina epóxi mais endurecedor, em massa, proporções comumente utilizadas na literatura (Aklilu et al., 2018; Abdurohman et al., 2018; Qureshi, 2022). A Figura 4 apresenta a imagem de algumas vigas de madeira reforçadas.

Figura 4: Vigas de madeira reforçadas com PRFC e PRFV



Fonte: Autoria própria

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os valores experimentais da flecha (u) e o coeficiente de fluência (ϕ) para as vigas analisadas num intervalo de tempo de 362,15h (aproximadamente 15 dias). O coeficiente de fluência (ϕ) é calculado pela razão entre a flecha ao longo do tempo (u_t) e a flecha imediata (u_0).

Tabela 2: Resultados de flecha e coeficiente de fluência das vigas ensaiadas.

tempo (h)	uPi-Ref (mm)	ϕPi-Ref	uPi-PRFC (mm)	ϕPi-PRFC	uPi-PRFV (mm)	ϕPi-PRFV	uMa-Ref (mm)	ϕMa-Ref	uMa-PRFC (mm)	ϕMa-PRFC	uMa-PRFV (mm)	ϕMa-PRFV
0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,0	0,00	0,0		0,0		0,0	
0,10	18,1	1,00	10,3	1,00	13,3	1,00	11,9	1,00	0,0		4,8	
1,10	18,1	1,00	11,9	1,16	13,9	1,05	12,4	1,04	0,0		4,8	1,00
2,10	18,3	1,01	12,7	1,23	13,9	1,05	12,9	1,08	7,9		4,9	1,02
3,10	18,3	1,01	12,7	1,23	14,1	1,06	12,9	1,08	8,1	1,00	4,9	1,02
4,10	18,8	1,04	12,9	1,25	14,3	1,08	13,0	1,09	8,1	1,03	5,1	1,06
5,10	19,1	1,06	13,0	1,26	14,3	1,08	13,2	1,11	8,1	1,03	5,5	1,15
6,10	19,2	1,06	13,0	1,26	14,7	1,11	13,2	1,11	8,5	1,03	5,5	1,15
7,10	19,4	1,07	13,1	1,27	14,7	1,11	13,4	1,13	8,7	1,08	5,7	1,19
8,10	19,7	1,09	13,1	1,27	14,5	1,09	13,4	1,13	8,8	1,10	5,7	1,19
24,10	20,8	1,15	13,2	1,28	16,2	1,22	13,6	1,14	9,3	1,11	6,2	1,29
28,10	22,5	1,24	13,6	1,32	16,8	1,26	13,7	1,15	11,0	1,18	6,9	1,44
32,10	24,2	1,34	13,6	1,32	17,3	1,30	14,0	1,18	11,0	1,39	6,9	1,44
102,20	35,2	1,94	20,1	1,95	20,0	1,50	16,1	1,35	11,9	1,39	7,2	1,50
126,20	37,0	2,04	22,8	2,21	28,1	2,11	18,1	1,52	12,1	1,51	10,8	2,25
170,10	37,2	2,06	23,3	2,26	33,3	2,50	19,3	1,62	12,2	1,53	10,8	2,25
193,10	37,6	2,08	23,5	2,28	33,6	2,53	19,8	1,66	12,2	1,54	11,0	2,29
267,45	40,9	2,26	24,1	2,34	39,3	2,95	21,1	1,77	14,3	1,54	11,0	2,29
289,00	42,8	2,36	26,4	2,56	43,1	3,24	21,1	1,77	14,8	1,81	11,1	2,31
312,15	43,9	2,43	26,6	2,58	43,6	3,28	21,7	1,82	15,3	1,87	11,1	2,31
336,25	43,9	2,43	27,1	2,63	43,6	3,28	22,0	1,85	16,1	1,94	11,2	2,33
363,15	44,7	2,47	27,1	2,63	43,8	3,29	22,0	1,85	16,1	2,04	12,2	2,54

Fonte: Autoria própria

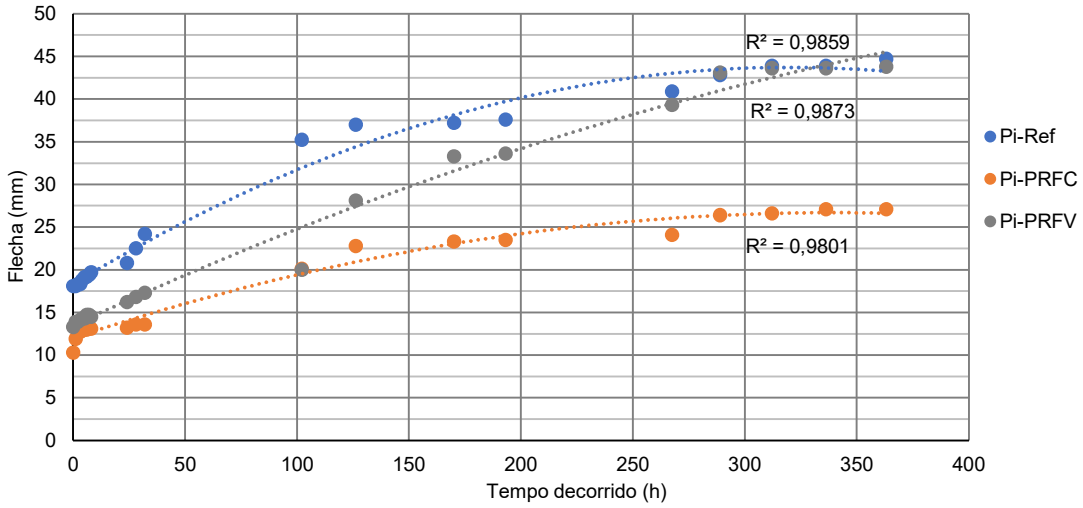
As vigas de referência Pi-Ref, Ma-Ref apresentaram flechas imediatas experimentais iguais a 18,1mm e 11,9mm, respectivamente, evidenciando a maior flecha da viga de pinus devido menor módulo de elasticidade dessa espécie. As vigas reforçadas Pi-PRFC, Pi-PRFV, Ma-PRFC e Ma-PRFV apresentaram flechas imediatas iguais a 10,3mm, 13,3mm, 7,9mm e 4,8mm, respectivamente. Esses valores correspondem a reduções, em relação às vigas de referência de 43,1%, 36,1%, 33,6% e 58,8%, respectivamente. Apesar dos resultados indicarem reduções significativas nas flechas imediatas com o uso dos compósitos, não foi possível identificar uma tendência clara quanto à superioridade entre os materiais de reforço utilizados. O PRFC apresentou melhor desempenho na espécie pinus, enquanto o PRFV foi mais eficaz na espécie maçaranduba.

Na análise do coeficiente de fluência (ϕ), observa-se que todas as vigas apresentaram aumento progressivo de ϕ, indicando deformações adicionais ao longo do tempo sob carregamento constante. Entretanto, as vigas reforçadas, apresentaram maiores valores de ϕ, mesmo tendo menores flechas. Embora o reforço tenha reduzido significativamente a flecha imediata (u_0), essa redução inicial acentuada faz com que qualquer acréscimo absoluto na flecha ao longo do tempo ($u_t - u_0$) tenha um impacto proporcionalmente maior no

valor do coeficiente de fluência. Esse comportamento não significa necessariamente pior desempenho viscoelástico, mas sim que o parâmetro ϕ, por ser uma razão relativa, é sensível a reduções iniciais muito expressivas na flecha.

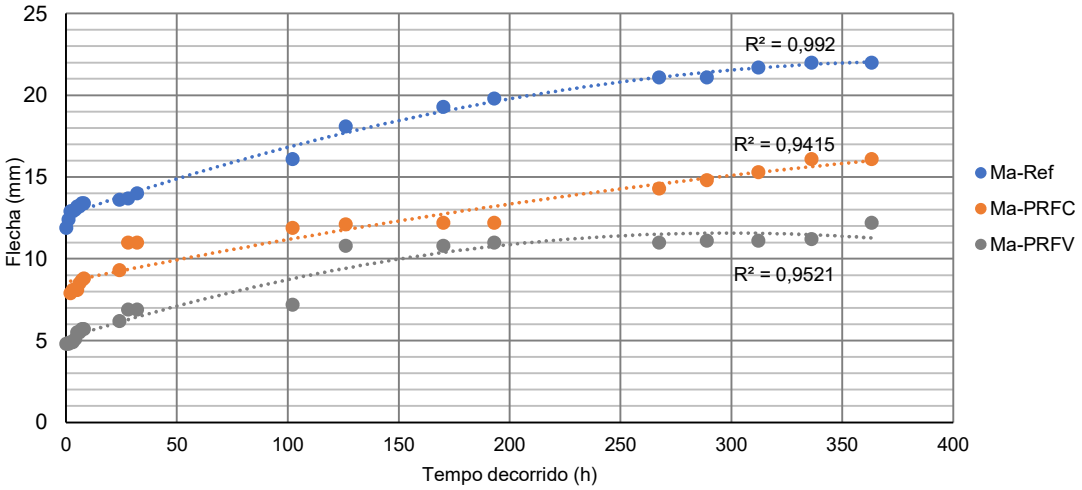
As Figuras 5 e 6 apresentam os valores de flecha ao longo do tempo para as vigas de maçaranduba e pinus, respectivamente, onde foi ajustada uma curva polinomial de grau 2, para os resultados.

Figura 5: Valores de flecha em relação ao tempo para as vigas de pinus ensaiadas.



Fonte: Autoria própria

Figura 6: Valores de flecha em relação ao tempo para as vigas de maçaranduba ensaiadas.



Fonte: Autoria própria

Analisando as vigas de pinus, observa-se que o ajuste da curva polinomial foi muito bom para todas as configurações, com coeficientes de determinação superiores a 0,98. O ajuste polinomial para as vigas de maçaranduba também foi satisfatório, com o melhor desempenho observado na viga de referência (R^2=0,992). No entanto, os valores de R^2 para as vigas reforçadas (0,9415; PRFV=0,9521) foram menores em comparação às vigas de pinus.

4 CONCLUSÃO

Os resultados evidenciaram a eficácia do reforço com PRF na redução das flechas em vigas de madeira. A significativa diminuição das deformações imediatas, demonstra o potencial dos PRF para aumentar a rigidez e prolongar a vida útil das estruturas de madeira. Embora, as vigas reforçadas apresentem acréscimos nos coeficientes de fluência ϕ ao longo do tempo, exibindo maiores valores de ϕ, esse comportamento não significa necessariamente pior desempenho viscoelástico, mas sim que o parâmetro ϕ, é sensível a reduções iniciais muito expressivas na flecha.

Tal comportamento reforça a viabilidade do uso de reforços com PRF como uma estratégia para superar limitações da madeira em aplicações estruturais mais exigentes, notadamente sua suscetibilidade à fluência. Considerando-se que a madeira é um material renovável, de baixa pegada de carbono e capaz de promover o desenvolvimento sustentável quando proveniente de florestas manejadas, a incorporação de reforços com PRF se apresenta como uma solução promissora para aliar desempenho estrutural à sustentabilidade ambiental, favorecendo sua aplicação em projetos alinhados à transição para uma economia de baixo carbono.

REFERÊNCIAS

ABDUROHMAN, K.; T SATRIO, T.; MUZAYADAH, N. L. TETEN, A. A comparison process between hand lay-up, vacuum infusion and vacuum bagging method toward e-glass EW 185/lycal composites. **Journal of Physics: Conference Series**. 1130. p1-11. 2018. doi :10.1088/1742-6596/1130/1/01201.

AKINER, Muhammed Ernur; AKINER; İlknur AKINER; Nurdan AKINER; Valentina Zileska, PANCOVSKA. Using wood as a new generation building material in the context of sustainable development. Zastita Materijala 63(1) 68 - 78 (2022). ISSN 0351-9465. https://doi.org/10.5937/zasmat2201068A.

AKLILU, G.; ADALI, S., BRIGHT, G. Temperature effect on mechanical properties of carbon, glass and hybrid polymer composite specimens. International Journal of Engineering Research in Africa. p. 119-138. 2018. DOI: 10.4028/www.scientific.net/JERA.39.119

ALBUJA-SÁNCHEZ, J.; DAMIÁN-CHALÁN, A.; ESCOBAR, D. Experimental studies and application of fiber-reinforced polymers (FRPs) in civil infrastructure systems: a state-of-the-art review. **Polymers**, v. 16, n. 2, 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190. Projeto Estruturas de Madeira, Rio de Janeiro, 1997. 107p.

__. NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022, 81p.

BISSOLI-DALVI, Márcia; FERRES, Soyana Corrêa; ALVAREZ, Cristina Engel de; FUICA, Gerardo Erich Saelzer. Avaliação da Sustentabilidade da Madeira por Meio da Ferramenta ISMAS. Floresta e Ambiente. v.24, 2017. ISSN 2179-8087. Doi: https://doi.org/10.1590/2179-8087.077214.

BALANCO, Giovana Gobatto; RODRIGUES, Edson Fernando Castanheira; AQUINO, Vinicius Borges de Moura; PANZERA, Túlio Hallak; ROCCO LAHR, Francisco Antonio; CHRISTOFORO, André Luis. Influence of reinforcement on wood tensile strength submitted to weathering. **Revista Árvore**. 45. 2021.

CORRADI, M.; VEMURY, C.M.; EDMONDSON, V.; POOLOGANATHAN, K.; NAGARATNAM, B. Local FRP reinforcement of existing timber beams. **Composites Structures**. 2021, 258, 113363.

E-COMPOSITES. Tecido de fibra de carbono unidirecional/ Tecido de fibra de vidro unidirecional. 2024. https://www.e-composites.com.br/

FALK RH. **Wood as a Sustainable Building Material**. In: Forest Products Laboratory. Wood handbook: wood as an engineering material. U.S. Department of Agriculture Forest Service. 2010. ISBN-9781484859704.

FIGUEIREDO, Ana Carolina Carvalho; SHIGUE, Erich Kazuo. Madeira na construção civil sustentável: associações e certificações ambientais. **IX Encontro nacional, VII Encontro latinoamericano, II Encontro latino-americano e europeu sobre edificações e comunidades sustentáveis.** 10 a 13 de Maio de 2017.

GRANELLO, G; PALERMO, A. Creep in timber: research overview and comparison between code provisions. **New Zealand Timber Design Journal**. V. 27, N. 1, 2019.

HERING, S.; NIEMZ, P. Moisture-dependent, viscoelastic creep of european beech wood in longitudinal direction. **European Journal of Wood Products**. 70: 667–670. 2012. https://doi.org/10.1007/s00107-012-0600-4.

IŞLEYEN, Ü. K.; KESIK, H. İ. Experimental and numerical analysis of compression and bending strength of old wood reinforced with CFRP strips. **Structures**, v. 33, n. May, p. 259–271, 2021.

JOCKWER, Robert; GRONQUIST, Philippe; FRANGI, Andrea. Long-term deformation behaviour of timber columns: Monitoring of a tall timber building in Switzerland. **Engineering Structures.** Vol. 234, 2021. Doi: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.11185

LI, Y.F.; TSAI, M.J.; WEI, T.F.; WANG, W.C. A study on wood beams strengthened by FRP composite materials. Construction and Building Materials 2014, 62, 118–125

LING, Z., LIU, W., SHAO, J. Experimental and theoretical investigation on shear behaviour of small-scale timber beams strengthened with fiber-reinforced polymer composites. **Composite Structures**, 240, 111989. 2020. DOI 10.1016/j.compstruct.2020.111989

NADIR, Y.; NAGARAJAN, P.; AMEEN, M. Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. Constr. Build. Mater. 2016, 112, 547–555

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de Madeira**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 6ª edição. Rio de Janeiro, 2003.

QURESHI, J. A Review of Fibre Reinforced Polymer Structures. **Fibers**. 2022, 10, 27. https://doi.org/10.3390/fib10030027

SAAD, K.; LENGYEL, A. Strengthening Timber Structural Members with CFRP and GFRP: A State-of-the-Art Review. Polymers 2022, 14, 2381. https://doi.org/10.3390/polym14122381

TAZMEEN, T.; MIR, F. Q. Sustainability through materials: A review of green options in construction. **Results in Surfaces and Interfaces**. V.14. 2024. https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100206

TONG, Danyang; BROWN, Susan Alexis; CORR, David; CUSATIS, Gianluca. Wood creep data collection and unbiased parameter identification of compliance functions. **Holzforschung**. 74(11): 1011–1020. 2020. https://doi.org/10.1515/hf-2019-0268.