

## **Estudo do momento de plastificação de cavilhas reforçadas com fibra de vidro**

Heloise Ferreira Santos<sup>1</sup>; Filipe Luigi Dantas Lima Santos<sup>2</sup>; Vinícius de Sousa Lima<sup>2</sup>; Lucas Lima Costa<sup>2</sup>; Rita Dione Araújo Cunha<sup>2</sup>; Sandro Fábio César<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador/BA, Brasil; <sup>2</sup> Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPEC/UFBA), Salvador/BA, Brasil – engheloisferreira@gmail.com.

**Resumo:** O desenvolvimento dos pinos metálicos reduziu a popularidade das cavilhas de madeira como conectores. Este trabalho apresenta o reforço com fibra de vidro como uma alternativa para aumentar a capacidade ao momento de plastificação, fazendo com que sua utilização seja retomada. O presente estudo investiga as propriedades mecânicas das cavilhas de madeira reforçadas com fibras de vidro em matriz de resina epóxi. A pesquisa utilizou cavilhas de madeira de maçaranduba (*Manilkara spp.*), realizando ensaios de flexão, a partir do método da viga curta, com diferentes camadas de reforço. Os resultados indicam que o processo de reforço é capaz de aumentar a rigidez e o momento de plastificação das peças.

**Palavras-chave:** *conectores, escoamento, maçaranduba.*

### **Study on the yield moment capacity of timber dowels reinforced with glass fiber reinforcement polymer (GFRP)**

**Abstract:** The advent of mechanical fasteners has led to a decline in the use of timber dowels as connectors. This study proposes glass fiber reinforcement as an alternative method to enhance the yield moment capacity of timber dowels, with the aim of reintroducing them into modern construction practices. The research explores the mechanical properties of timber dowels reinforced with glass fibers in an epoxy resin matrix. Timber dowels made from maçaranduba wood (*Manilkara spp.*) were used, and bending tests were conducted using the short beam method with varying layers of reinforcement. The findings demonstrate that the reinforcement process increases the stiffness and yield moment capacity of the dowels.

**Keywords:** *timber connection, yield, maçaranduba.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Segundo Pereira (2019), com o avanço da metalurgia e o desenvolvimento de novos métodos de produção e ligas metálicas, as cavilhas de madeira foram gradualmente substituídas por conectores metálicos. Esse fenômeno resultou na redução do número de estudos focados em ligações cavilhadas. Por outro lado, diversos trabalhos recentes têm buscado apresentar as cavilhas de madeira como

uma alternativa de ligação resistente à oxidação (Teodorescu *et al.*, 2020; Mehra, 2020; O'Ceallaigh *et al.*, 2021; Almeida e Moura, 2022; Camargo, 2023). O presente trabalho propõe o reforço de cavilhas de madeira com o envolvimento de tecido de fibra de vidro (GFRP) em matriz de resina epóxi como uma alternativa de conector em estruturas modernas de madeira.

A atualização da norma brasileira de projetos em madeira, a NBR 7190-1 (ABNT, 2022), incorporou os critérios estendidos do Modelo Europeu de Cedência e avalia a probabilidade de falha de uma ligação em função de três propriedades relacionadas aos conectores: a resistência ao embutimento, a resistência ao arrancamento e a capacidade resistente ao momento de plastificação. Tendo como hipótese que as fibras sintéticas colaboram apenas na resistência à tração de elementos reforçados, este trabalho delimitou a avaliação da influência do reforço de GFRP em relação à capacidade resistente ao momento de plastificação.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Seleção do material**

Para a produção das cavilhas foi selecionado peças de madeira certificada de maçaranduba (*Manilkara spp.*) com seção 5 x 15 cm<sup>2</sup>, obtida a partir de madeiras da região do Litoral Norte da Bahia. O beneficiamento das cavilhas foi feito em carpintaria do Laboratório de Madeiras da UFBA (LABMAD/UFBA). Para o reforço, foi utilizado tecido de fibra de vidro de nome comercial WR-200, fornecido pela Texiglass. O tecido possui tecelagem bidirecional uniforme (50%/50%), sarja em desenho 3x1, disposição entre trama e urdume de 0°/90° e densidade superficial de 200 g/cm<sup>2</sup>. A fase matriz foi composta pela resina epóxi ARALDITE® GY 260 e o endurecedor ARADUR 450 como agente de cura.

### **2.2 Reforço da cavilha com GFRP em matriz epóxi**

O processo de confecção se iniciou com a aplicação de fita crepe no tecido para conter a resina no processo de colagem (Figura 1a). A preparação da dosagem dos componentes A (resina) e B (endurecedor) da resina epóxi foi feita manualmente, seguindo a proporção de 2:1 (A:B). O tempo de mistura manual foi de 5 minutos em

condições de temperatura média entre 24°C e 30°C e umidade relativa do ar entre 70% e 80%.

A aplicação da resina nas cavilhas foi feita com pincel (Figura 1b). Em seguida, o tecido foi envolvido ao redor da cavilha de modo a evitar a formação de bolhas de ar (Figura 1c). O tempo de cura da resina em cada camada foi de 24 horas. Por fim, a fita crepe foi retirada, resultando no produto finalizado (Figura 1d).

**Figura 1.** Processo de reforço das cavilhas de maçaranduba.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: (Autores)

### 2.3 Ensaio de flexão da cavilha

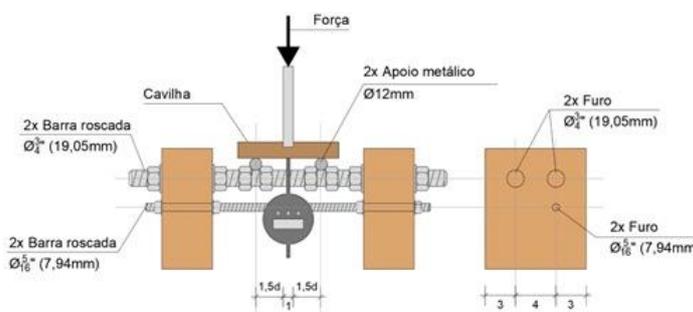
O ensaio da flexão das cavilhas, reforçadas e não reforçadas, foi realizada através do ensaio de flexão pelo “método da viga curta”, apresentado na norma norte-americana ASTM D4475 (ASTM, 2021) e adaptado por Thomson (2010) para cavilhas de madeira. O ensaio foi conduzido em uma máquina de ensaios universal eletrohidráulica analógica WPM, com capacidade máxima de 30 toneladas, equipada com um relógio comparador Digimess, com faixa de medição de 0 a 25 mm e precisão de 0,01 mm, aplicando carregamento monotônico até a ruptura. O Quadro 1 e a Figura 2 apresentam, respectivamente, a quantidade de corpos de prova para cada grupo de ensaio e o esquema do ensaio.

**Quadro 1.** Corpos de prova relacionados ao teste de flexão da cavilha.

Grupo	d (mm)	Reforço	Amostragem
C	16	Sem reforço	6
2R	16	1 camada GFRP	6
3R	16	2 camadas GFRP	6
<b>Total</b>			<b>18</b>

Fonte: (Autores)

**Figura 2.** Esquema de ensaio de flexão da cavilha.



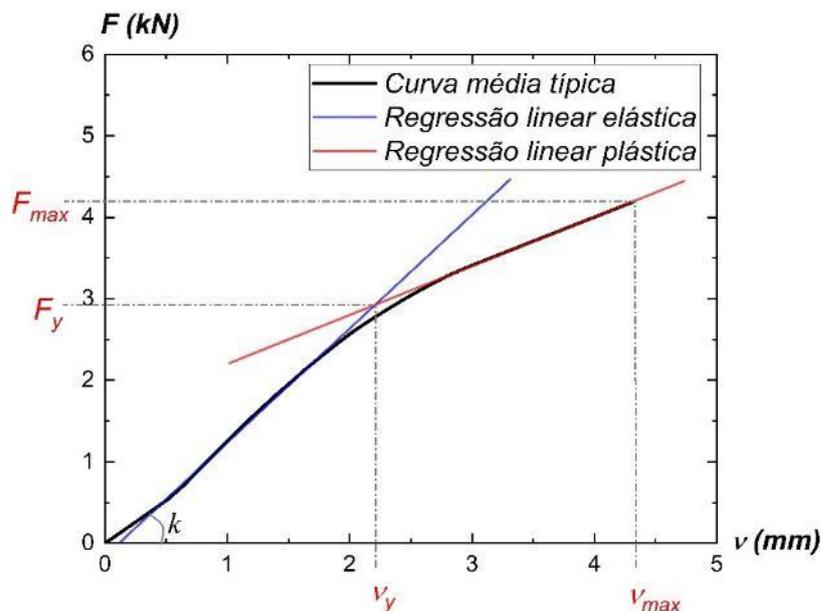
Fonte: (Autores)

Thomson (2010) propôs a eq. 1 para estimar o momento resistente de cedência efetivo ( $M_{y,eff}$ ) em função do diâmetro ( $d$ ) e da força de escoamento ( $F_y$ ) a partir do método da viga curta. O fundamento da eq. 1 é explicado nos trabalhos de Thomson (2010) e Jockwer *et al.* (2018).

$$M_{y,eff} = \frac{3}{8} F_y \cdot d \quad \text{eq. 1}$$

O ponto de escoamento ( $F_y$ ) se deu pela interseção das retas de regressão linear as zonas elástica e plástica. A rigidez ( $k$ ) se deu pela inclinação da regressão linear elástica. O exemplo da curva típica do ensaio de flexão, demonstrando a interseção entre as retas de regressão e a demonstração da rigidez ( $k$ ) está representado na Figura 3.

**Figura 3.** Exemplo de curva típica do ensaio de flexão e determinação das variáveis.



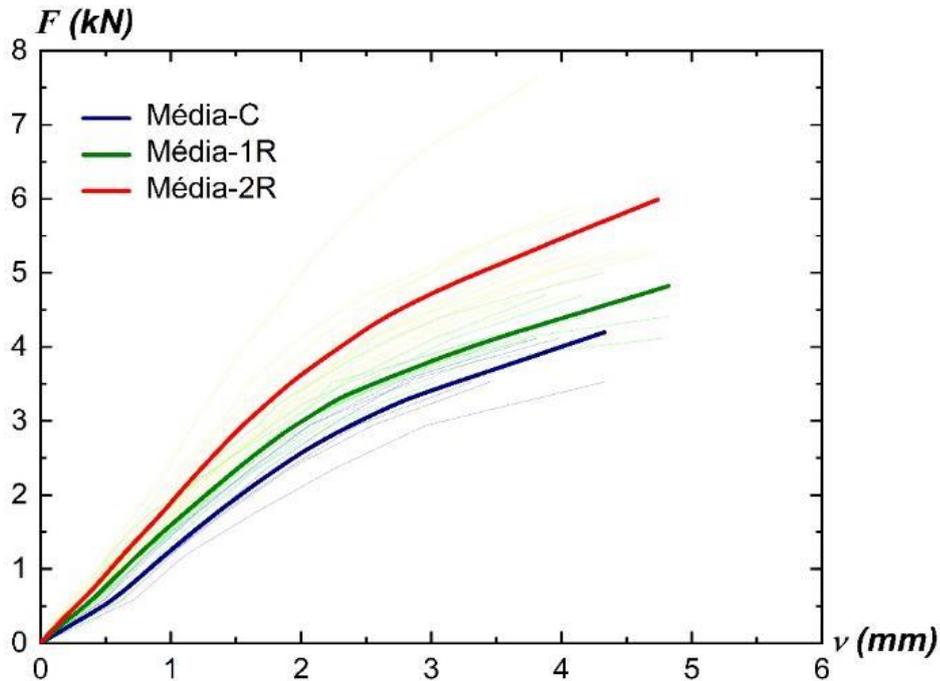
Fonte: (Autores)

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta as curvas médias da força ( $F$ ) – deslocamento ( $v$ ) do ensaio de flexão das cavilhas. O grupo C representa as cavilhas sem reforço e os

grupos 1R e 2R representam as cavilhas com uma e duas camadas de reforço, respectivamente.

**Figura 4.** Curva  $F - v$  das cavilhas de 16 mm submetidas ao ensaio de flexão do pino.



Fonte: (Autores)

Conforme ilustrado na Figura 4, os corpos de prova do grupo C (sem reforço) passaram por uma acomodação até o instante de 0,5 mm de deslocamento, seguida por uma fase elástica que se estendeu de 0,5 mm a 2,0 mm. Posteriormente, se observou uma fase plástica com ligeiro ganho de resistência entre 2,0 mm e 4,4 mm de deslocamento. Por fim, houve a ruptura dos corpos de prova.

Para as cavilhas reforçadas, observou-se uma alteração no comportamento da curva em função da quantidade de reforço utilizado. A cavilha sem reforço (C) apresentou uma rigidez média ( $k_{méd}$ ) na zona elástica de 1,37 kN/mm, a reforçada com uma camada (1R) alcançou 1,57 kN/mm apresentando um aumento de cerca de 15% quando comparada com as cavilhas não reforçadas (C). As cavilhas com duas camadas de reforço obtiveram uma rigidez média de 1,91 kN/mm apresentando um aumento de, aproximadamente, 22% quando comparadas com as cavilhas com uma camada de reforço (1R) e 39% quando comparadas com as cavilhas não reforçadas (C). No que diz respeito ao ganho de resistência. Comparando as cavilhas sem reforço com as reforçadas, obteve-se cerca de 7% de aumento da força máxima média

( $F_{max,méd}$ ) das cavilhas com uma camada de reforço (1R) e, aproximadamente, 51% de aumento da força máxima média ( $F_{max,méd}$ ) das cavilhas com duas camadas de reforço (2R). Os dados desta análise estão presentes na Tabela 1.

**Tabela 1.** Resultados do Ensaio de Flexão (Método da viga curta).

		<b>D16</b>		
		<b>C</b>	<b>1R</b>	<b>2R</b>
$d_{méd}$	(mm)	15,85	16,45	16,85
$F_{y,méd}$	(kN)	2,93	3,33	4,13
$F_{max,méd}$	(kN)	3,92	4,21	5,92
$M_{y,eff,méd}$	(kN.mm)	17,40	20,55	26,10
$k_{méd}$	(kN/mm)	1,37	1,57	1,91

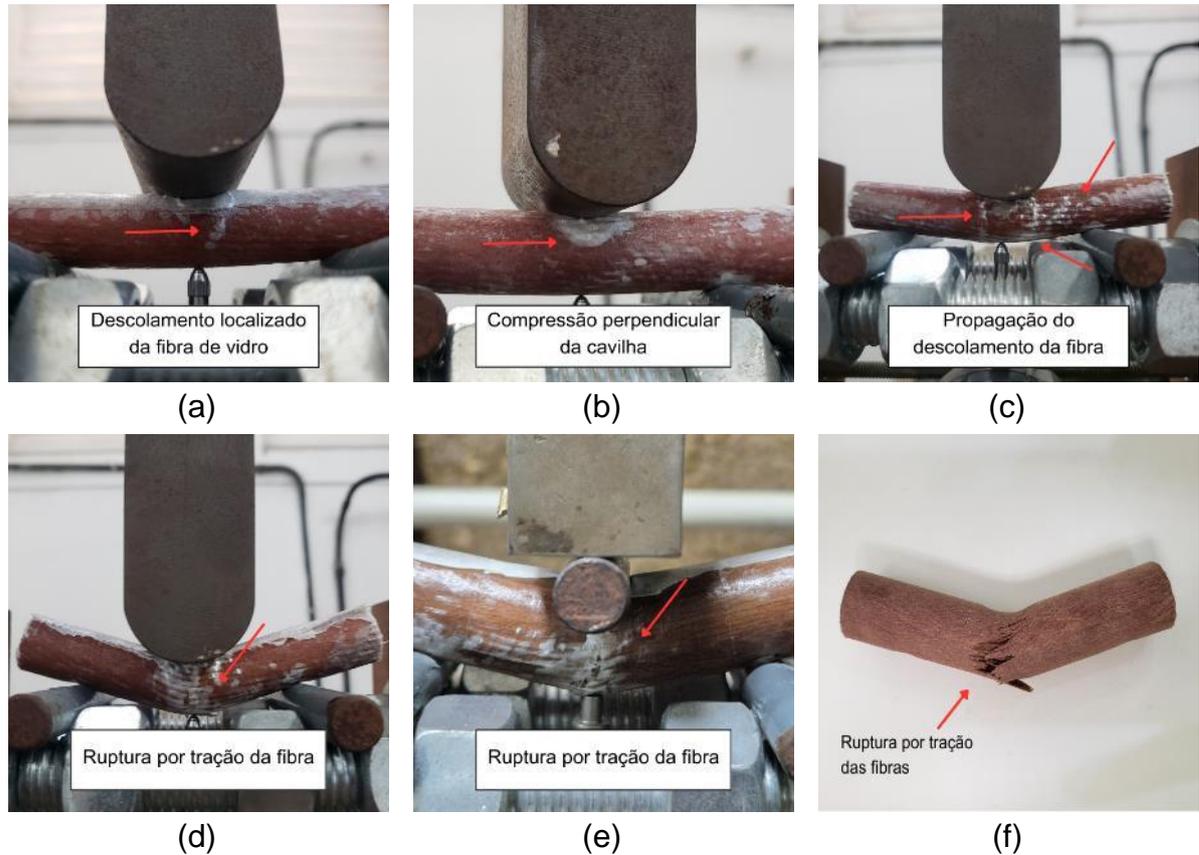
**NOTA:**  $d_{méd}$ = diâmetro médio;  $F_{y,méd}$ = força de escoamento média;  $F_{max,méd}$ = força máxima média;  $M_{y,eff,méd}$ = momento de plastificação efetiva médio;  $k_{méd}$ = rigidez média.

Fonte: (Autores)

A Figura 4 e os dados numéricos presentes na Tabela 1 indicam um aumento, em relação ao grupo C, da força de escoamento média ( $F_{y,méd}$ ) de, aproximadamente, 14% para o grupo 1R e 41% para o grupo 2R. O aumento da força de escoamento média interfere diretamente nos valores do momento de plastificação efetiva médio ( $M_{y,eff,méd}$ ). Portanto, a aplicação da fibra de vidro como reforço nas cavilhas de madeira influencia diretamente no momento de plastificação efetiva, tendo um aumento de, aproximadamente, 50% comparando as cavilhas sem reforço (C) com as cavilhas reforçadas com duas camadas (2R).

Também foi observado que os modos de ruptura das cavilhas reforçadas (1R e 2R) foram caracterizados pela seguinte sequência: início da falha no descolamento localizado da fibra (Figura 5a), seguida pelo esmagamento por compressão perpendicular da cavilha (Figura 5b), a propagação da falha na junção adesiva (Figura 5c), por fim, a ruptura por tração da fibra antecedendo a ruptura da cavilha de madeira (Figura 5d e 5e). Por outro lado, as cavilhas não reforçadas (C) foram caracterizadas pelo modo de ruptura por tração das fibras (Figura 5f).

**Figura 5.** Esquema da seqüência dos modos de ruptura das cavilhas.



Fonte: (Autores)

#### 4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir com a realização deste trabalho que:

- O processo de reforço das cavilhas de madeira influencia no momento de plastificação efetiva ( $M_{y,eff}$ ), resultando em um aumento de 50% com o acréscimo de duas camadas de fibra de vidro nas cavilhas.
- O reforço das cavilhas também contribuiu para o aumento da rigidez ( $k$ ) e no ganho de resistência, aumentando 39% da rigidez e 51% da força máxima ( $F_{max}$ ) quando duas camadas de fibra de vidro foram aplicadas.
- Os resultados sugerem a possibilidade de usar a cavilha de madeira reforçada como conector em ligações de madeira-madeira e madeira-concreto, porém sugere-se a condução de novas pesquisas da aplicação do compósito.

## 5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D4475-21**: Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By the Short-Beam Method. West Conshohocken, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-1**: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022, 93 p.

CAMARGO, M. V. **Avaliação experimental do desempenho mecânico de cavilhas de madeira engenheirada**. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2023.

O'CEALLAIGH, C.; CONWAY, M.; MEHRA, S. *et al.* Numerical investigation of reinforcement of timber elements in compression perpendicular to the grain using densified wood dowels. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 122990, 2021.

ALMEIDA, A. C.; MOURA, J. D. Mechanical Behavior of GFRP Dowel Connections to Cross Laminated Timber-CLT Panels. **Forests**, vol. 13, no. 2, p. 1–13, 2022.

JOCKWER, R.; WIEHLE, P.; PALMA, P. *et al.* Structural behaviour and design of timber connections with dowels and slotted-in plates made of bamboo composite. In: Proceedings of WCTE 2018, Seoul, **Anais [...]**, 2018.

MEHRA, S. **Development of Non-metallic and adhesive-free timber-timber moment connections using compressed wood connectors**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), National University of Ireland Galway, 332 p., 2020.

PEREIRA, M. **Painel estrutural de madeira maciça tipo DCLT: estudo experimental, analítico e numérico de dois painéis de lamelas cruzadas com ligações cavilhadas**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

TEODORESCU, I.; PEREIRA, B.; AQUINO, C. *et al.* **Experimental evaluation of dowel-type timber joints with wooden dowels**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, vol. 173, no. 12, p. 927–938, 2020.

THOMSON, A. **The structural performance of non-metallic timber connections**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de Bath, Bath, Reino Unido, 2010.