



CAVILHAS DE MADEIRA REFORÇADAS COM FIBRA DE CARBONO E MATRIZ EPÓXI

REINFORCEMENT OF WOODEN DOWELS WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMER

Silva, Gabriel ^{(1)*}; Sena, Caroline ⁽¹⁾; Santos, Filipe ⁽¹⁾; Cunha, Rita ⁽²⁾; César, Sandro Fábio ⁽³⁾

⁽¹⁾ Mestrando(a). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil

⁽²⁾ Profª. Dra. Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil

⁽³⁾ Prof. Dr. Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil

* Contato: gbrdourado@gmail.com

CÓDIGO: 4477686

Resumo

Os pontos críticos das estruturas de madeira são as suas ligações, pois o seu comportamento mecânico pode condicionar o desempenho global das estruturas. Os materiais comumente empregados em uma ligação de madeira são: o aço, os derivados de madeira e, naturalmente, a madeira maciça. Entretanto, os conectores metálicos estão sujeitos ao fenômeno da corrosão. A corrosão dos conectores metálicos compromete a durabilidade da ligação, influenciando na segurança da estrutura e no desempenho sustentável da construção. Neste cenário, as cavilhas de madeira surgem como uma possível alternativa ao emprego dos conectores metálicos em ligações de elementos estruturais de madeira. Este trabalho tem como o objetivo analisar o reforço de cavilhas de madeira com polímero reforçado com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* – CFRP), utilizando cavilhas confeccionadas com madeira de Maçaranduba (*Manilkara sp.*), através do ensaio de flexão estática. Para isso, foram realizados ensaios experimentais de resistência mecânica das cavilhas reforçadas e não reforçadas. Como resultado, encontrou-se um desempenho superior na resistência mecânica das cavilhas reforçadas com fibras de carbono.

Palavras-chave: Ligações. Cavilhas. Cavilhas de Madeira. Estruturas de madeira.

Abstract

The critical points of timber structures are their connections, since their behavior can condition the overall performance of the structures. The materials constituting a connection in the wood are: steel, wood derivatives and, of course, wood. However, metal connectors are subject to the phenomenon of corrosion. Corrosion of metal connectors compromises bonding durability, influencing structure and resistance to construction. In this context, wood dowels appear as an alternative task to the use of metal connectors in connections of wood elements. This work aims to propose the reinforcement of wood dowels with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using pegs made from Maçaranduba wood (*Manilkara sp.*). Physical and mechanical characterization of the studied wood were carried out, contributing to a greater and better use of the wood as the structural element. Experimental tests of mechanical strength of the bolts and reinforcements was also produced. As a result, superior performance was found in the mechanical strength of reinforced dowels by the proposed technique.

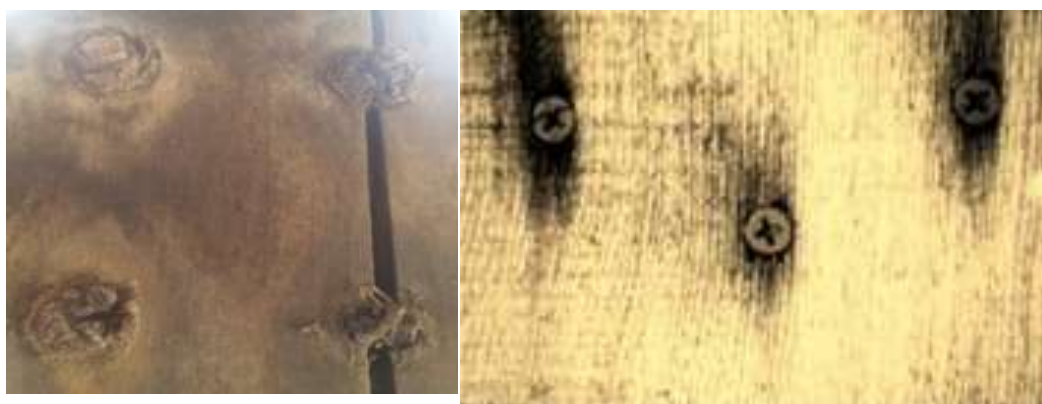
Keywords: Connections. Dowel-type connections. Timber structures.



1. INTRODUÇÃO

Os pinos e parafusos metálicos utilizados nas ligações entre elementos estruturais de madeira estão sujeitos a oxidação. Nas regiões litorâneas do Brasil, onde a exposição dos elementos de ligação aos sais provenientes do mar e a umidade é maior, o processo de corrosão é acelerado.

A corrosão dos conectores metálicos compromete a durabilidade da ligação, influenciando na segurança da estrutura e no desempenho sustentável da construção. A Figura 1 apresenta a degradação dos parafusos metálicos e surgimento de fissura paralela às fibras no eixo de furação dos conectores em uma ligação estrutural de madeira de edificação próxima a costa brasileira.



a) Degradação de conectores metálicos e formação de fissura em ligação estrutural de madeira.

b) Manchas na madeira por corrosão.

Figura 1 - Degradação de conectores metálicos e formação de patologias na madeira. Fonte: a) o autor; b) (SHUPE et al., 2008).

A degradação dos conectores metálicos pela corrosão é um problema de real importância, com implicações que podem colocar em risco a estabilidade global da estrutura. A necessidade de adotar um material mais resistente a ação das intempéries exige a procura por materiais mais eficientes que possam cumprir o papel de suportar as solicitações provenientes das ligações entre os elementos estruturais e também atender ao desempenho exigido pelas normas técnicas vigentes.

A utilização de cavilhas em ligações de madeira tem aparecido como uma boa alternativa para conexões devido as vantagens ambientais associadas ao uso da madeira como matéria-prima em substituição ao aço e a aplicação em estruturas localizadas em ambientes agressivos, sofrendo o ataque constante da corrosão, comprometendo a vida útil da estrutura e fazendo com que se aumente o trabalho de manutenção das estruturas (Gomes, 1997; Calil Júnior et al., 2003; Palma, 2014).

Tendo em vista a maior resistência e rigidez dos conectores metálicos quando comparado aos de madeira, justifica-se a utilização do reforço das cavilhas e elementos estruturais de



madeira com resinas, fibras de vidro, fibra de carbono ou outras fibras e produtos que transformem a cavilha em um compósito com uma maior rigidez e resistência mecânica.

De acordo com Santos (2013), os compósitos de fibras de carbono constituem atualmente uma opção atraente para o reforço de estruturas de madeira. Sobretudo devido ao bom desempenho documentado nos estudos de reforço estrutural, elevada relação resistência/peso dos materiais, resistência à corrosão, facilidade e rapidez de aplicação.

O reforço dos elementos estruturais de madeira poderá contribuir na estabilidade dimensional e na diminuição do processo de degradação, resultando em um melhor comportamento estrutural da ligação e desempenho global da estrutura. Dentre os trabalhos que foram conduzidos utilizando cavilhas de madeira como conectores em ligações de estruturas de madeira, destaca-se a pesquisa realizada por Gomes (1997). O trabalho apresentou uma técnica inovativa de reforço nas cavilhas de madeira utilizando a impregnação dos conectores de madeira com resina epoxídica.

Através dos resultados obtidos após a realização dos ensaios, pode-se notar eficiência do processo de impregnação das cavilhas com melhorias na estabilidade dimensional com relação a umidade, diminuição da variabilidade das características de resistência e elasticidade, e aumento significativo no limite de proporcionalidade na compressão normal como na compressão paralela, tanto de peças isoladas como na ligação.

Ao final do seu trabalho, Gomes (1997) trouxe recomendações a respeito do processo de impregnação e pontuou que as espécies de altas densidades não se comportam muito bem para esse tipo de trabalho de impregnação, devido a sua baixa permeabilidade. O pesquisador considerou importante que se continue a realizar pesquisas nesse assunto utilizando outras espécies de madeira e outros produtos que promovam o reforço as cavilhas de madeira.

Neste contexto, este trabalho tem como o objetivo propor o reforço de cavilhas de madeira com polímero reforçado com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer – CFRP*), utilizando cavilhas confeccionadas com madeira dicotiledônea.

2. METODOLOGIA

2.1. Materiais

2.1.1. Madeira

Neste estudo utilizou-se a madeira de árvores do gênero *Manilkara*, comercialmente conhecida como Maçaranduba, amplamente utilizada na construção civil nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, buscando adaptar as condições de construção locais e semelhança com as condições usuais de projeto.



2.1.2. Fibra de Carbono e Matriz epóxi

Para a técnica de reforço com PRFC (Polímeros Reforçados com Fibra de carbono) proposta, foi utilizado um tecido de fibra de carbono bidirecional (0°/90°) (Figura 2) O tecido adquirido possui desenho sarja 2x2, tratamento cru, 5,0 (+/-0,2) fios/cm, 200 g/m², espessura 0,40 mm e sem furos.

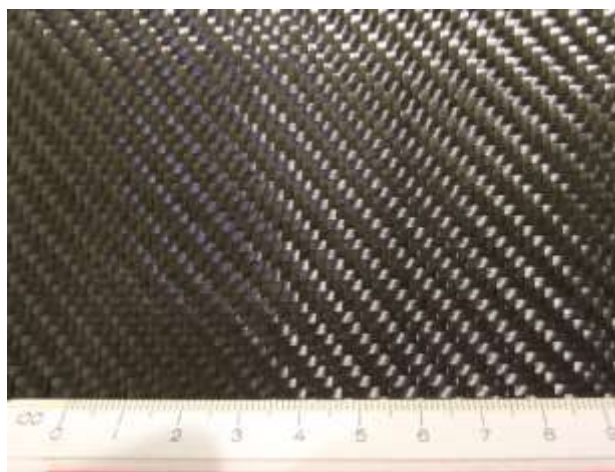


Figura 2 - Tecido de fibra de carbono bidirecional.

Como material utilizado na matriz do compósito de reforço adotou-se um composto de dois componentes: resina base e endurecedor (agente de cura). Como material utilizado como matriz no reforço, optou-se por trabalhar com o sistema de resina epoxídica comercialmente encontrado como ARALDITE® GY 250 (resina) e SQ 3154 (endurecedor).

2.1.1. Produção das cavilhas reforçadas

Foram destinadas 36 cavilhas com reforço e 36 cavilhas sem reforço para o ensaio de flexão. As cavilhas foram obtidas a partir de peças de seção quadrada e foram aparelhadas e usinadas, ficando com diâmetros finais de 16mm, 18mm e 20 mm. O reforço envolveu as etapas de preparação do tecido, corte do tecido, preparação do sistema epóxi, envolvimento da fibra na cavilha e retirada da fita adesiva colocada para evitar o desalinhamento das fibras na etapa de corte.

Percebeu-se que seria difícil envolver o tecido na madeira de seção circular, pois no tecido não havia rigidez suficiente para envolver na cavilha sem causar um desalinhamento nas fibras durante a aplicação da resina. A solução encontrada para garantir um tecido com uma maior manuseabilidade foi envolvê-lo com a fita adesiva de papel que inicialmente era somente utilizada pelos distribuidores da fibra para cortá-la em menores partes. A etapa subsequente a produção das cavilhas foi a etapa de aplicação do reforço com a fibra de carbono, ilustrada no Quadro .



Etapas	Operação	Ferramentas	Produto final
Preparação do tecido	Colagem de fita adesiva para evitar o desalinhamento das fibras	Tesoura e Fita adesiva de papel	
Corte do tecido	Corte do tecido considerando a área de envolvimento nas cavilhas	Tesoura, esquadro e régua	Tecido na medida para envolvimento na cavilha
Preparação do sistema epóxi	Preparação do sistema epóxi considerando a proporção 100:50 para resina/endurecedor	Copo plástico/silicone e balança digital	Sistema epóxi em processo de cura. Pronto para laminação na cavilha
Impregnação	Impregnação do tecido de fibra de carbono com o sistema epóxi	Pincel e rolo desaerador	Tecido de fibra de carbono impregnado com resina epóxi
Envolvimento da fibra	Envolver tecido de fibra de carbono na cavilha	Lona plástica antiaderente ao epóxi	Cavilha envolvida no tecido. Peça pronta para cura de 24 horas.
Retirada da fita adesiva	Retirar Fita adesiva colocada para evitar o desalinhamento das fibras	Tesoura/Estilete	Cavilha reforçada sem fita adesiva
Produto Final	Cavilhas reforçadas com fibra de carbono		

Quadro 1 - Sequência de reforço das cavilhas e os respectivos equipamentos utilizados.

Após a etapa de laminação, foi necessário retirar a fita adesiva inicialmente colocada nos tecidos de fibra de carbono para evitar o seu desalinhamento durante a etapa de envolvimento na cavilha. Nesta fase foi necessária cautela para evitar danos a fibra e a madeira envolvida. Para execução do trabalho, foi imprescindível a utilização de um



estilete comum e luvas de tecido para proteção das mãos. A adição da camada de fibra de carbono a cavilha de madeira resultou no aumento de 1 mm no diâmetro do conector.

2.2. Métodos

2.2.1. Ensaio de flexão nas cavilhas

Foram confeccionadas 12 cavilhas para cada diâmetro e condição de reforço. As mesmas foram divididas em diferentes grupos. Um grupo foi submetido a uma camada de reforço e outro grupo de cavilhas que não foi reforçado. Foram comparados os valores de resistência a flexão, a eficiência da técnica proposta. A Figura 3 ilustra a cavilha não reforçada e a cavilha reforçada.



Figura 3 - Perspectiva do corpos-de-prova do ensaio de flexão nas cavilhas.

O comprimento escolhido foi de 460 mm, atendendo a relação $l/h > 21$ para evitar a influência do cisalhamento na flexão, como descrito estudo de Rocco Lahr (1983) sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira.

O procedimento de ensaio de flexão nas cavilhas é executado através do método do ensaio de flexão em três pontos baseado na NBR 7190 (ABNT, 1997). Na execução do ensaio, foi acoplado ao disco da prensa um perfil tubular de aço de 5 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento. O perfil tubular foi fixado ao disco por dois grampos de metal, também conhecidos como “sargento”. Na Figura é possível observar a adaptação feita para execução do ensaio.





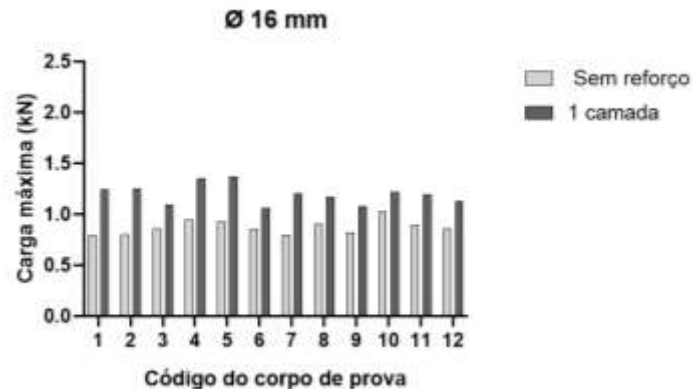
Figura 5 – Execução do ensaio de flexão em cavilhas: a) sem reforços; b) reforçadas com uma camada.

O ensaio foi proposto de maneira semelhante por Pereira e Calil Junior (2018) na avaliação de ligações cavilhadas para painéis de DLT (*Doweled Laminated Timber*). Através deste experimento, foram obtidas as cargas máximas de ruptura na flexão das cavilhas. Além disso, foi possível avaliar e comparar a deformação entre as cavilhas reforçadas e não reforçadas. A taxa de incremento utilizada neste ensaio foi de 10 MPa/min.

3. ANÁLISES DE RESULTADOS

3.1. Ensaio de flexão das cavilhas

Nos gráficos apresentados na Figura 4 é possível observar a diferença dos resultados para a condição de reforço analisada. Em todas as condições as cavilhas com reforços apresentaram cargas máxima maiores que as cavilhas sem reforço. Os resultados obtidos para o ensaio de flexão nas cavilhas estão apresentados na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



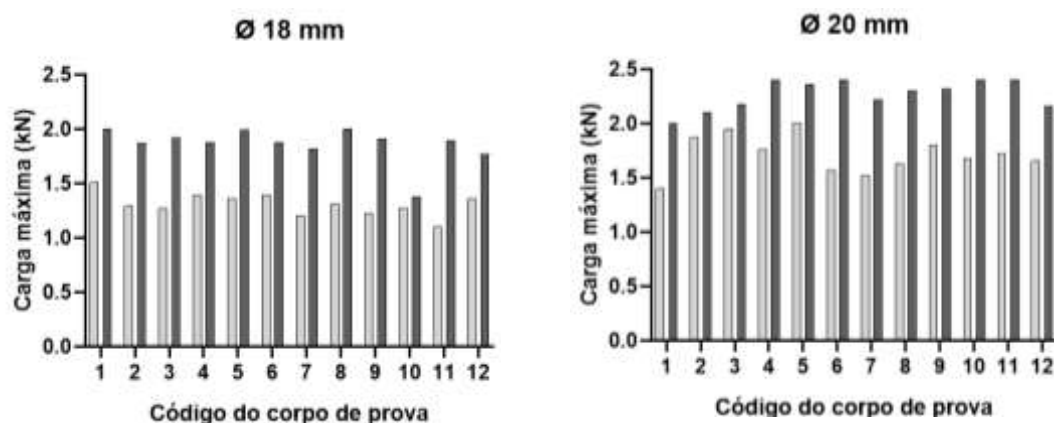


Figura 4 – Gráfico de colunas para o ensaio de flexão das cavilhas.

Tabela 1— Resultados do ensaio de flexão das cavilhas nas cavilhas de Ø20 mm

Estatística descritiva	Ø16 mm		Ø18 mm		Ø20 mm	
	SR*	1C**	SR	1C	SR	1C
Valor médio (kN)	0,87	1,20	1,31	1,86	1,71	2,27
Desvio padrão	0,07	0,10	0,11	0,17	0,18	0,14
Mediana (kN)	0,86	1,20	1,30	1,89	1,70	2,31
Coefficiente de variação	8,20%	8,27%	8,12%	8,94%	10,25%	5,99%
Valor mínimo (kN)	0,79	1,06	1,10	1,38	1,40	2,00
Quantidade de amostras	12	12	12	12	12	12

*SR :cavilhas ensaiadas na sua condição natural

** 1C: cavilhas que receberam uma camada de reforço de fibra de carbono

Considerando a média dos resultados obtidos, a partir dos diferentes diâmetros avaliados, observou-se uma resistência maior em todos conectores que receberam o reforço. Observa-se um incremento de aproximadamente 38% para as cavilhas de Ø16 mm reforçadas, 42% para o diâmetro de Ø18 mm e 33% para o diâmetro de Ø20 mm. Tal resultado indica maior ganho de resistência mecânica à medida que a camada de fibra representa uma porcentagem maior da área da seção transversal da cavilha.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos ensaios de flexão das cavilhas, concluiu-se que a técnica de reforço atribuí ao conector circular de madeira um aumento da sua resistência à flexão com a adição de uma camada de fibra de carbono.



AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Laboratório de Madeiras (LabMad) e o Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), ambos da Universidade Federal da Bahia. Agradecemos também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Governo Federal pelo apoio a pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. Brasil, Rio de Janeiro.

Calil Junior, C.; Antonio Rocco Lahr, F.; Dias, A. A.(2003). Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira.

Gomes, O. F. (1997). Estudo das ligações cavilhadas impregnadas com resinas estirênicas empregadas em estruturas de madeira. Universidade de São Paulo.

Palma, P.; Kobel, P.; Minor, A.; Frangi, A. (2014). Ligações Estruturais do tipo madeira-madeira com placas de madeira densificada e cavilhas de FRP. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, p. 1–18.

Pereira, M. C. M., Calil Junior, C. (2018). Resistência de ligações cavilhadas aplicando a proposta do novo método de ensaio de ligações mecânicas em estruturas de madeira. São Carlos.

Rocco Lahr, F. A. (1983). Sobre a determinação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos.

Santos, C. L. (2013). Comportamento mecânico de ligações do tipo cavilha em estruturas de madeira. Universidade da Beira Interior.