

Comportamiento de las ligações madeira-resinas sintéticas e fibra de vidro na restauração de peças estruturais

Isabela Pedreira Cruz / Mario Mendonça

Resumen

Este trabajo aborda aspectos fundamentales referentes a la reparación entre dos piezas distintas de madera, bajo los principios de la tecnología de la conservación y la restauración. En este campo, encontramos incontables dificultades en la realización de un refuerzo estructural para una estructura antigua, especialmente aquellas que representan verdaderas obras de arte. La propuesta de restauración de vigas desarrollada, permite la ejecución de refuerzos estructurales en locales de difícil acceso y limitadas condiciones de trabajo y además, la conservación de una buena apariencia en la estructura. Se realizaron ensayos de flexión en piezas enteras de madera (vigas) y en piezas reparadas con placa de fibra de vidrio colada con resina epoxi y resina poliéster, que permitieron una comparación estadística de los resultados obtenidos.

Se estudiaron experimentalmente las deformaciones en las fases elásticas y plásticas, y el valor de las tensiones máximas de las piezas sometidas a flexión, verificándose la influencia del módulo de elasticidad de los distintos materiales y del conjunto. En el estudio se observó comparativamente el comportamiento de la reparación con resina poliéster y con resina epoxi.

Descriptores:

Tecnología de la conservación;
Refuerzos estructurales;
Resinas para restauración de vigas de madera

Abstract

This work is related to fundamental aspects about the reparation between two different wood pieces, based in the conservation and restoring technology principles. In this field, we find uncountable difficulties in the developing of a structural reinforcement for an antique structure, specially those that represent real art works. The developed joist restoring proposal, allows the execution of structural reinforcements in spaces of difficult access and limited condition work, and also, the conservation of one good appearance in the structure. There were made flexion tests on entire wood pieces (joists) and on pieces repaired with fiberglass application strained with epoxy resin and polyester resin, that allowed an statistical comparison of the obtained results. Were experimentally studied, the deformations in the elastic and plastic phases, and the maximum tensions amount of the pieces submitted to flexion; verifying the influence of the different materials elasticity module and of the aggregate. In the investigation, was comparatively observed the behavior of the repairing with polyester resin and with epoxy resin.

Introdução

O restauro e a preservação de edifícios históricos apresentam uma série de problemas adicionais a àqueles normalmente encontrados quando são restaurados prédios comuns. O objetivo principal desta intervenção é conservar, tanto quanto possível, os materiais originais, de forma que a estrutura restaurada conserve a sua aparência tradicional. O trabalho deve ser executado com o mínimo de interferência na estrutura remanescente. Naqueles lugares onde os reparos necessitem reforço adicional ou a renovação de uma parte do edifício, deverá ser minimizada a inclusão de peças novas. Mais do que renovar elementos da estrutura por substituições, é preferível repará-los e reforçá-los. Esta operação envolve, frequentemente, o uso de chapas de aço, pranchas ou fixações similares, as quais destoam, na maioria dos casos, do resto do prédio.

O caso mais crítico corresponde às extremidades das vigas, pois elas estão inseridas nas paredes de alvenaria onde a humidade penetra, favorecendo o desenvolvimento de microorganismos e insectos xilófagos que degradam o material. Na maioria dos casos, a parte central da viga permanece em excelente estado e pode continuar suportando a carga como originalmente, porém suas extremidades deterioradas estão sob carregamento, sob esforços cisalhantes, existindo o perigo real de desequilíbrio da estrutura original e, conseqüentemente, o colapso do sistema estrutural e até mesmo do edifício.

A recuperação estrutural de uma viga de madeira deteriorada tem sido alvo de alguns estudos na área da conservação do património histórico construído. As técnicas utilizadas nas restaurações de estruturas antigas de madeira, baseadas no emprego de elementos metálicos, além da descaracterização daquelas estruturas, têm a desvantagem de serem sensíveis à corrosão de agentes químicos (água, aerossóis salinos, vapores ácidos etc.), bem como de apresentarem índices de dilatação térmica muito diferentes.

Alguns materiais têm sido empregados com certo sucesso. Entre estes, temos o concreto epoxídico, resina epóxi, barras de aço, barras de fibra de vidro reforçadas com resinas poliéster, com as mais diversas técnicas, tanto do ponto de vista de capacidade de resistência quanto de execução e acabamento.

Neste trabalho, estuda-se experimentalmente o comportamento estrutural de emendas de peças de madeira com resinas sintéticas reforçadas com fibra de vidro. O estudo foi orientado no sentido de desenvolver uma alternativa para a recuperação de estruturas antigas de madeira, superior à aplicada com a utilização de peças metálicas, sem as desvantagens anteriormente descritas, e com maior resistência estrutural que a obtida com a aplicação de uma simples cola adesiva.

Materiais estudados

Os materiais estudados neste trabalho foram a madeira e os compostos destinados ao reforço (resina poliéster, resina epóxi e fibra de vidro).

A madeira escolhida foi a maçaranduba – *Manilkara huberi* (Ducke) (Joly, 1976), espécie muito frequente nas matas litorâneas do Brasil e também muito explorada desde a época colonial. A maçaranduba é uma madeira pesada ($\rho_{12\%} = 1143\text{kg/m}^3$), possui uma resistência mecânica alta e tem boa durabilidade natural. É indicada para construção de estruturas externas, dormentes, postes, estacas e mourões e em construção civil como vigas, caibros.

As resinas utilizadas – resinas epóxi e resinas de poliéster – são matérias plásticas com larga aplicação na construção civil e nos trabalhos de restauro como protectores e consolidantes. Apresentam um certo numero de vantagens estruturais, notadamente boa resistência aos ácidos e soluções salinas e uma grande fluidez durante sua utilização.

As emendas das peças de madeira foram confeccionadas com uma matriz de resina sintética reforçada por fibras de vidro que asseguram a aderência do conjunto.

Metodología

Ao longo deste trabalho, foi realizado um estudo experimental em laboratório para uma emenda entre duas peças de madeira, tomando o cuidado de conservar uma boa aparência, além de permitir uma fácil execução, desde quando esta proposta de restauro de vigas pode ter aplicações em locais que oferecem precárias condições de trabalho.

O estudo foi aplicado em peças de madeira submetidas à flexão, com medidas de deformações na região tracionada das vigas.

As dimensões para as peças foram estabelecidas não apenas em função de uma secção transversal compatível com aquelas secções disponíveis no mercado, mas, ao mesmo tempo, de forma que satisfizesse o posicionamento do reforço. Foram definidas as dimensões das peças distintas de 10cmx10cmx60cm.

Figura 1:
Peças de madeira para ensaio de flexão

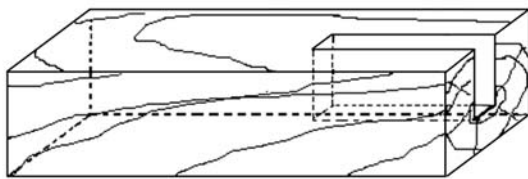


Figura 3:
Detalhe da secção transversal das peças de madeira

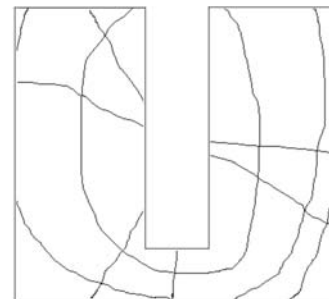
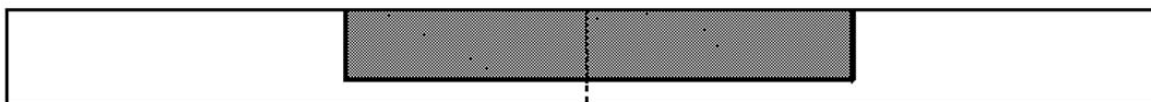


Figura 2:
Peças de madeira para serem emendadas com reforço interno



Nas peças, a direcção da fibra coincide com a sua maior dimensão. As duas peças são emendadas mediante um reforço interno de resina e fibra de vidro, no sentido longitudinal da viga.

Para colocação do reforço interno, foi feito um rasgo no interior das peças de modo a permitir a introdução da placa de ligação em fibra de vidro e da resina em estado líquido a fim de promover a aderência entre a placa e a madeira.

O tamanho do rasgo e o da placa de fibra de vidro foram adoptados tomando como base o trabalho de Stumes (1979). Fez-se um rasgo no centro da secção transversal das peças de madeira, com auxílio de uma furadeira provida de broca, criando uma série de furos ao longo dos 25 cm de cada peça.

Nas primeiras peças, o rasgo foi feito com a superfície lisa, mas, depois, verificou-se que a aderência melhorava, deixando a superfície da madeira com alguma rugosidade. Sendo assim, os rasgos ficaram com uma ligeira saliência em função dos furos efectuados com a broca. Posteriormente, foram feitas reentrâncias adicionais na madeira a 45°, com auxílio da broca, para assegurar uma aderência maior da resina com as peças de madeira a serem emendadas.

O dimensionamento da placa de ligação entre a madeira e a resina reforçada com fibra de vidro foi feito segundo o sistema WER (Stumes, 1979). Tendo em vista que o comprimento do vão da viga, que serve de corpo de prova, é relativamente pequeno ($l = 100$ cm), e considerando o fato de a expressão apresentada por Stumes referir-se a vãos reais, concluiu-se ser satisfatório adoptar para estes experimentos um comprimento para o reforço de $L_c = 25$ cm, perfazendo para a placa de poliéster reforçada com fibra de vidro um comprimento total de 50 cm. A placa de fibra de vidro tem as dimensões 1,0 cm x 7,0 cm x 50 cm e possui ranhuras inclinadas de 45° espaçadas de 5cm, nas suas faces laterais.

Uma vez definida a metodologia, foram elaborados corpos de prova de madeira com secção de 10 x 10 cm² e comprimento de 120 cm e, então, iniciado o processo para o estu-

do da adesão entre as duas partes, fazendo-se para isso rasgos de 2 x 8,5 x 25 cm, em cada uma das duas partes a serem ligadas.

Inicialmente, por meio de talas de madeira fixadas externamente, as duas peças foram colocadas juntas, e a região da emenda vedada com fita crepe para evitar que a resina, quando colocada em estado líquido, escorresse para fora da fenda. Em seguida, colocou-se a placa pré-fabricada de fibra de vidro e preencheu-se o vazio ou folga com resina que, após penetrar pela cavidade da peça, iria assegurar a adesão da placa à madeira. Adoptamos um período de cura prefixado em sete dias, para obter uma boa aderência entre a resina e a madeira e catálise total do polímero.

As talas usadas na fixação das peças e a fita crepe foram posteriormente retiradas, sendo o acabamento externo da ligação obtido por meio de uma lixa.

Foram efectuados dezoito ensaios, distribuídos da seguinte maneira:

- seis vigas de madeira emendadas com resina poliéster e reforçadas com placa de fibra de vidro;
- seis vigas de madeira emendadas com resina epóxi e reforçadas com placa de fibra de vidro;
- seis vigas de madeira maciça inteiras.

O objectivo desses corpos de prova distribuídos dessa maneira era obter-se uma ideia do comportamento da emenda para dois tipos distintos de resina, quando comparados a corpos de prova sem emenda.

Figura 4:
Detalhe da placa de reforço em fibra de vidro

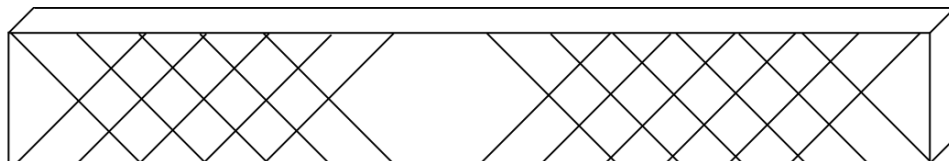
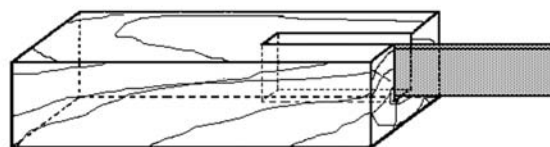


Figura 5:
Posicionamento da placa de fibra de vidro na madeira



A resina poliéster utilizada nas experiências foi preparada com uma mistura de resina líquida denominada RESINA ORTOFTÁLICA com adição de 2% de catalisador peróxido de metil etil cetona - MEKP. O custo no mercado desta resina é de US\$3,35 por quilo.

O produto adesivo estrutural base epóxi usado nos ensaios foi o COMPOUND ADESIVO R* previamente preparado conforme recomendações do fabricante. Este adesivo tem um custo de US\$10,00 por quilo.

Tanto a superfície da madeira como a da placa estavam bem limpas, isentas de poeira ou substâncias estranhas. A aplicação foi feita utilizando-se uma espátula, tomando-se o cuidado de preencher todos os vazios. O tempo de cura foi de sete dias.

Determinação dos esforços

A aplicação da carga foi feita sobre dois cutelos, afastados de 2/3 do vão conforme o esquema da Figura 8, de modo a atender às finalidades do ensaio, cujo objectivo principal era a obtenção de dados para análise do diagrama de tensões do conjunto, como também do seu módulo de elasticidade na flexão.

As cargas foram aplicadas em pontos escolhidos visando-se liberar a região do reforço para que não houvesse ali não apenas um esmagamento, como também a interferência de outros efeitos. A aplicação da carga concentrada foi uniformemente crescente, sendo medidos os deslocamentos para cada acréscimo de carga.

A teoria geralmente usada para o dimensionamento das vigas de madeira é a teoria elástica elementar, formulada dentro de certos limites em que as tensões permanecem linearmente proporcionais às deformações. O cálculo das tensões de compressão e de tracção nas fibras extremas de peças sujeitas a flexão foi efectuado usando a equação clássica de Navier, baseada na lei de Hooke. Tem-se:

$$\sigma_c = \sigma_t = \frac{My}{I} = \frac{M}{W} \quad (1)$$

Para peças de secção rectangular com o esquema estrutural de duas cargas conforme Figura 8, tem-se:

$$\sigma_c = \sigma_t = \frac{Pl}{2bh^2} \quad (2)$$

Fazendo a aplicação de duas cargas na viga, tem-se o momento constante entre os pontos de aplicação das mesmas. Neste caso, podem ser calculados os valores do módulo de elasticidade relativos às deformações de tracção e compressão na flexão.

Figura 6:
Detalhe do corpo de prova

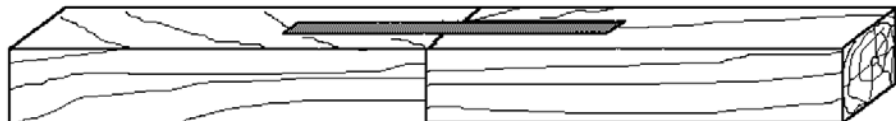


Figura 7:
Detalhe da secção transversal de uma peça na região da emenda

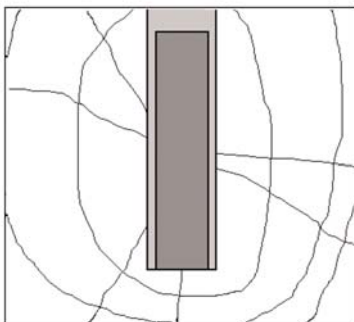
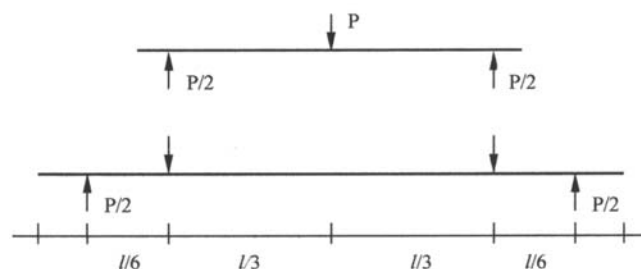
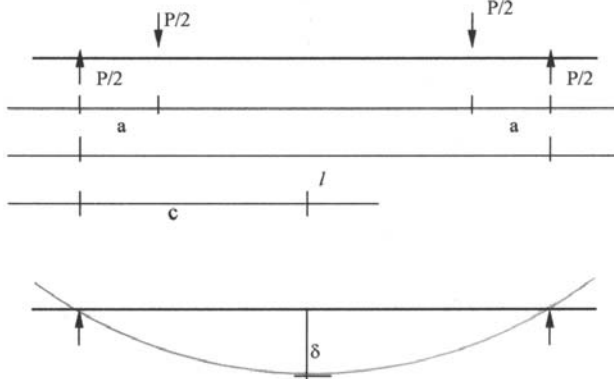


Figura 8:
Esquema estrutural mostrando o carregamento na viga



A flecha total (δ) no vão I pode ser obtida pela fórmula a seguir apresentada

Figura 9: Esquema estrutural mostrando a deformação na viga



Para $a \leq c \leq (l - a)$

$$\delta = \frac{Pa}{12EI} (3lc - 3c^2 - a^2) + \frac{Pa}{2SG} k \quad (3)$$

onde o segundo termo representa a influência da parcela de deformação devido ao cisalhamento ($k = 1.20$ para secções rectangulares), sendo G , o módulo de elasticidade transversal da madeira; E , o módulo de elasticidade longitudinal real à flexão da madeira; P , a carga total aplicada; l , o vão da peça flectida; I , o momento de inércia da secção transversal; e S a área da secção transversal.

Na expressão (3), estão consideradas as deformações da viga devidas ao alongamento das fibras tracionadas e ao encurtamento das fibras comprimidas, como também as deformações devidas ao cisalhamento, provenientes do esforço cortante agindo na viga (I EBRAMEM, 1983).

Com auxílio de extensômetros (DVD), foram feitas leituras referentes ao deslocamento vertical de pontos próximos ao ponto médio da distância entre os apoios, como também da carga aplicada.

$$\delta = \frac{(P/2)a}{6E \left(\frac{bh^3}{12} \right)} (3lc - 3c^2 - a^2) + \frac{(P/2)a}{bh \left(\frac{E}{16} \right)} k$$

Neste trabalho, é chamado E_a o módulo de elasticidade longitudinal aparente na flexão, parâmetro obtido pela expressão abaixo. Assim, fazendo-se $E_a = E$, tem-se:

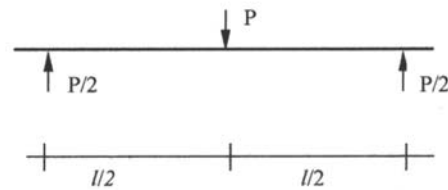
$$E_a = \frac{Pa}{2bh^3} \left[\frac{2(3lc - 3c^2 - a^2)}{h^2} + 16k \right] \quad (4)$$

Todas essas deformações foram tomadas com o auxílio de programas desenvolvidos pelo Laboratório de Geotecnia – DCTM da Escola Politécnica da UFBA, para obtenção de resultados dos ensaios, por intermédio de um sistema para aquisição automática de dados.

As experiências de flexão das peças de madeira reforçadas foram feitas sobre o conjunto de seis corpos de prova, preparados conforme já foi exposto.

Para complementar a análise do módulo de elasticidade na flexão do conjunto, foi feito um ensaio de flexão com carga centrada em uma placa de fibra de vidro para se obter uma informação desta peça, pois a mesma faz parte do conjunto.

Figura 10: Esquema estrutural de carregamento para ensaio da placa de fibra de vidro



Resultados

Os resultados obtidos com o sistema de aquisição de dados, nos ensaios realizados, permitiram obter os gráficos correspondentes às dezoito vigas de maçaranduba ensaiadas na fase elástica e na fase da ruptura.

A seguir, nas Figuras 11 a 13, são apresentados, a título de exemplificação, de cada série dos corpos de prova, os gráficos com as relações carga aplicada x deformação, obtidos a partir das leituras registradas no decorrer dos ensaios, até a ruptura. As irregularidades observadas nas curvas podem ser atribuídas a defeito de funcionamento da prensa que já apresenta bastante uso.

Figura 11:
Corpo de prova de nº 1 de madeira (maçaranduba) emendado

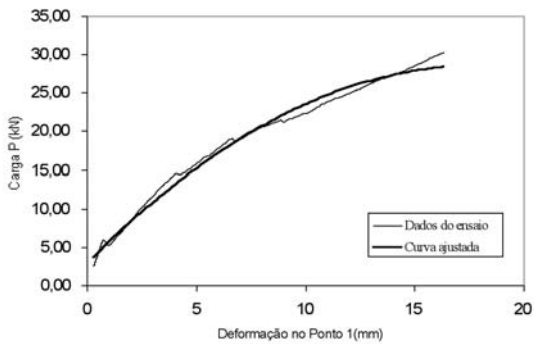
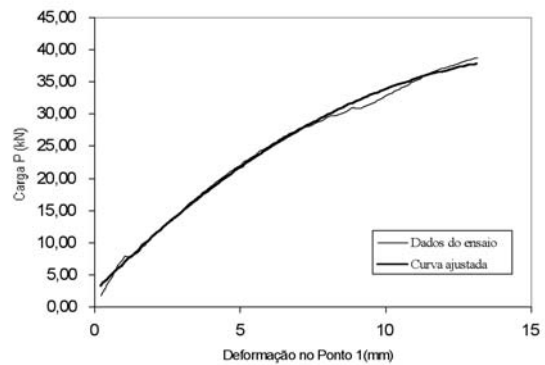


Figura 12:
Corpo de prova de nº 1 de madeira (maçaranduba) emendado com resina epóxi e reforçado com placa de fibra de vidro



Sendo o módulo de elasticidade uma das propriedades mais importantes quando usamos reforços estruturais com materiais distintos, determinamos o módulo de elasticidade na flexão dos materiais isolados e dos conjuntos, resina-fibra de vidro-madeira, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2, com base nos dados obtidos nos ensaios realizados.

A Tabela 1 resume os valores médios de carga de ruptura, deslocamento vertical, a tensão máxima na flexão e o módulo de elasticidade longitudinal na flexão das peças na região da ligação.

Figura 13:
Corpo de prova de nº 2 de madeira maciça inteiro

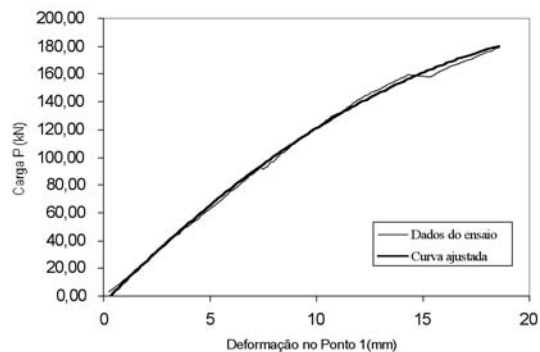


Tabela 1:
Resultados médios dos corpos de prova ensaiados

Corpos de Prova	Carga normal P (kN)	Desloca-mento Vertical (cm)	Tensões Max Comp=Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Viga de madeira maciça	174,15	1,77	87,12	27.221
Viga de madeira emendada com resina poliéster e reforçada com placa de fibra de vidro	28,40	1,90	14,21	4.129
Viga de madeira emendada com resina epóxi e reforçada com placa de fibra de vidro	28,86	0,87	14,41	9.354

Fonte: Pesquisa de campo – DCTM-UFBA

Tabela 2:
Resultados médios dos materiais ensaiados

Materiais	E (MPa)
Placa de fibra de vidro	12.350

Fonte: Pesquisa de campo – DCTM-UFBA

Comparando, inicialmente, os resultados experimentais obtidos entre as tensões de ruptura na flexão, usando peças de madeira emendadas com resina poliéster e com resina epóxi, verificamos resultados médios praticamente iguais.

No entanto, quando consideramos as deformações, as peças emendadas com a resina poliéster apresentam valores médios quase que duplicados em relação aos valores obtidos nas peças emendadas com resina epóxi.

Vale ressaltar que, em ambos os casos, a resistência do conjunto foi rompida pela superação da tensão de aderência na superfície de contacto resina/madeira. Portanto, faz-se necessária uma análise do comportamento dessa tensão de aderência para que se venha a estabelecer uma relação da tensão de ruptura na flexão da ligação sem a influência da resistência de aderência da cola, possibilitando, assim, uma maior participação dos demais materiais na resistência da ligação das peças.

Dos resultados obtidos, verificamos a necessidade de se procurar conseguir uma melhor aderência entre a resina e a madeira, tratando-se de materiais com módulos de elasticidade próximos.

Conclusões

De acordo com as experiências de laboratório realizadas, as peças estudadas, quando submetidas ao ensaio de flexão, apresentam comportamentos distintos. As peças elaboradas com resina poliéster apresentam uma transição mais gradual entre as regiões linear e não linear, e sofrem maiores deformações antes da fractura, enquanto as peças elaboradas com resina epóxi quebram com valores mais baixos de deformação, apresentando uma ruptura brusca, sem aviso.

Os resultados obtidos permitiram verificar igualmente a variação do módulo de elasticidade relativo às deformações de compressão e tracção na flexão, em função do produto

de uma constante pela relação entre carga e flecha, o que evidenciou a influência significativa das deformações no módulo de elasticidade.

Foi constatado que o comportamento da resina epóxi assemelha-se ao de certos polímeros orgânicos que rompem sem grande deformação plástica, enquanto o da resina poliéster corresponde ao do outro grupo de polímeros orgânicos que apresentam deformação elástica seguida de uma significativa deformação permanente.

Do ponto de vista da capacidade de carga, as peças elaboradas com resina epóxi, submetidas à flexão, apresentaram resultados de resistência ligeiramente superiores aos das peças emendadas com resina poliéster.

Os resultados práticos mostram que esta técnica de emenda empregando resinas sintéticas e placas de fibra de vidro ainda não permitiu atingir uma resistência mais aproximada à da peça de madeira maciça. Todavia, a pesquisa continua orientada no desenvolvimento de técnicas para melhorar a aderência entre a resina e a madeira, condição essencial para se estudar a ligação, e, conseqüentemente, aumentar a tensão máxima de ruptura.

Esta técnica de emenda pode ser executada com facilidade de manuseio, tendo em vista as dificuldades para a realização de um reforço estrutural de uma estrutura antiga. Além disso, de acordo com os preços indicados na metodologia, a técnica de reparo usando resina poliéster custa, comparativamente, um terço do custo utilizando resina epóxi. E, finalmente, pode garantir a conservação de peças de madeira originais de edifícios históricos

Em razão dos resultados encontrados, sugerimos que futuros trabalhos devam estudar o comportamento de resinas com formulações mais fluidas (alguns aditivos diluentes que reduzem a viscosidade), possibilitando maior penetração e aderência na madeira, efectuando também a comparação com outra peça emendada com placa metálica.

Traducción Arq. Flor De Abreu

Bibliografía

- Associação brasileira de normas técnicas. NBR-7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, mar. 1997.
- Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, 1 (I EBRAMEM), julho, 1983. São Carlos (SP). Anais... São Carlos (SP): Escola de Engenharia da USP, 1983.v.1.
- Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira, 5 (V EBRAMEM), 1995. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMG, 2 v. v.1.

- JOLY, Aylton Brandão. 1976. *Botânica: introdução à taxonomia vegetal*. São Paulo: Biblioteca Universitária: Nacional.
- STUMES, P. 1979. Structural rehabilitation of deteriorated timber. Ottawa (Canadá): Association for Preservation Technology.