

Análise de barras de aço ancoradas na madeira utilizando adesivos estruturais

Analysis of steel bars anchored in wood using structural adhesives

Júlio César Pigozzo 
Felipe Nascimento Arroyo 
Francisco Antonio Rocco Lahr 
André Luís Christoforo 

Resumo

Devido ao preconceito, a madeira passa de um material de excelente aplicabilidade estrutural para um material considerado vilão do meio ambiente. Entretanto, com a utilização de madeiras de reflorestamento, a madeira vem quebrando esse paradigma e apresenta-se como um excelente material estrutural. Nas ligações estruturais desse tipo de estrutura, as barras de aço coladas têm sido amplamente utilizadas. A avaliação da resistência de ancoragem das barras de aço coladas depende do tipo de adesivo, da rugosidade da barra de aço, da superfície de aderência na região de ancoragem e da umidade da madeira, entre outros fatores que podem ser definidos e controlados no projeto. Neste trabalho, apresentam-se aspectos de projeto, técnica de aplicação, comportamento mecânico das barras de aço (diâmetros de 6,3 mm, 8 mm, 10 mm e 12,5 mm), sem galvanização, coladas com adesivos epóxi e poliuretano em peças de madeira (*Pinus oocarpa* e *Corymbia citriodora*), e as formas de ruptura quando solicitadas a esforços axiais (tração e compressão) em corpos de prova, além de abordar as técnicas de colagem e o controle de qualidade. Apresentam-se, ainda, influências das propriedades mecânicas da madeira e das principais variáveis significativas na resistência de ancoragem das barras de aço. É possível concluir que o adesivo epóxi foi a melhor opção para ser utilizada nesse tipo de aplicação.

Palavras-chave: Resistência de ancoragem. Adesivo epóxi. Adesivo poliuretano.

Abstract

*As a result of prejudice, wood has not been considered a material with outstanding structural applicability, but rather as an environmental villain. However, with the use of reforestation wood, that paradigm is shifting, and the material is starting to be seen as an excellent structural material. In structural connections involving wood, glued steel bars are widely used. The anchorage resistance evaluation of the bonded steel bars depends on the adhesive, on the steel bar roughness, the adhesion surface in the anchorage region, wood humidity among other construction factors that can be defined and controlled in the design. This paper also discusses design aspects, application techniques, the mechanical behaviour of the steel bars (diameters of 6.3 mm, 8 mm, 10 mm and 12.5 mm) without galvanizing, bonded with epoxy or polyurethane adhesives on the wooden parts (*Pinus oocarpa* and *Corymbia citriodora*) and forms of rupture when subjected to axial efforts (traction and compression) in specimens. In addition, this article also addresses bonding techniques and quality control, as well as the influence of the mechanical properties of wood and the most influential variables in the anchorage steel bars strength. The study concludes that the epoxy adhesive is the best option to be used in this type of application.*

Keywords: Anchorage strength. Epoxy adhesive. Polyurethane adhesive.

¹Júlio César Pigozzo

¹Universidade Estadual de Maringá
Maringá - PR - Brasil

²Felipe Nascimento Arroyo

²Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

³Francisco Antonio Rocco Lahr

³Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

⁴André Luís Christoforo

⁴Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 11/02/20

Aceito em 17/02/22

Introdução

Atualmente, existe certo preconceito em relação às estruturas de madeira, relacionado à devastação das florestas. Entretanto, utilizando técnicas como o reflorestamento, esse excelente material estrutural passa a ser abundante e não causa danos ao meio ambiente (PINHEIRO *et al.*, 2019). Além disso, para que uma estrutura de madeira seja mais bem utilizada, é necessário avaliar o comportamento estrutural das conexões, principalmente na análise de barras coladas (PIGOZZO *et al.*, 2018a, 2018c).

Desenvolver conexões resistentes e confiáveis é a chave para assegurar o desempenho e a segurança das estruturas de madeira. Os adesivos devem ter baixa viscosidade e boa adesão, pois, caso contrário, podem apresentar adesões deficientes, conseqüentes de falhas na linha de cola (SANTOS *et al.*, 2014). Com a possibilidade de desenvolver ligações simples, fáceis de executar, resistentes e duráveis, as barras de aço coladas com adesivos estruturais passaram a ser aplicadas em diferentes situações.

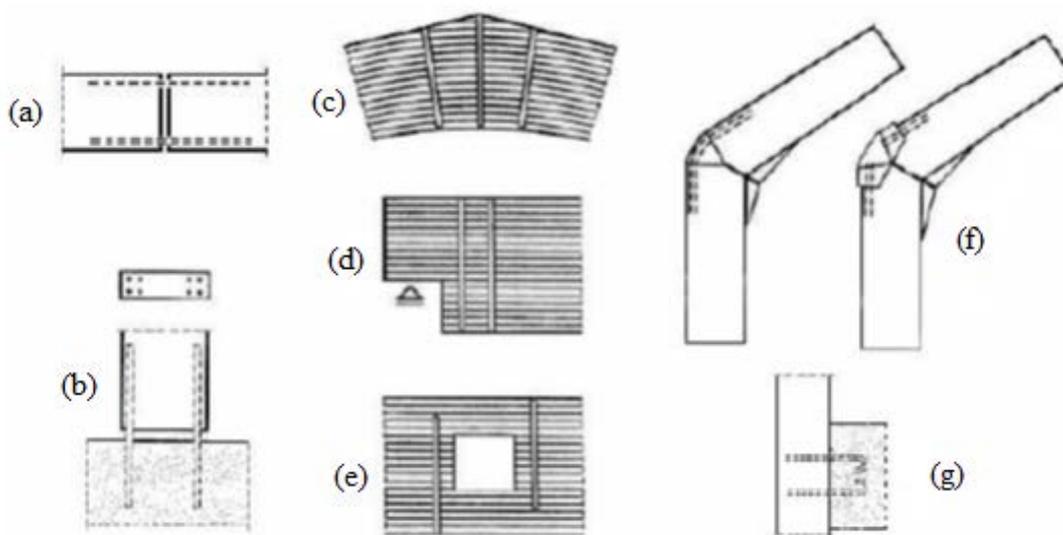
Esse tipo de conexão tem recebido atenção e reconhecimento por causa da excelente aparência estética e de seu desempenho (PIGOZZO, 2018d). Além disso, esses adesivos estruturais vêm sofrendo contínuos desenvolvimentos, apresentando cada vez melhores propriedades, de forma que muitas informações e resultados obtidos há alguns anos não se aplicam mais aos novos adesivos.

Aicher, Gustafsson e Wolf (1999) consideram que as conexões com barras de aço coladas apresentam várias vantagens técnicas (maior transferência de esforços, maior resistência ao momento fletor, furos não enfraquecem a estrutura, etc.) e econômicas (evitam erros por serem pré-fabricadas), gradativamente reconhecidas como um dos mais promissores tipos de conexões de alta resistência para industrialização das estruturas de madeira. Advertem que o uso de forma econômica e segura depende do conhecimento em profundidade de todos os parâmetros que influenciam no comportamento da ancoragem e, em longo prazo, da influência das diferentes condições de trabalho a que estarão submetidas. As principais utilizações para as barras de aço coladas estão representadas na Figura 1.

Adesivos sintéticos estruturais mais utilizados em estruturas de madeira são, usualmente, classificados em três grupos:

- (a) os fenol-resorcinol-formaldeídos (PRF);
- (b) os poliuretanos (PUR); e
- (c) os epóxi (EP).

Figura 1 - Exemplos de aplicação de barras de aço coladas em estruturas de madeira



Fonte: adaptado de Pigozzo (2004).

- Nota: (a) emendas de topo;
 (b) ligações de peças estruturais em blocos de fundações;
 (c) reforços em zonas de máximas curvaturas de vigas laminadas coladas;
 (d) e (e) transferência de forças dentro de uma estrutura ou parte dela;
 (f) elementos de ligação em nós de pórticos; e
 (g) elementos de ligações de peças de madeira, em alvenaria, concreto ou aço.

Os epóxi vêm sofrendo contínuos desenvolvimentos, apresentando cada vez melhores propriedades e menos defeitos ao longo do tempo. Havia, anteriormente, restrições para utilização dos adesivos epóxi como adesivos estruturais, com a suspeita de apresentarem rupturas frágeis com o aumento de temperatura ou diante de cargas de longa duração. Atualmente, esses adesivos são os mais indicados para ancoragem de barras de aço em peças estruturais de madeira (PIGOZZO *et al.*, 2018a, 2018d).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento estrutural de barras de aço, nos diâmetros 6,3 mm, 8 mm, 10 mm e 12,5 mm, coladas em corpos de prova em madeira (*Pinus oocarpa* e *Corymbia citriodora*) quando solicitadas a esforços axiais (tração e compressão), utilizando adesivos estruturais epóxi e de poliuretano. Para isso, as principais informações sobre comportamentos e aplicação de barras de aço ancoradas na madeira foram reunidas. Ao final, foi possível analisar o comportamento mecânico dos adesivos estruturais e suas formas de ruptura, por meio da variação no processo de colagem.

Revisão bibliográfica

Pouco se comenta a respeito da influência das propriedades mecânicas da madeira sobre a resistência de ancoragem de barras de aço coladas. Vários autores, entre eles Buchanan e Moss (1999), Korin, Buchanan e Moss (1999) e Bengtsson, Kemmsies e Johansson (2000), não encontraram influências significativas da densidade da madeira na resistência de ancoragem das barras de aço coladas. Pigozzo *et al.* (2018b), comparando as resistências de ancoragem de duas madeiras completamente diferentes em anatomia, densidade e resistência mecânica, também não encontraram influências significantes dessas propriedades nas respostas de ancoragem.

As variáveis independentes mais significativas para a determinação da resistência de ancoragem comportam-se da seguinte forma (GUSTAFSSON *et al.*, 2001):

- (a) variações lineares negativas com o aumento da umidade contida na madeira;
- (b) variações lineares positivas com o aumento da área da superfície de ancoragem;
- (c) variações positivas com o aumento da espessura da linha de cola;
- (d) resistência média decrescente quando se diminui a distância do furo à face da peça de madeira;
- (e) variações do diâmetro das barras não significativas quando se considera a área de ancoragem; e
- (f) em algumas pesquisas, esbeltez da ancoragem como variável significativa, e não a área de ancoragem.

Para a colagem de barras de aço em peças de madeira, o diâmetro do furo deve ser maior ou igual a 1,2 vez o diâmetro da barra, apresentando a espessura de linha de cola maior ou igual a 1,0 mm. Maiores espessuras da linha de cola permitem maiores resistências de ancoragens, mas, por questões econômicas, o diâmetro dos furos não deve ser maior do que 1,5 vez o diâmetro da barra. Além disso, o comprimento de ancoragem não deve ser inferior a 5 vezes o diâmetro da barra, nem superior a 20 vezes esse diâmetro. A distância mínima do centro da barra à face da peça de madeira não deve ser inferior a 1,5 vez o diâmetro da barra. Usando duas ou mais barras em uma mesma linha na conexão, elas devem ter afastamentos de centro a centro de pelo menos 2 diâmetros. As barras de aço devem ter superfícies texturizadas, como mossas ou filetes, ou superfície rosqueada (PIGOZZO, 2004).

É importante destacar que um grupo de barras não tem a mesma resistência que as barras separadas. Dessa forma, sugere-se um fator de redução (K_g) para grupos de barras, conforme a Tabela 1. Para situações com vários níveis de barras, as barras próximas da superfície externa da madeira deverão ter menores comprimentos de ancoragem, prevenindo potenciais rachaduras. Melhor confiabilidade estrutural é alcançada utilizando-se maior número de barras com menores diâmetros do que poucas barras com maiores diâmetros (PIGOZZO, 2004).

Tabela 1 - Fator de modificação para redução de resistência de ancoragem para barras agrupadas

Número de barras em grupos	Fator (K_g) de redução
1-2	1,0
3-4	0,9
5-6	0,8

Fonte: adaptada de Pigozzo (2004).

Materiais e métodos

Os materiais e as técnicas descritos a seguir foram apresentados por Pigozzo (2004), que desenvolveu vários experimentos para conhecer o comportamento das ancoragens das barras de aço coladas. Os resultados obtidos foram de madeiras nacionais e adesivos comerciais.

Materiais utilizados

Para este estudo, foram utilizados 6 corpos de prova da madeira *Pinus oocarpa* por ensaio realizado, com densidade aparente de 450-550 kg/m³, além da madeira *Corymbia citriodora*, com densidade aparente de 950-1.100 kg/m³ e mesma seção e comprimento da anterior. As barras de aço utilizadas foram do tipo CA-50, sem galvanização, com diâmetros nominais de 6,3 mm, 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm, recebendo tratamento de limpeza superficial, aplicando-se escova de aço rotativa na extremidade que ficaria em contato com a resina até atingir a cor branca. As barras foram ancoradas em três angulações diferentes: 0°, 45° e 90°. O tratamento superficial do aço passou a ter aspecto decisivamente importante no projeto, em que foi sugerida a utilização de parafusos ou barras galvanizadas (JOHANSSON, 1995). Em seguida, foi aplicado thinner (de uso geral para limpeza) como solvente, para retirar os resíduos oleosos. Quatro adesivos diferentes foram escolhidos para análise, sendo três epóxi bicomponentes e um poliuretano bicomponente, conforme o Quadro 1, a seguir. O adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona foi desenvolvida pelo Instituto de Química de São Carlos, da USP, composto do pré-polímero A249 e do polioli 25015C.

Destaca-se que o adesivo poliuretano deve ser utilizado em madeiras com umidades abaixo de 10%, pois pode encher a linha de cola com bolhas de CO₂, o que enfraquece a resistência de cisalhamento da resina e a resistência de ancoragem (PIGOZZO, 2004).

Técnica de aplicação

O uso dessas conexões de forma econômica e segura depende do conhecimento em profundidade de todos os parâmetros que influenciam no comportamento de ancoragem e das muitas diferentes situações de trabalho da conexão (SERRANO, 2014; AICHER; GUSTAFSSON; WOLF, 1999).

Para a injeção dos adesivos nos furos, utilizou-se um aplicador descartável que não necessitasse de limpeza. Porções adequadas dos componentes A e B foram colocadas e mantidas separadas, em uma embalagem de polietileno transparente e com resistência suficiente para suportar a pressão de injeção. Alguns adesivos, como o epóxi Sikadur-32 fluido, liberam forte calor com a reação entre seus componentes. Esse calor aumenta rapidamente a viscosidade, o que dificulta a injeção e diminui a resistência mecânica do aplicador.

A Figura 2 mostra uma embalagem de polietileno com os componentes da resina Sikadur-32 fluido prontos para ser misturados no canteiro de obras até sua homogeneização. O aquecimento foi minimizado trabalhando-se com porções menores, possíveis de ser aplicadas no tempo disponível antes que a temperatura ficasse muito elevada.

Quadro 1 - Adesivos utilizados para ancoragem das barras de aço

Nome comercial	Consistência	Tipo	Fornecedor
Compound injeção	Líquida	Epóxi	Otto Baumgart S.A.
AR 300	Líquida	Epóxi	Barracuda Technologies and Products
Sikadur-32 fluido	Pastosa	Epóxi	Sika S.A.
Poliuretana	Líquida	poliuretano	IQSC-USP

Figura 2 - Componentes A e B da resina Sikadur-32 fluido



A injeção se deu por meio de um tubo amarrado na extremidade da embalagem com o mesmo diâmetro externo da barra de aço, iniciando-se na extremidade interna do furo. Injetou-se o adesivo sem afastar o tubo, e o afloramento na extremidade externa do furo indicou que se atingiu o volume necessário para ancoragem. A injeção foi concluída afastando-se ligeiramente o tubo injetor e provocando excesso de adesivo, que se tornou visível após a introdução da barra de aço. Para eliminar bolhas de ar durante a introdução da barra, foram aplicados pequenos movimentos rotativos, alternando-se da esquerda para a direita e vice-versa, até que o excesso aflorasse na extremidade externa do furo. Dessa forma, confirmou-se o preenchimento dos espaços vazios entre a barra de aço e a parede do furo na madeira, formando a linha de cola. A Figura 3 apresenta detalhes da injeção.

Nas posições horizontais ou com poucas inclinações (Figura 3b) as condições para se preencher os espaços vazios, formando a linha de cola, são mais detalhadas e trabalhosas; exigem a utilização de adesivos com pouca viscosidade.

Tornou-se padrão a prática de aplicar barras circulares texturizadas ou filamentadas para maximizar a adesão mecânica. Por questões econômicas, de processos construtivos e de baixo custo do material, pode-se desconsiderar os altos níveis de preparação das superfícies das barras para maximizar a adesão química, comparada ao alto desempenho da adesão mecânica.

Modo de solicitação dos corpos de prova

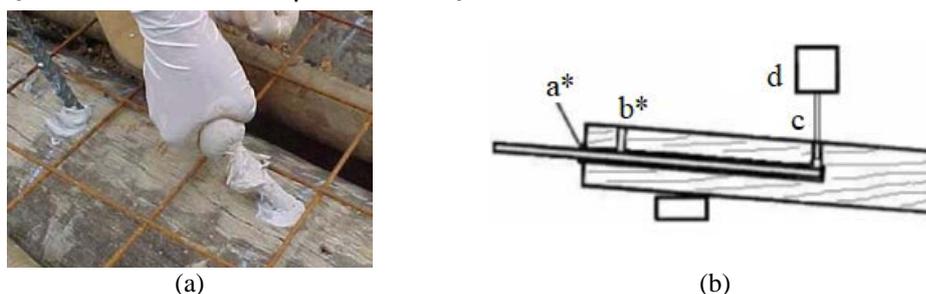
Os testes solicitando os dois lados da conexão produzem resistências de ancoragens maiores do que os testes solicitando somente um lado, possivelmente pelo efeito de compressão transversal que surge perpendicularmente ao comprimento de ancoragem da barra (STOECKEL; KONNERTH; GINDL-ALTMUTTER, 2013).

Nesta pesquisa, todos os corpos de prova foram solicitados com carregamentos monotônicos em um único lado, conforme a Figura 4, com dois ciclos de carga, sendo o primeiro ciclo com solicitações de 70% da carga-limite prevista, e o segundo ciclo até a falha da ligação colada. Barras solicitadas na tração ou compressão axial apresentaram as mesmas resistências de ancoragem.

Resultados e discussões

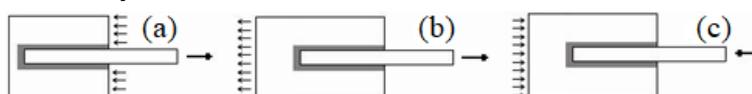
A seguir são apresentados os resultados dos ensaios com as resinas utilizadas. Importante destacar que nos resultados obtidos, através de ciclos sucessivos de variações de umidade, foi constatada corrosão na superfície do aço, o que diminui a resistência de ancoragem.

Figura 3 - (a) Operação de aplicação *do adesivo* em canteiro de obras e (b) técnica de colagem da barra de aço em posições horizontais ou com poucas inclinações



Nota: (a*) vedação da extremidade;
(b*) suspiro para eliminar o ar interno e indicar o término da colagem;
(c) abertura para injeção; e
(d) aplicador sob pressão.

Figura 4 - Formas de solicitações axiais das barras coladas



Nota: (a) solicitação de um lado; e
(b) e (c) solicitações de dois lados.

Adesivo poliuretano de óleo de mamona

O adesivo poliuretano de óleo de mamona utilizado foi de fácil aplicação. Inicialmente se apresentou na forma líquida e rapidamente, em cerca de 10 min, se tornou muito viscoso, impossibilitando a injeção em furos. Após o endurecimento na temperatura ambiente, apresentou consistência vítrea. A incorporação de bolhas pode-se iniciar no processo de mistura dos componentes, entretanto a maior incorporação de gás ocorreu por reação química com a umidade da madeira. A incorporação de bolhas de CO₂ provocou grande expansão no volume, gerando excessos na extremidade externa dos furos e, conseqüentemente, diminuindo a resistência ao cisalhamento.

Todas as rupturas de ancoragens com a utilização do adesivo poliuretano foram instantâneas, caracterizando rupturas frágeis, e ocorreram com o cisalhamento do adesivo. A Figura 5 mostra as ancoragens de barras de aço utilizando o adesivo poliuretano de óleo de mamona e a expansão do adesivo após a reação química com a umidade contida na madeira.

Adesivo epóxi

Os adesivos epóxi são claramente os adesivos mais adequados para reforços ou colagens de elementos de aço em peças de madeira, porém apresentam significativas diferenças entre si. Dessa forma, os resultados obtidos para um adesivo não podem ser extrapolados para prever os comportamentos dos outros.

Neste estudo foi observado que os adesivos epóxi não apresentaram problemas com a umidade contida na madeira até 22%, porém ficou demonstrado que a adesão mecânica diminuiu com o aumento da umidade da madeira. Alguns adesivos responderam satisfatoriamente para umidades na madeira até 35%.

Outro ponto é que os adesivos epóxi apresentaram consistência vítrea após o endurecimento. A predominante ruptura da ancoragem se deu por perda de adesão, iniciando-se com a perda de adesão química na superfície do aço e, posteriormente, com a perda de adesão mecânica. Os adesivos epóxi líquidos, Compound Injeção e AR 300, foram aplicados com facilidade, e o tempo de aplicação após a mistura dos componentes A e B foi de aproximadamente 30 min. A utilização de adesivos líquidos exige reposições após o endurecimento inicial, por serem absorvidos pela madeira ou fluírem por fissuras internas, que passam pelos furos, diminuindo, assim, o comprimento de ancoragem. O adesivo epóxi Sikadur-32, de consistência pastosa, não exigiu reposição após o endurecimento inicial, sendo mais difícil de utilizar. O tempo máximo para aplicação de 250 g da mistura dos componentes A e B foi de 10 min. O calor liberado pela reação após a mistura dos componentes acelerou o endurecimento, alterando rapidamente a viscosidade e impedindo o trabalho com volumes maiores.

É importante destacar que as resistências de ancoragem de barras com superfícies deformadas foram menores, cerca de 80% da resistência média das barras de superfícies rosqueadas.

Formas de ruptura

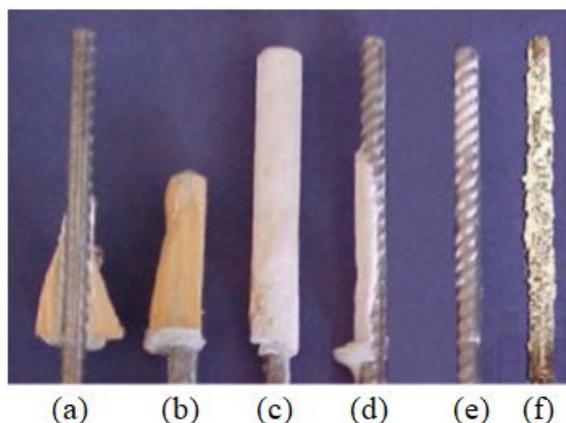
É desejável que a forma de ruptura da ancoragem seja por perda de adesão mecânica na superfície do aço. Os adesivos estudados apresentaram seis formas de ruptura, mostradas na Figura 6. A fadiga pode causar ruptura em qualquer dos componentes envolvidos na conexão: na barra de aço, no adesivo ou na peça de madeira. É necessário redefinir o conceito de fadiga para as conexões com barras de aço coladas, definindo um específico coeficiente de modificação para considerar os efeitos observados. Ainda não é possível confirmar se a tendência projetada para a expectativa de fadiga verdadeiramente representa um comportamento médio e ainda não é possível relacionar as propriedades dos materiais envolvidos com o comportamento de fadiga. Majoritariamente, os modos de rupturas de fadiga são semelhantes àqueles observados nos testes estáticos, conforme mostrado também por Molina, Calil Junior e Carreira (2009).

Em madeiras de baixa resistência mecânica, quando a barra de aço foi solicitada na direção das fibras, na extremidade externa do comprimento de ancoragem, ocorreram frequentes rupturas de adesão na superfície do aço, acompanhadas de rachaduras transversais da madeira. Esse comportamento é explicado pela alta concentração de tensões na extremidade. A tensão na interface aço-adesivo foi maior do que na interface madeira-adesivo.

Figura 5 - Expansão do adesivo poliuretano em seqüências de furos, com espessuras da linha de cola aumentando da direita para a esquerda



Figura 6 - Formas de ruptura de ancoragens na madeira



Nota: (a) ruptura da adesão na face do aço e arrancamento de pedaços de madeira da extremidade externa do furo;
(b) ruptura por cisalhamento da madeira na parede do furo;
(c) ruptura da adesão na madeira;
(d) ruptura mista de adesão na madeira e no aço;
(e) ruptura da adesão no aço; e
(f) ruptura por cisalhamento da resina.

Com a utilização dos adesivos epóxi em madeira de *Pinus oocarpa*, as rupturas de ancoragem ocorreram das seguintes formas:

- (a) 91% ocorreram por perdas de adesão química e posteriormente por perdas de adesão mecânica na superfície do aço;
- (b) em apenas duas observações com umidades elevadas, correspondendo a 0,5%, ocorreram perdas de adesão nas superfícies dos furos;
- (c) 8% das rupturas apresentaram comportamento misto, com perda parcial de adesão na superfície do furo e parcial na superfície do aço, casos em que a umidade nas madeiras era elevada;
- (d) a ruptura por cisalhamento da madeira na superfície do furo ocorreu em uma única observação, com umidade elevada;
- (e) não ocorreram rupturas por cisalhamento da resina; e
- (f) para umidades elevadas, nas direções 0° e 45°, ocorreu arrancamento de pedaço de madeira da extremidade externa do furo em cerca de 50% dos ensaios.

Em madeira de *Corymbia citriodora* utilizando os adesivos epóxi, todas as rupturas de ancoragem ocorreram por perda de adesão no aço, independentemente da umidade ou da direção de ancoragem estudada. Nas direções 0° e 45° não ocorreu arrancamento de madeira da extremidade externa do furo.

Possíveis falhas de colagens

A Figura 7, a seguir, apresenta as principais falhas de ancoragem observadas com a utilização dos adesivos epóxi.

A Figura 8 apresenta falhas de preenchimento da linha de cola, com a presença de bolhas de ar.

Em pequenos comprimentos de ancoragem podem ocorrer sensíveis reduções da resistência de ancoragem, diminuindo a adesão mecânica quando na superfície das barras houver descontinuidade de mossas ou filetes (espaço utilizado para impressão da marca do fabricante ou do tipo de aço utilizado), conforme a Figura 9.

Comportamento da resistência de ancoragem utilizando adesivos epóxi

Os comportamentos mecânicos a seguir correspondem à forma de ruptura por perda de adesão na superfície do aço, iniciando-se com a perda de adesão química e, posteriormente, por de adesão mecânica, restringindo-se às barras de aço com filetes superficiais e aço CA-50, em madeiras de *Pinus oocarpa* ou *Corymbia citriodora*, utilizando os adesivos epóxi mencionados no Quadro 1. A resistência de ancoragem atingiu o valor máximo e progressivamente diminuiu à medida que a barra foi sendo retirada, conforme a Figura 10. É importante destacar que o mesmo comportamento foi obtido para todos os diâmetros analisados.

O limite de resistência de ancoragem não constituiu ruptura frágil. Após o deslocamento inicial da barra de aço no processo de arrancamento, a barra passou a receber cargas novamente, conforme mostrado na Figura 10.

O limite último de resistência de ancoragem de barras de aço CA-50, coladas com adesivos epóxi, não representou ruptura frágil. Com o deslocamento da barra, no limite de resistência da ancoragem, ocorreu a primeira perda de capacidade de carga e, em seguida, sucessivamente, passou a receber cargas novamente. As distâncias entre os picos de solicitações observados na Figura 10 corresponderam às distâncias entre os filetes da superfície da barra, que se acomodaram sucessivamente nos entalhes internos deixados pelos filetes precedentes durante o processo de retirada da barra.

As observações da rigidez da ancoragem com até três ciclos de cargas mostraram comportamentos coincidentes e uniformes. Nos ensaios realizados com dois ciclos de cargas, em nenhum corpo de prova houve alterações de rigidez, considerando o primeiro ciclo com solicitação de aproximadamente 70% da solicitação última.

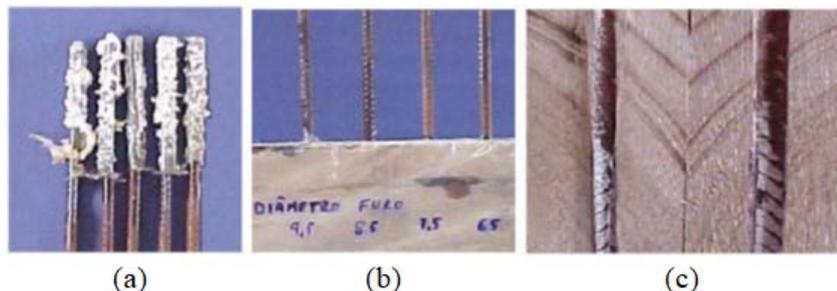
A Figura 11 mostra a coincidência de rigidez da ancoragem para os dois ciclos de carga, mesmo tendo o primeiro ciclo atingido a resistência última.

Tensões nas barras ancoradas

A maior concentração de tensões na madeira ocorreu na direção transversal à barra, na extremidade externa do comprimento de ancoragem. A Figura 12 apresenta o diagrama de tensão de cisalhamento dos adesivos utilizados em função da variação de temperatura (de -20 °C a 70 °C).

Em ciclos de variações de temperaturas de -20 a 70 °C, utilizando-se o adesivo epóxi (EP), foi notada queda de 15% na resistência de ancoragem, independentemente da espessura da linha de cola. Para o poliuretano (PUR) observou-se queda de 40%, com a espessura da linha de cola de 1,0 mm.

Figura 7 - Principais falhas de ancoragem



Nota: (a) efeito plástico da mistura inadequada dos componentes do adesivo epóxi; (b) drenagem do adesivo por fissuras internas na madeira; e (c) absorção do adesivo pela madeira, em *Pinus oocarpa*, e a consequente diminuição do comprimento de ancoragem.

Figura 8 - (a) Presença de bolhas de ar na linha de cola e (b) falhas de preenchimento entre a barra e a parede do furo

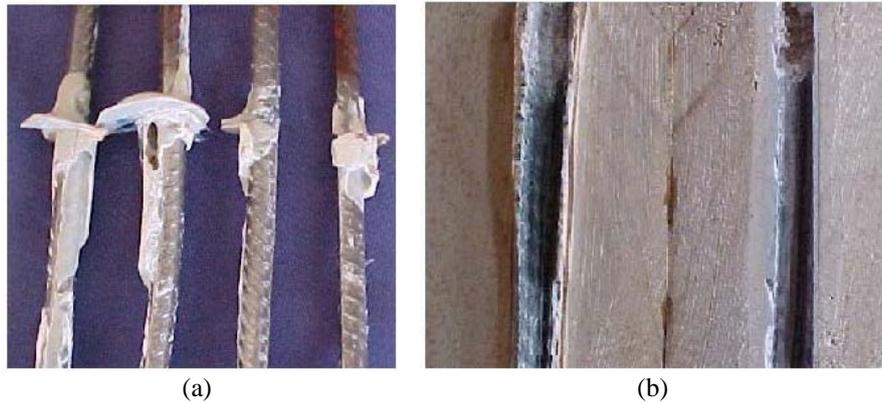


Figura 9 - Descontinuidade dos filetes na superfície da barra de aço



Figura 10 - Comportamento da ancoragem a 0° (a), 45° (b) e 90° (c) em relação às fibras da madeira de Pinus oocarpa, utilizando adesivo epóxi Compound Injeção em diferentes corpos de prova

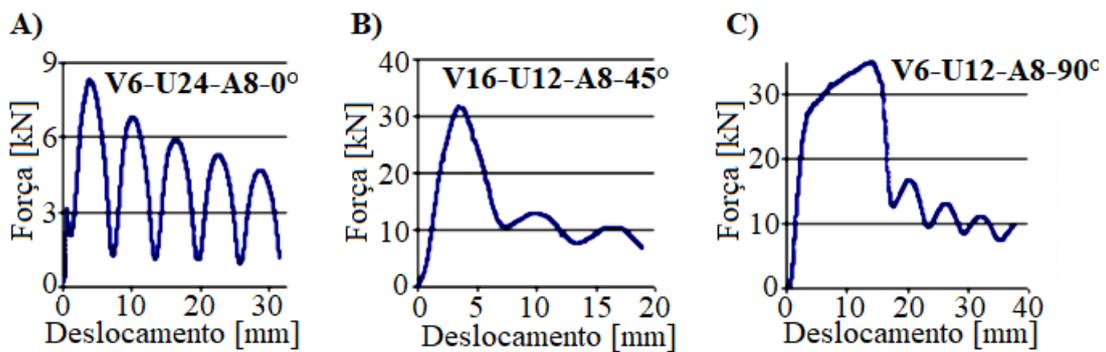


Figura 11 - Comparação de rigidez da ancoragem após atingir o estado limite último nos primeiros ciclos de solicitação. Aço CA-50 ancorado em Pinus oocarpa utilizando adesivo epóxi Compound Injeção

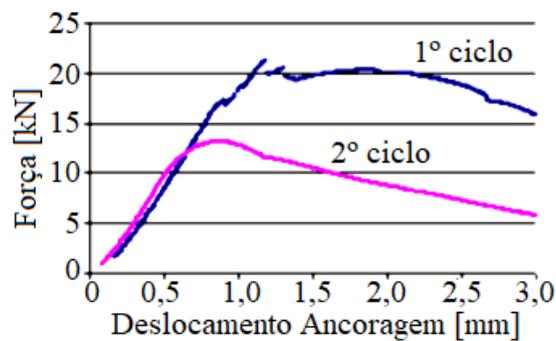
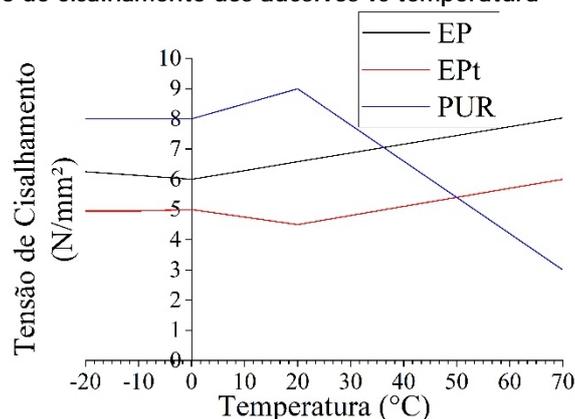


Figura 12 - Diagrama tensão de cisalhamento dos adesivos vs temperatura



Conclusões

Os resultados obtidos da presente pesquisa possibilitam concluir que:

- maiores valores de umidade causaram corrosão na superfície do aço (aço sem galvanização), diminuindo, assim, a resistência de ancoragem. Entretanto, os adesivos epóxi não apresentaram problemas envolvendo a umidade até 22%, ocorrendo perda apenas na adesão mecânica;
- ambos os adesivos (epóxi e poliuretano) apresentaram consistência vítrea após o endurecimento;
- o adesivo poliuretano de óleo de mamona rapidamente passou da forma líquida para a viscosa, tornando mais difícil a aplicação. Dessa forma, o volume da mistura para aplicação deve ser menor, para evitar o desperdício de material. Os adesivos epóxi não tiveram esse problema, durando até 30 min para endurecer (cura inicial do adesivo), contra 10 min do adesivo poliuretano. Apenas o adesivo epóxi Sikadur-32 demandou 10 min de aplicação até a cura inicial;
- o adesivo poliuretano apresentou grande expansão devido à incorporação de bolhas de CO₂, diminuindo a resistência ao cisalhamento;
- as rupturas com o adesivo de poliuretano foram instantâneas (ruptura frágil). As rupturas dos adesivos ocorreram predominantemente por perda de adesão da ancoragem, iniciando-se com a perda de adesão química e, posteriormente, mecânica;
- os adesivos epóxi líquidos precisaram de reposição após a aplicação, visto que parte do material penetrou na madeira;
- seis formas de ruptura foram observadas: ruptura da adesão na face do aço e arrancamento de pedaços de madeira da extremidade externa do furo; ruptura por cisalhamento da madeira na parede do furo; ruptura da adesão na madeira; ruptura mista de adesão na madeira e no aço; ruptura da adesão no aço; e ruptura por cisalhamento da resina;
- em três casos analisados (0°, 45° e 90°), o comportamento das ancoragens foi o mesmo: com o aumento da carga, a resistência de ancoragem atingiu o valor máximo, com posterior diminuição com a retirada dela;
- variações de temperatura (-20 °C a 70 °C) afetaram a resistência de ancoragem: 15% para adesivo epóxi e 40% para adesivo poliuretano;
- variações no diâmetro das barras não trouxeram alterações significativas nos resultados analisados; e
- os adesivos epóxi foram claramente os mais indicados para reforços ou colagens de barras de aço em madeira.

Referências

AICHER, S.; GUSTAFSSON, P.; WOLF, M. Load displacement and bond strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON TIMBER ENGINEERING, 1., Stockholm, 1999. **Proceedings [...]** Stockholm, 1999.

BENGTSSON, C.; KEMMSIES, M.; JOHANSSON, C. J. Production control methods for glued-in rods for timber structures. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER STRUCTURE, 6., Vancouver, 2000. **Proceedings [...]** Vancouver, 2000.

BUCHANAN, A.; MOSS, P. Design of epoxied steel rods in glulam timber. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Rotorua, 1999. **Proceedings [...]** Rotorua, 1999.

GUSTAFSSON, J. *et al.* Strength design equation for glued-in rods. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM JOINTS IN TIMBER STRUCTURES, Stuttgart, 2001. **Proceedings [...]** Stuttgart, 2001.

JOHANSSON, C. J. **Glued in bolts**: step 1. Palestra C14, Almere, Centrun Hout, p. 1-7, 1995.

KORIN, U.; BUCHANAN, A. H.; MOSS, P. J. Effect of bar arrangement on tensile strength of epoxied end bolts in glulam. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Rotorua, 1999. **Proceedings [...]** Rotorua, 1999.

MOLINA, C. J.; CALIL JUNIOR, C.; CARREIRA, M. R. Pullout strength of axially loaded steel rods bonded in glulam at a 45° angle to the grain. **Materials Research**, v. 12, n. 4, p. 427-432, 2009.

PIGOZZO, J. C. **Estudo e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em placas mistas de madeira e concreto para tabuleiro de pontes**. São Carlos, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PIGOZZO, J. C. *et al.* Behavior of shear connectors formed by bonded-in x type steel bars in wood-concrete specimens. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 28, p. 1-8, 2018a.

PIGOZZO, J. C. *et al.* Comparison of anchorage strength of bonded-in steel bars with epoxy resin, varying the superficial treatments and moisture after bonding, using *Corymbia citriodora* wood. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 28, p. 1-6, 2018b.

PIGOZZO, J. C. *et al.* Pull out strength of bonded-in steel bars behavior in *Pinus oocarpa* shiede timber. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 28, p. 1-9, 2018c.

PIGOZZO, J. C. *et al.* Pull out strength of bonded-in steel rods perpendicularly to the grain in *Corymbia citriodora* and *Pinus oocarpa* shiede timber. **International Journal of Materials Engineering**, v. 8, p. 70-75, 2018d.

PINHEIRO, R. V. *et al.* Technical feasibility study of the use of softwoods in lattice structure howe type for roofing (gaps between 8-18 meters). **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 35, p. 1-8, 2019.

SANTOS, W. L. F. *et al.* Particleboard manufactured from Tauari (*Couratari oblongifolia*) wood waste using castor oil based polyurethane resin. **Materials Research**, v. 17, n. 3, 2014.

SERRANO, E. **On the mechanical behavior of test specimens for wood-adhesive bonds**. Structural Mechanics. Sweden: Lund University, 2014.

STOECKEL, F.; KONNERTH, J.; GINDL-ALTMUTTER, W. Mechanical properties of adhesives for bonding wood: a review. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 45, p. 32-41, 2013.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Júlio César Pigozzo

Conceitualização, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Estadual de Maringá | Av. Colombo, 5790 | CEP 87020-900 | Maringá - PR - Brasil | Tel.: (44) 3261-4303 | E-mail: jcpigozzo@uem.br

Felipe Nascimento Arroyo

Curadoria de dados, Análise de dados, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Rod. Washington Luiz, s/n, Monjolinho | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (17) 99284-2500 | E-mail: lipe.arroyo@gmail.com

Francisco Antonio Rocco Lahr

Pesquisa, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Estrutural, Escola de Engenharia de São Carlos | Universidade de São Paulo | Av. Trab. São Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt | CEP 13566-590 | São Carlos - SP - Brasil | Tel.: (16) 3373-8206 | E-mail: frocco@sc.usp.br

André Luís Christoforo

Análise de dados, Pesquisa, Administração do projeto, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil | Universidade Federal de São Carlos | Tel.: (16) 3351-8262 | E-mail: christoforoal@yahoo.com.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.