

Estudo da ancoragem de barras de aço coladas em peças estruturais de madeira

Julio César Molina, *Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP. e-mail: juliocm@sc.usp.br;*
Carlito Calil Junior, *Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP. e-mail: calil@sc.usp.br*

Resumo: O trabalho proposto tem a finalidade de estudar o comportamento de barras de aço coladas em peças de madeira de reflorestamento, utilizadas principalmente em tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes. Os ensaios experimentais foram efetuados diretamente em corpos-de-prova de madeira, sendo estes submetidos a solicitações estáticas, levando-se em consideração as principais variáveis envolvidas na ligação. Foram consideradas várias umidades de colagem para as barras de aço, duas espécies de madeiras de reflorestamento e também dois tipos de adesivos estruturais. Com a realização deste estudo foram obtidos subsídios para o dimensionamento desses tabuleiros.

Palavras-chave: ancoragem de barras de aço, adesivos estruturais.

Abstract: The proposed work has the purpose of studying the behavior of glued steel rods in specimens of reforestation wood, used mainly in log-concrete composite deck bridge. The experimental tests were made directly in wood specimens, being these submitted to static solicitations, considering the main variables involved in the connection. Several levels of wood moisture content were considered for collage of the steel rods, two species of reforestation wood and also two types of structural adhesives. With this study, has been obtained subsidies for the design of those deck bridges.

Keywords: bonded-in steel rods, structural adhesive wood

1. Introdução

O conhecimento do comportamento da conexão entre os materiais presentes nas soluções mistas é importante. A eficiência do elemento estrutural com seção composta está relacionada com a qualidade do sistema de conexão, uma vez que o comportamento dos conectores afeta diretamente a distribuição dos esforços internos, bem como as deformações da estrutura.

Segundo Aicher, Gustafsson e Wolf (1999)(5) o uso de forma econômica e segura das barras de aço coladas como sistema de conexão, depende do conhecimento em profundidade de todos os parâmetros que influenciam no seu comportamento de ancoragem e nas muitas diferentes situações de trabalho.

Na colagem das barras de aço nas peças de madeira são utilizados três tipos de adesivos ou resinas estruturais: fenol-resorcinol formoldeídos (PRF), poliuretanas (PUR), e epóxis (EP). Esses adesivos vem sofrendo contínuos desenvolvimentos, apresentando, cada vez mais, melhores propriedades, e, sobretudo, menos defeitos ao longo do tempo. Muitos resultados e informações obtidas há alguns anos não são mais aplicáveis aos adesivos existentes.

De acordo com Gardner (1994)(1) o adesivo epóxi (EP) é claramente o adesivo mais adequado para a colagem de barras de aço em peças de madeira.

Para Pigozzo (2004)(9) quando se utiliza um adesivo do tipo (PUR), a reação do adesivo com a umidade contida na madeira incorpora bolhas de CO₂ e conseqüentemente diminui a resistência das barras de aço ao cisalhamento. Portanto, este tipo de adesivo não é adequado para a ancoragem das barras de aço.

De acordo com Johansson (1995)(2) quando são utilizadas conexões de aço coladas com adesivos, existe o risco da adesão do adesivo na superfície do aço ser destruída pelo avanço da corrosão provocada pela intempérie. Neste caso, é interessante que sejam utilizadas conexões galvanizadas.

1.1. Ancoragem das barras de aço

De acordo com Buchanan e Moss (1999)(6) não há limites para o comprimento de ancoragem das barras de aço, mas, para comprimentos de ancoragem superiores a vinte vezes o diâmetro da barra, os acréscimos na resistência de ancoragem são insignificantes. Além disso, a distância mínima do centro da barra à face da peça de madeira não deve ser inferior a 1,5 vezes o diâmetro da barra. De preferência o diâmetro do furo deve ser 1,25 vezes o diâmetro da barra. Furos maiores permitem mais tolerâncias, mas não devem ser maiores do que 1,5 vezes o diâmetro da barra.

1.2. Posicionamento das barras em relação às fibras da madeira

As barras de aço coladas tem sido frequentemente usadas na Europa como sistema de conexão. Essa prática tem sido limitada a inserção de barras de aço coladas paralelamente as fibras da madeira em ligações de topo entre peças estruturais ou fixações de colunas em base de concreto.

De acordo com Pigozzo (2002)(8) as barras de aço inclinadas em relação às fibras quando solicitadas a tração, provocam, para pequenos deslocamentos, esforços internos de compressão entre as faces dos materiais envolvidos no plano de interação. Para as barras inclinadas, os mecanismos de deformações das barras de aço tracionadas, no plano de cisalhamento, também provocam embutimento na madeira, enquanto nas barras comprimidas formam rótulas plásticas, limitando a sua resistência, além do embutimento na

madeira. Assim, quando as barras de aço são utilizadas em “X”, a solicitação axial de tração é a que melhor se aproxima das condições de serviço do conector.

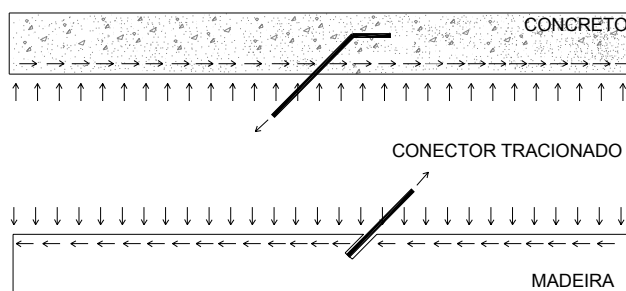


Figura 1 – Solicitação no plano de interação da estrutura mista. Fonte: Modificado de PIGOZZO (2002).

Segundo Ceccotti (1995)(3) as barras de aço posicionadas em “X” apresentam menores embutimentos na madeira na flexão quando comparadas com conectores verticais.

De acordo com Madsen (1996)(4) as barras de aço inclinadas são mais eficientes, pois transmitem forças em duas direções até o limite de capacidade do aço, e, para uma maior região das peças de madeira, permitindo uma melhor distribuição das tensões. São também menos vulneráveis a rachaduras da madeira na área da ligação, aumentam a resistência da madeira ao cisalhamento e apresentam um excelente comportamento de grupo, ou seja, todas as barras trabalham simultaneamente permitindo uma ligação de grande eficiência e rigidez.

Segundo Matthiesen (2001)(7) a disposição dos conectores em “X”, pela forma de solicitação das barras de aço, apresenta rigidez de duas a dez vezes maior quando comparada aos conectores perpendiculares, dependendo do diâmetro considerado.

O objetivo deste trabalho está em analisar o comportamento de barras de aço coladas com uma inclinação de 45° em relação às fibras de madeira, considerando dois tipos de resinas, duas espécies de madeiras de reflorestamento, e, também três diferentes umidades de colagem para as barras de aço. Assim, são verificados os principais modos de ruptura e o comportamento de cada tipo de resina a partir de ensaios estáticos de arrancamento das barras de aço, mais conhecidos no meio técnico como ensaios do tipo *push-out*.

2. Materiais e métodos

2.1. Espécies de madeira

Foram utilizadas duas espécies de madeiras de reflorestamento tratadas com CCA: *Pinus Taeda* e *Eucalypto Citriodora*.

2.2 Adesivos

Foram utilizadas duas resinas estruturais, bi-componentes, do tipo epóxi: Compound Adesivo (flúida) e Sikadur 32 (flúida).

2.3 Barras de aço

Foram utilizadas barras de aço comum (superfícies com mossas), galvanizadas, do tipo CA-50, com diâmetros nominais de 6,3mm.

2.4 Equipamento

Para a condução dos ensaios estáticos foi utilizada a máquina universal DARTEC M1000/RC, com atuador servo hidráulico, de capacidade 100 KN, e, com sistema de aquisição de dados totalmente informatizado.

2.5 Preparação dos corpos-de-prova

O número de corpos-de-prova foi determinado com base no planejamento fatorial. Foram ensaiados estaticamente um total seis corpos-de-prova para cada tipo de resina e espécie de madeira. Cada corpo-de-prova foi ensaiado com duas barras de aço coladas, conforme ilustra a fig. 2.

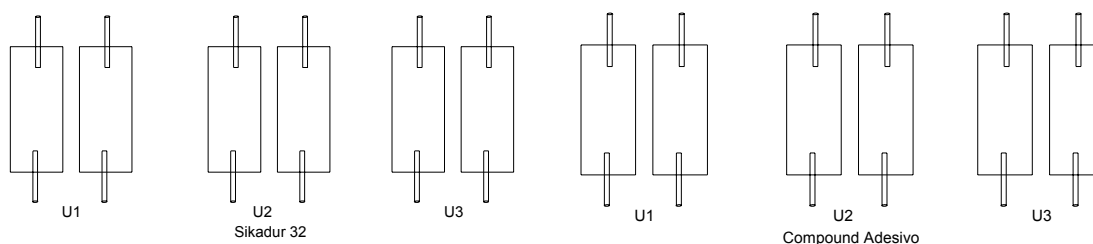


Figura 2 – Réplicas dos corpos-de-prova para os ensaios estáticos.

Os valores U1, U2 e U3 apresentados na fig. 2 correspondem as faixas de umidades consideradas nos ensaios, sendo $U1=12\% \pm 1\%$, $U2=17\% \pm 1\%$ e $U3=22\% \pm 1\%$.

Para se obter a umidade esperada em cada corpo-de-prova controlou-se a massa de água contida. Com a necessidade de se aumentar a massa de água, os corpos-de-prova ficaram imersos em água até atingirem a massa desejada. Com a necessidade de se retirar parte da massa de água alguns corpos-de-prova foram expostos ao ar livre. Após atingirem as massas correspondentes às faixas de umidades esperadas, os corpos-de-prova foram colocados separadamente em sacos transparentes de polietileno, onde permaneceram por um período de 20 dias para homogeneização da massa de água em seu volume. Posteriormente, foi efetuada a furação e colagem das barras de aço nos corpos-de-prova.

O diâmetro dos furos utilizados nos corpos-de-prova foi de 8,0mm (aproximadamente $1,25d$) e as dimensões utilizadas para cada corpo-de-prova foram 5x10x15cm. Foi utilizado nos corpos-de-prova um comprimento de ancoragem para as barras de aço igual a 6,3cm, obtido a partir da relação de esbelteza $\lambda=10$ ($\lambda=l_a/d$).

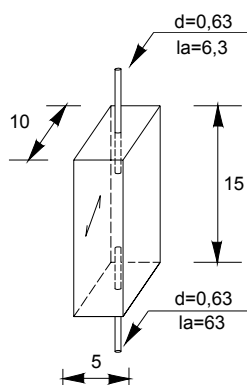


Figura 3 – Detalhe do corpo-de-prova utilizado nos ensaios.

2.6 Colagem das barras de aço

Foi feita com a utilização de seringas de plástico (20ml), descartáveis, acopladas a um bico de plástico com diâmetro aproximadamente igual ao da barra de aço.



Figura 4 – Aplicação dos adesivos para posterior colagem das barras de aço.

Para eliminar as bolhas de ar durante a introdução das barras de aço nos furos, aplicou-se nestas barras pequenos movimentos rotativos, alternando-se sequencialmente da esquerda para direita e vice versa, até que o excesso de resina afluísse pelo furo. Dessa forma, confirmou-se o preenchimento dos espaços vazios na linha de cola.

2.7 Comportamento das resinas

A resina Compound Adesivo fluida foi aplicada com facilidade após sua preparação (mistura dos componentes A e B). O tempo de aplicação dessa resina foi aproximadamente 30 minutos. A resina Sikadur 32 fluida exigiu uma agilidade maior com relação ao seu tempo de aplicação após a mistura dos componentes A e B, uma vez que a sua viscosidade aumenta rapidamente (cerca de 10 a 15 minutos), dificultando a injeção nos furos. Assim a preparação das resinas utilizadas foi feita parcialmente em pequenas quantidades (aproximadamente 200g) para garantia de um tempo satisfatório de aplicação. Os corpos-de-prova, após terem sido colados, ficaram em repouso durante sete dias para que as resinas atingissem suas resistências máximas. Posteriormente os corpos-de-prova foram ensaiados.

2.8 Execução dos ensaios

O ensaio estático da ligação foi realizado em dois ciclos de carga, sendo o primeiro ciclo com carga aplicada até 50% da resistência última da ligação, NBR 7190/97 (determinada inicialmente a partir de um corpo-de-prova gêmeo) e o segundo ciclo aplicado até a ruptura.



Figura 5 – Detalhe do ensaio dos corpos de prova na máquina de ensaios

3. Resultados

3.1. Resistência de ancoragem das barras de aço (R_A)

As resistências de ancoragem (R_A), obtidas a partir dos ensaios estáticos, juntamente com as respectivas forças médias de ruptura ($F_{m,rupt}$) e modos de ruptura para cada faixa umidade e tipo de resina estão apresentadas nas tabelas seguintes.

Tabela 1 – Resultados para madeiras de *Pinus* coladas com o adesivo Sikadur.

Madeira	Resina	U(%)	ρ_{ap} (kg/m ³)	R_A (KN)	$F_{m,rupt}$ (kN)
Pinus	Sikadur	11,1	440	7,26	7,42
Pinus	Sikadur	12,2	440	7,58	
Pinus	Sikadur	17,2	440	6,32	5,80
Pinus	Sikadur	16,8	610	5,21	
Pinus	Sikadur	22,3	610	5,05	4,66
Pinus	Sikadur	21,7	485	4,26	

Tabela 2 – Resultados para madeiras de *Pinus* coladas com o adesivo Compound.

Madeira	Resina	U(%)	ρ_{ap} (kg/m ³)	R_A (KN)	$F_{m,rupt}$ (kN)
Pinus	Compound	12,8	440	4,10	4,04
Pinus	Compound	12,1	440	3,97	
Pinus	Compound	16,8	610	3,99	3,97
Pinus	Compound	16,4	610	3,95	
Pinus	Compound	22,2	610	3,35	3,06
Pinus	Compound	21,1	610	2,78	

Tabela 3 – Resultados para madeiras de *Eucalipto* coladas com o adesivo Sikadur.

Madeira	Resina	U(%)	ρ_{ap} (kg/m ³)	R_A (KN)	$F_{m,rupt}$ (kN)
Eucalipto	Sikadur	12,1	940	10,89	11,52
Eucalipto	Sikadur	12,5	940	12,15	

Eucalipto	Sikadur	17,1	995	10,42	10,89
Eucalipto	Sikadur	17,3	940	11,36	
Eucalipto	Sikadur	21,9	995	8,53	8,06
Eucalipto	Sikadur	21,4	995	7,59	

Tabela 4 – Resultados para madeiras de *Eucalipto* coladas com o adesivo Compound.

Madeira	Resina	U(%)	ρ_{ap} (kg/m ³)	R _A (KN)	F _{m, rup} (kN)
Eucalipto	Compound	12,8	940	9,16	6,90
Eucalipto	Compound	11,1	940	4,57	
Eucalipto	Compound	16,8	940	3,97	3,88
Eucalipto	Compound	16,1	995	3,79	
Eucalipto	Compound	21,2	995	3,09	3,60
Eucalipto	Compound	22,6	995	4,04	

3.2. Análise dos resultados

Os corpos-de-prova colados com a resina Sikadur 32 apresentaram maiores resistências médias de ancoragem com relação aos corpos-de-prova colados com a resina Compound Adesivo. Os corpos-de-prova de *Eucalipto* apresentaram maiores resistências médias de ancoragem com relação aos corpos-de-prova de *Pinus*. A resistência de ancoragem diminuiu com o aumento da umidade dos corpos-de-prova. Para as três faixas de umidades consideradas a resistência de ancoragem das barras de aço atingiu um valor máximo que progressivamente foi diminuindo em pequenos saltos a medida que a barra de aço foi sendo retirada, conforme mostra a fig. 6 a seguir.

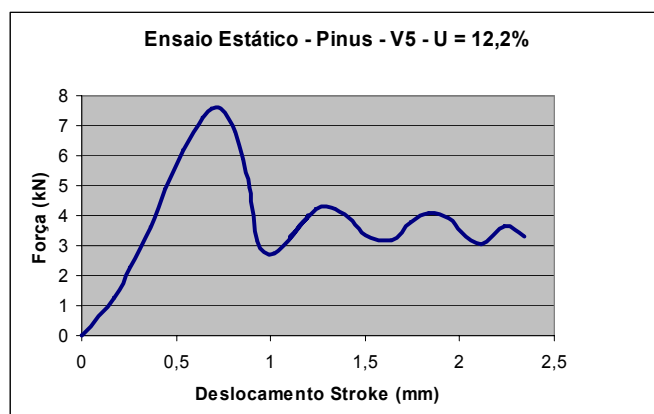


Figura 6 – Comportamento de ancoragem a 45° em relação às fibras – Sikadur 32.

O deslocamento “Stroke” corresponde ao deslocamento entre as garras da máquina de ensaios que prendem as extremidades das barras de aço dos corpos-de-prova.

3.3. Tipos de rupturas observados

Os corpos-de-prova ensaiados apresentaram basicamente quatro formas de ruptura, como mostra a fig. 7 a seguir. Essas formas de ruptura foram as seguintes:

- (a) Ruptura da adesão no aço;
- (b) Ruptura da adesão na madeira;

- (c) Ruptura mista da adesão na madeira e no aço;
- (d) Ruptura da adesão na face do aço com arrancamento da madeira na extremidade do furo;

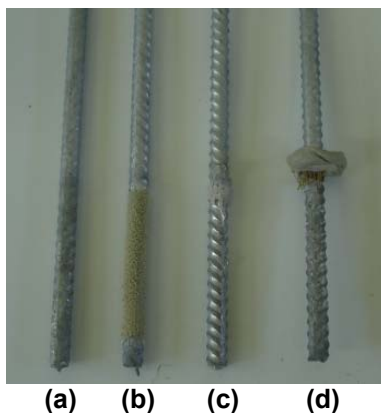


Figura 7 – Formas de ruptura de ancoragem observadas nos ensaios estáticos.

3.4. Ruptura nos corpos-de-prova de Pinus – Sikadur 32

A predominância de ruptura de ancoragem, ocorrida em cerca de 80% dos corpos-de-prova, se deu pela perda de adesão química na superfície do aço com posterior perda da adesão mecânica, conforme mostra a fig. 7(a). A outra forma de ruptura observada foi a ruptura mista da adesão na madeira com o aço, conforme fig. 7 (c), ocorrida em um único corpo-de-prova.

3.5. Ruptura nos corpos-de-prova de Pinus – Compound Adesivo

A predominância de ruptura de ancoragem, neste caso, também foi a perda de adesão química na superfície do aço com posterior perda da adesão mecânica, conforme mostra a fig. 7(a), ocorrendo em 50% dos corpos-de-prova. A outra forma de ruptura predominante foi a ruptura da adesão na madeira, fig. 7(b), ocorrendo em 30% dos corpos-de-prova e nas umidades mais elevadas. Em apenas um dos corpos-de-prova ocorreu a ruptura da adesão na face do aço com arrancamento da madeira na extremidade do furo, fig. 7(d).

3.6. Ruptura nos corpos-de-prova de Eucalipto

Nos corpos-de-prova de eucalipto todas as rupturas ocorreram por perda de adesão no aço, conforme fig. 7 (a), independente da umidade ou tipo de resina considerada.

4. Conclusões

De maneira geral, a forma de ruptura de ancoragem apresenta-se uniforme com perda de adesão química na superfície da barra e posterior perda de adesão mecânica.

A forma de ruptura de ancoragem predominante observada nos corpos-de-prova foi a ruptura de adesão no aço, para ambas as resinas analisadas.

A ruptura na interface da madeira ocorre predominantemente quando se utiliza a resina epóxi do tipo Compound.

Sendo a madeira de *Pinus* uma madeira com menor resistência mecânica, fragmentos de madeira da extremidade externa de ancoragem podem ser arrancados com maior probabilidade quando comparada com a espécie de *Eucalipto*.

A resistência de ancoragem diminui com o aumento da umidade e aumenta com a secagem da madeira.

Não existem evidências de que o tratamento da madeira com CCA influencie na resistência de ancoragem.

Os conectores inclinados com relação às fibras da madeira apresenta-se como um tipo de conexão com alta resistência e rigidez.

Os conectores inclinados trabalham necessariamente a tração, transmitem forças até o limite de capacidade do aço e o valor da resistência última da conexão se aproxima da capacidade máxima de carga do corpo-de-prova.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao apoio financeiro da FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo).

6. Referências bibliográficas

- (1) Gardner, G. (1994). *Reinforced glued laminated timber system epoxy/steel timber composite material*. Pacific Timber Engineering Conference, 1994, p. 548-557.
- (2) Johansson, C. J. (1995). *Glued in bolts*, STEP 1, Almere, Centrum Hout, C14, p. 1-7.
- (3) Ceccotti, A. T. (1995). *Timber-concrete composite structure*. In Timber Engineering, STEP 1, Almere, Centrum Hout, E13, p. 1-12.
- (4) Madsen, B. (1996). *Timber connections with strength and reliability of steel*, International Wood Conference, Toronto Canadá, p. 4-504 4-511.
- (5) Aicher, S., Gustafsson, P., Wolf, M. (1999). Load displacement and bond strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood dentist, rod slenderness and diameter, 1st International RILEM Symposium on Timber Engineering, Stockholm, Sweden, September, 13-14, 1999. p. 369-381.
- (6) Buchanan, A., Moss, P. (1999). *Design of epoxied steel rods in glulam timber*, Pacific Timber Engineering Conference, Rotorua, New Zealand, March 1999, p 286 – 293.

Dissertações e teses

- (7) Matthiesen, J. A. (2001). *Contribuição ao estudo das estruturas mistas. “Estudo experimental de estruturas mistas de madeira e concreto interligados por parafusos”*, Tese (Livre Docência), 84p, Ilha Solteira, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista.
- (8) Pigozzo, J. C. (2002). *Utilização de barras de aço coladas, como conectores, em tabuleiros mistos de madeira de concreto para pontes*. 71p. Texto de qualificação

(Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.

(9) Pigozzo, J. C. (2004). *Estudo e aplicações de barras de aço coladas como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes*. 343p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004.

voltar