

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

AMANDA SAYUMI GOTO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE
ANCORAGEM PARA LIGAÇÕES COM BARRAS DE AÇO COLADAS
EM MADEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2014

AMANDA SAYUMI GOTO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE
ANCORAGEM PARA LIGAÇÕES COM BARRAS DE AÇO COLADAS
EM MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO
2014



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso N° 54

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE ANCORAGEM PARA LIGAÇÕES COM BARRAS DE AÇO COLADAS EM MADEIRA

por

Amanda Sayumi Goto

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 19:30horas do dia 05 de Agosto de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Me. Alexis Kiouranis

(UTFPR)

Prof. Dr. Leandro Waidemam

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Marcelo Guelbert

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho aos meus pais, Sérgio e Gilda, pelos ensinamentos que guiaram a trajetória de minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que sempre me ilumina nas decisões que conduzem a minha vida. Obrigada pela força, coragem e persistência em manter o foco na concretização de meus sonhos, tornando possível a realização deste trabalho.

Ao meu pai Sérgio, pelo esforço de suas inúmeras viagens que proporcionaram um futuro melhor aos seus filhos. Sem dúvida, a sua ausência sempre será sempre motivo de admiração.

À minha mãe Gilda, que manteve a família sempre unida. Sua paciência, dedicação e amor me ensinou princípios de honestidade, respeito, dignidade e fé.

Ao professor Jorge Luís Nunes de Góes, pela orientação e tutoria de minha formação acadêmica. Agradeço pelos seus conselhos, atenção, confiança, e sua amizade que colaboraram para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Às minhas eternas amigas, Érica e Kamila, que proporcionam momentos simples em grandiosos. Vocês sempre me acolheram nas horas de tristeza e mostraram que nossa amizade é capaz de suportar todos os obstáculos que a vida nos impõe.

Aos meus amigos de sala, em especial à Andressa, Ludmila, Isadora e Camila, que compartilharam momentos de conquistas e frustrações. Pelas horas de dedicação, suporte e compreensão que nos fizeram seguir essa etapa sempre unidas.

Ao técnico do Laboratório de Estruturas, Maiko Sedoski e ao grupo PET- Civil, em especial ao Marcos, Dionísio, Giovane e Haddan, que se dispuseram em ajudar o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

GOTO, A. S. **Avaliação da influência do comprimento de ancoragem para ligações com barras de aço coladas em madeira.** 2014. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

O sistema de ligação através de barras de aço coladas em estruturas em madeira vem se tornando popular, principalmente na Europa. Porém, as empresas brasileiras especializadas em estruturas de madeira não utilizam ligações coladas devido principalmente a falta de critérios de dimensionamento e métodos de ensaio normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Este trabalho apresenta um estudo experimental de ligações com barras de aço coladas em madeira de forma a contribuir com o desenvolvimento da tecnologia no Brasil. A relação da resistência última de arrancamento e o comprimento de ancoragem foi investigada e os resultados comparados com os encontrados nas referências bibliográficas. O programa experimental foi conduzido com ensaios de arrancamento de barras com solicitação de apenas um lado, utilizando madeira serrada nativa brasileira (Grapeira), resina epóxi estrutural (Sikadur 32), barras de aço tipo vergalhão (CA - 50) com diâmetro nominal único (6,4 mm), único diâmetro de furo (9,5 mm) e diferentes comprimentos de ancoragem (40, 70, 100, 130 e 160 mm). Os resultados dos ensaios indicaram que o comprimento de ancoragem tem influência significativa sobre o comportamento estrutural de barras de aço coladas em madeira, afetando a força máxima de arrancamento e também o comportamento mecânico da ligação. O valor limite da esbeltez de ancoragem está compreendido no intervalo $13 < \lambda < 25$, o qual corrobora com os valores encontrados na literatura.

Palavras-chave: Ligações em madeira. Resina epóxi. Comprimento de ancoragem. Barras coladas.

ABSTRACT

GOTO, A. S. **Analysis of embedment length effect of glued deformed steel bars in timber.** 2014. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2014.

The wooden structures joints made of glued deformed steel bars are becoming popular, especially in Europe. However, the Brazilian companies specialized in wooden structures do not use this kind of joint mainly due to lack of design criteria and standard test methods on Brazilian Association for Standardization (ABNT). This paper presents the experimental study of glued deformed steel bars in timber to contribute to the development of technology in Brazil. The relationship between maximum pull-out strength and embedment length was investigated and the experimental results were compared with the references. The experimental program was conducted on pull-out one-sided test set-up using sawn Brazilian wood (Grapeira), structural epoxy resin (Sikadur 32), deformed steel bars (CA – 50) with single nominal diameter (6,4 mm), single diameter hole (9,5 mm) and different embedment length (40, 70, 100, 130 and 160 mm). The results of the one hundred pull-out tests indicated that embedment length has significant influence on structural behavior of glued deformed steel bars in timber, affecting the maximum pull-out strength and the ductile performance. The threshold embedment length is in the range $13 < \lambda < 25$ which agrees with the values found in the literature.

Keywords: Timber joints. Epoxy bound. Embedment length. Glued bars.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Igreja Batista Eastview - Auckland | 14 |
| Figura 2 - Ligações com (a) barra roscada na extremidade superior; (b) Chapa de aço com barras coladas; (c) Suporte de aço com barras coladas e (d) Barras de aço passantes. | 15 |
| Figura 3 - Arranjo para injeção da resina ao redor da barra de aço..... | 16 |
| Figura 4 - (a) Barra de aço; (b) Peça em madeira e (c) Esquema do ensaio..... | 19 |
| Figura 5 - Influência do tipo de adesivo | 19 |
| Figura 6 - Influência da inclinação das barras em relação às fibras da madeira | 22 |
| Figura 7 - Relação entre resistência de ancoragem e comprimento de ancoragem | 24 |
| Figura 8 - Valores comparativos da resistência de ancoragem para as três resinas estruturais, variando espessuras da linha de cola e umidade, na madeira <i>Eucalypto citriodora</i> . Sendo: (1) Limite de ruptura da barra; (2) Limite de escoamento. | 25 |
| Figura 9 - Formas de solicitações axiais nas barras coladas: (a) esquema com solicitação de um lado, (b) esquema com solicitações de dois lados. | 26 |
| Figura 10 - Furação do corpo de prova em furadeira de bancada | 29 |
| Figura 11 - Aplicação da resina no interior do furo | 30 |
| Figura 12 - Corpo de prova para o ensaio de arrancamento de barras coladas | 30 |
| Figura 13 - Ensaio de arrancamento das barras de aço coladas em madeira..... | 31 |
| Figura 14 - Corpos de prova embalados com filme de PVC | 32 |
| Figura 15 - Força Última Arrancamento (kN) x Esbeltez de Ancoragem (λ) | 40 |
| Figura 16 - Modos de ruptura, (a) da adesão no aço, (b) mista da adesão na madeira e no aço, (c) da adesão na madeira e, (d) no aço. | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Resultados de determinação do teor de umidade e densidade aparente a 12% | 35 |
| Tabela 2 - Resultados da resistência a compressão paralela às fibras da madeira | 36 |
| Tabela 3 - Resultado das propriedades da madeira | 37 |
| Tabela 4 - Resultado de força última de ruptura à tração em barras de aço (kN) e tensão última de ruptura (MPa)..... | 38 |
| Tabela 5 - Resultado da Força Última de Arrancamento (kN)..... | 38 |
| Tabela 6 - Ocorrência dos modos de rupturas | 41 |
| Tabela 7 - Resumo das resistências e modo de ruptura de arrancamento de barras coladas | 42 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 10 |
| 2 OBJETIVOS | 11 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 11 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 11 |
| 3 JUSTIFICATIVA | 12 |
| 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 4.1 RESINAS ESTRUTURAIS | 18 |
| 4.2 PROPRIEDADES DA MADEIRA..... | 20 |
| 4.3 INCLINAÇÃO DA BARRA DE AÇO EM RELAÇÃO ÀS FIBRAS DA MADEIRA..... | 21 |
| 4.5 DIÂMETRO DA BARRA EM RELAÇÃO A DIREÇÃO DAS FIBRAS DA MADEIRA | 23 |
| 4.4 ESBELTEZ DE ANCORAGEM | 23 |
| 4.6 ESPESSURA DA LINHA DE COLA..... | 24 |
| 4.7 CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO..... | 25 |
| 4.8 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 26 |
| 5 METODOLOGIA..... | 28 |
| 5.1 MATERIAIS..... | 28 |
| 5.2 MÉTODOS | 29 |
| 5.2.1 Preparo do corpo de prova..... | 29 |
| 5.2.2 Ensaio de arrancamento..... | 31 |
| 5.2.3 Determinação do teor de umidade e densidade aparente a 12% da madeira Garapeira .. | 32 |
| 5.2.4 Determinação da resistência à compressão paralela às fibras da madeira Garapeira | 33 |
| 5.2.5 Caracterização do aço..... | 34 |
| 6 RESULTADOS | 35 |
| 6.1 PROPRIEDADES DA MADEIRA..... | 35 |
| 6.2 PROPRIEDADES DO AÇO..... | 37 |
| 6.3 RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE BARRAS DE AÇO COLADAS EM MADEIRA | 38 |
| 6.4 MODOS DE RUPTURA | 40 |
| 6.5 COMPORTAMENTOS DA RESINA | 43 |
| 7 CONCLUSÕES..... | 44 |
| REFERÊNCIAS | 45 |

1 INTRODUÇÃO

A disseminação da indústria de estruturas em madeira iniciou-se principalmente na Europa do pós-guerra, quando se fez necessária a reconstrução das cidades de forma rápida e econômica (BARALDI; JUNIOR, 2002). Essa tendência de industrialização surgiu para simplificar e aumentar a relação custo-benefício das obras.

Para a construção de grandes estruturas compostas de madeira são utilizadas peças de dimensões significativas e extensos vãos, gerando altas solicitações mecânicas nos elementos estruturais. As peças industrializadas devem então ser ligadas por conectores nas interfaces, que além de minimizar os deslocamentos relativos terão a função de transmitir os esforços para a construção.

Um sistema de ligação para peças em madeira que se tornou popular principalmente na Europa são as barras de aço coladas, que segundo Batchelar e Frangiaco (2012) apresentam alta rigidez e capacidade de transferência de esforços na estrutura. Além do mais, os conectores por serem fixados no interior das peças, evitam o processo de corrosão da ligação e proporcionam excelente aparência estética.

No entanto, as empresas brasileiras especializadas em estruturas de madeira não utilizam ligações coladas em larga escala pela falta de critérios de dimensionamento e métodos de ensaio normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Esta pesquisa propõe o estudo experimental do comportamento entre resistência e comprimento de ancoragem para ligação com barras de aço coladas perpendicularmente às fibras da madeira, visando contribuir para a disseminação deste tipo de ligação no país e também servir de suporte para o desenvolvimento de critérios de dimensionamento a serem implementados na norma brasileira para projeto de estruturas de madeira, NBR 7190. Para isto, foram realizados ensaios de arrancamento das barras coladas em peças de madeira da espécie *Apuleia leiocarpa* (Grapeira), variando o comprimento de ancoragem e utilizando teor de umidade constante, mesma espessura de linha de cola, resina estrutural e diâmetro da barra.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a resistência mecânica de ligações por barras de aço coladas em madeira, considerando diferentes comprimentos de ancoragem.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar experimentalmente a relação entre força última de arrancamento e comprimento de ancoragem em ligação com barras de aço coladas em madeira.
- Identificar os modos de ruptura característicos das ligações com barras de aço coladas.
- Investigar o Valor Limite Esbeltez de Ancoragem e comparar com os encontrados na literatura.

3 JUSTIFICATIVA

O desempenho das estruturas em madeira é diretamente influenciado pelo comportamento das ligações, que têm por função a distribuição dos esforços internos e a restrição dos deslocamentos. Considerando que as peças possuem comprimento pré-determinado e devem ser unidas para compor a estrutura, desenvolver ligações resistentes e confiáveis é essencial para garantir a segurança e eficiência do sistema. Nesse contexto, estudos vêm sendo desenvolvidos a fim de encontrar soluções práticas, de custo reduzido e com grande capacidade de carga e rigidez.

Batchelar e McIntosh (1998) comentam que as ligações estruturais podem custar de 5% a 50% do valor dos elementos estruturais e representam 70% do tempo gasto na fase de projeto. Portanto, é fundamental escolher corretamente a ligação no estágio inicial de desenvolvimento do projeto.

Um dos conectores que vem sendo estudados recentemente são as barras de aço coladas em madeira. Essa ligação é muito conveniente para grandes estruturas, visto que apresenta alta resistência e rigidez, proporcionam excelente aparência estética e resistem a momentos fletores, umas das dificuldades em ligações de madeira. Além disto, a madeira protege as barras de aço do processo de corrosão e garante maior segurança da estrutura contra ação do fogo. (PIGOZZO, 2004).

O programa GIROD (*Glued-in Rods for Timber Structure*) criado em 1998 na Europa, incentivou estudos teóricos e experimentais para desenvolver métodos de cálculo e ensaios de ligações com barras de aço coladas em peças de madeira. Entretanto, os pesquisadores Bengtsson, Kemmsies e Johansson (2000) afirmam que a execução e o desempenho do sistema variam de acordo com o país em que são empregadas.

Nesse contexto, o tipo de resina, espécie da madeira, diâmetro das barras e espessura de linha de cola, influenciam a resistência de ancoragem da ligação (HARRIS, 2004) e, portanto, devem-se realizar avaliações teóricas e experimentais para o estudo do desempenho das barras de aço coladas em madeira, visto que não são abordadas na norma brasileira e poucos são os estudos publicados no Brasil.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Riberholt foi o primeiro pesquisador a estudar sobre barras de aço coladas em madeira laminada colada como sistema de ligação para estruturas. A partir de seus estudos foi elaborada a primeira recomendação que estabeleceu os aspectos de projeto para esse sistema de ligação (BUCHANAN; DENG, 1996).

Um breve histórico da utilização dessa ligação é citado por Buchanan, Moss e Wong (2001).

O uso dessa tecnologia começou na Dinamarca por volta de 1980. Uma série de equações para projetos foi apresentada na Europa (Riberholt 1988, Johansen 1995). Na Nova Zelândia, Townsend (1990) e Deng (1997) testaram a resistência à tração de uma única barra de aço, enquanto Korin et al (1999) testaram múltiplas barras. As recomendações de projeto da Nova Zelândia foram dadas por Buchanan e Fairweather (1993) e Buchanan e Moss (1999). (BUCHANAN, MOSS, WONG, 2001).

Uma das principais vantagens da utilização de ligações com barras de aço coladas em peças de madeira é a capacidade de suportar altas solicitações, tornando-a eficiente para compor grandes estruturas (GUSTAFSSON; SERRANO, 2000).

Pigozzo (2004) ressalta que a barra de aço fixada no interior das peças de madeira garante um sistema estrutural com vantagens estéticas se comparado com ligações de chapas dentadas ou parafusos. A madeira também protege os conectores de elevadas temperaturas e do processo de corrosão.

Um exemplo de construção que emprega ligações com barras de aço coladas em madeira é a Igreja Batista Eastview – Auckland na Nova Zelândia, representado na Figura 1 (FRAGIACOMO; BATCHELAR, 2012).



Figura 1 - Igreja Batista Eastview - Auckland
Fonte: Fragiacomio e Batchelar, 2012.

Para a construção de pórticos em madeira é necessário que a estrutura apresente resistência e rigidez ao momento fletor. De acordo com Buchanan e Fairweather (1993), no estudo sobre o desempenho sísmico de pórticos fabricados com Madeira Laminada Colada, as ligações com resinas epóxi são capazes de suportar os esforços. Além das barras de aço coladas em madeira, os autores expõem outros sistemas de ligação para pórticos que utilizam o aço e a resina em sua fabricação (Figura 2).

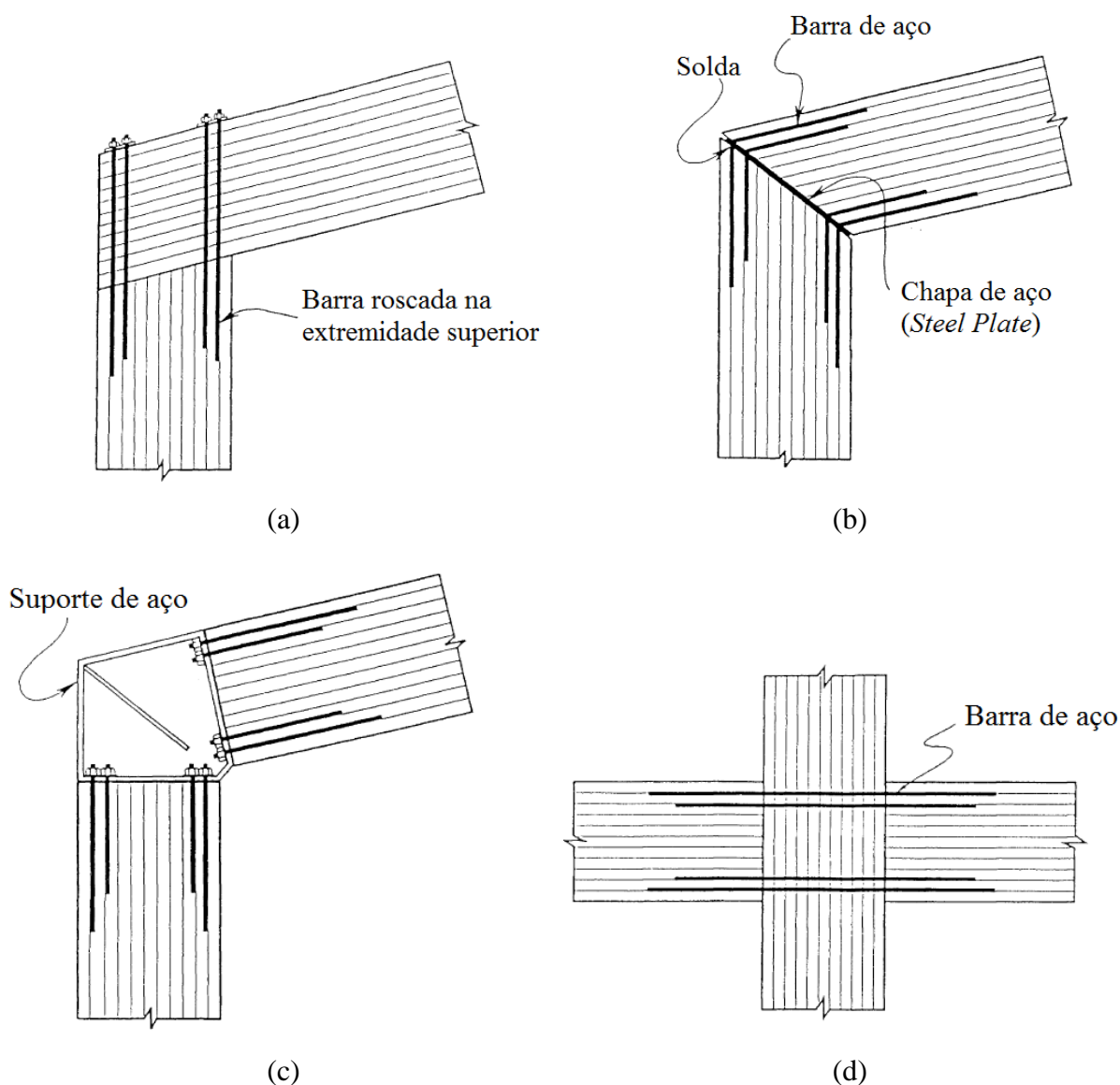


Figura 2 - Ligações com (a) barra rosca na extremidade superior; (b) Chapa de aço com barras coladas; (c) Suporte de aço com barras coladas e (d) Barras de aço passantes.
Fonte: Adaptado de Buchanan e Fairweather, 1993.

Ainda no mesmo estudo, Buchanan e Fairweather (1993), ressaltam a importância da correta execução do processo de colagem das barras de aço na estrutura em madeira para garantir o melhor desempenho da ligação. A Figura 3 apresenta a metodologia adotada pelos pesquisadores em que a resina epóxi é injetada por um furo perpendicular à barra até fluir no furo de aeração, eliminando as eventuais bolhas de ar.

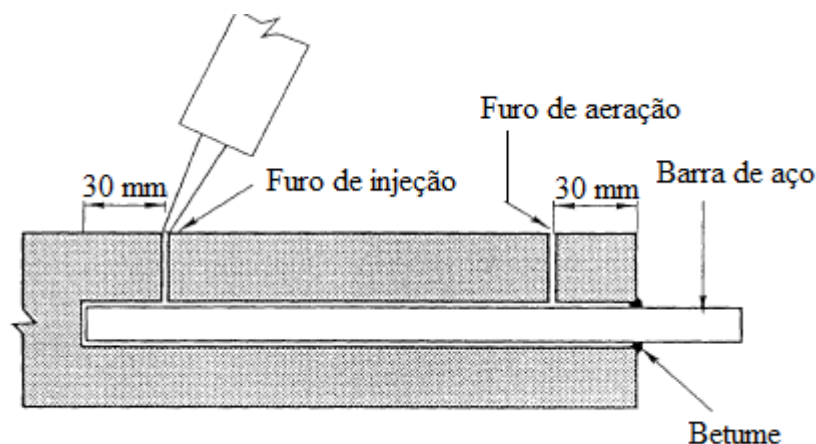


Figura 3 - Arranjo para injeção da resina ao redor da barra de aço.
Fonte: Adaptado de Buchanan e Fairweather, 1993.

O principal aspecto a ser estudado sobre as barras de aço coladas em peças de madeira é a resistência de ancoragem da ligação. Entretanto, para desenvolver uma equação que defina a resistência de ancoragem, devem ser estudados os diversos parâmetros que influenciam seu comportamento.

Com o propósito de avaliar ligações com barras de aço coladas no topo de vigas de Madeira Laminada Colada da espécie *Radiata Pine*, Buchanan e Deng (1996) apresentam um modelo empírico equação (1) baseado nos resultados de 81 ensaios experimentais, que determina a resistência última de ancoragem de barras de aço coladas. Como variáveis, consideraram os efeitos: diâmetro da barra, comprimento de ancoragem, diâmetro do furo, distância do centro do furo à face da madeira, tipo da barra, resina epóxi e umidade da madeira.

$$F_m = 10,9 \times K_b \times K_e \times K_m \times \left(\frac{l}{d}\right)^{0,86} \times \left(\frac{d}{20}\right)^{1,62} \times \left(\frac{h}{d}\right)^{0,5} \times \left(\frac{e}{d}\right)^{0,5} \quad (1)$$

Onde:

F_m = força última média ao arrancamento em kN;

K_b = fator de modificação do tipo da barra. $K_b = 1,0$ para barra rosqueada e $K_b = 0,8$ para vergalhão;

K_e = fator de modificação para a resina epóxi. Para resina Araldite K80, $K_e = 1,0$; Para resina West System ADR310, $K_e = 1,0$ e para resina Araldite 2005, $K_e = 1,17$;

K_m = fator de modificação para a umidade da madeira. Se $U < 14\%$, $K_m = 1,0$; se $14\% \leq U \leq 18\%$, $K_m = 0,9$ ou se $18\% \leq U \leq 22\%$, $K_m = 0,75$;

l = comprimento de ancoragem para o intervalo $5d \leq l \leq 17,5d$;

d = diâmetro da barra para o intervalo $12 \text{ mm} \leq d \leq 24 \text{ mm}$;

h = diâmetro do furo para o intervalo $1,15d \leq h \leq 1,4d$;

e = distância da extremidade ao centro da barra, superior ou igual a $1,5d$.

Ainda segundo Buchanan e Deng (1996) para o uso em dimensionamento deve-se utilizar o valor de resistência de ancoragem característica, ao invés do valor médio. Considerando o coeficiente de variação de 16% e distribuição normal de probabilidades a equação toma a seguinte forma equação (2).

$$F_k = 8,16 \times K_b \times K_e \times K_m \times \left(\frac{l}{d}\right)^{0,86} \times \left(\frac{d}{20}\right)^{1,62} \times \left(\frac{h}{d}\right)^{0,5} \times \left(\frac{e}{d}\right)^{0,5} \quad (2)$$

Onde todos os termos foram definidos na equação (1).

Considerando os principais fatores que interferem na resistência de ancoragem, Buchanan e Moss (1999) desenvolveram a equação (3) que determina a resistência característica última de ancoragem das barras de aço coladas em madeira, considerando o coeficiente de variação de 16% e distribuição normal de probabilidades. Como variáveis, consideraram os efeitos: diâmetro da barra, comprimento de ancoragem, diâmetro do furo, distância do centro do furo à face da madeira, tipo da barra, resina epóxi e umidade da madeira.

$$F_k = 6,73 \times K_b \times K_e \times K_m \times \left(\frac{l}{d}\right)^{0,86} \times \left(\frac{d}{20}\right)^{1,62} \times \left(\frac{h}{d}\right)^{0,5} \times \left(\frac{e}{d}\right)^{0,5} \quad (3)$$

Onde:

F_k = força característica última ao arrancamento em kN;

K_b = fator de modificação do tipo da barra. $K_b = 1,0$ para barra rosqueada e $K_b = 0,8$ para vergalhão;

K_e = fator de modificação para a resina epóxi. Para resina Araldite K80, $K_e = 1,0$; Para resina West System, $K_e = 0,86$ e para resina Araldite 2005, $K_e = 1,2$;

K_m = fator de modificação para a umidade da madeira. Se $U < 15\%$, $K_m = 1,0$; se $15\% \leq U \leq 22\%$, $K_m = 0,8$;

l = comprimento de ancoragem para o intervalo $5d \leq l \leq 20d$;

d = diâmetro da barra para o intervalo $12 \text{ mm} \leq d \leq 24 \text{ mm}$;

h = diâmetro do furo para o intervalo $1,15d \leq h \leq 1,4d$;

e = distância da extremidade ao centro da barra, superior ou igual a $1,5d$.

Por mais que esse sistema de ligação seja considerado uma nova técnica e que permita vantagens em relação às ligações convencionais, devem-se realizar estudos de todos os parâmetros que influenciam o desempenho das barras coladas em madeira a fim de prever o comportamento estrutural. Considerando que no Brasil o mercado da construção civil utiliza espécies e materiais distintos dos outros países, deve-se estudar melhor o comportamento das ligações com barras coladas em madeira. O uso de equações empíricas desenvolvidas em outros países podem não representar as condições de uso do Brasil.

4.1 RESINAS ESTRUTURAIIS

As resinas estruturais são substâncias aderentes capazes de unir materiais em sua superfície mediante o fenômeno físico-químico que através de interações moleculares transfere as tensões entre as peças. Atualmente as resinas sintéticas fenol-resorcinol formaldeídos (PRF), poliuretanas (PUR) e as epóxi (EP) são as mais empregadas em estruturas de madeira.

Gustafsson e Serrano (2000) com a finalidade de analisar o desempenho ao cisalhamento das barras de aço coladas em madeira, realizaram ensaios com corpo de prova em madeira laminada colada C35 e C24, conforme ilustra a Figura 4. As peças foram perfuradas no centro da seção para colagem da barra de aço e posterior fechamento com argila sintética e uma película de Teflon. Após a cura da resina, o material de fechamento foi retirado e realizaram-se ensaios de arrancamento da barra de aço colada para PUR, PRF e EP. A técnica permitiu apenas a colagem do perímetro lateral da barra, evitando o efeito de resistência da base.

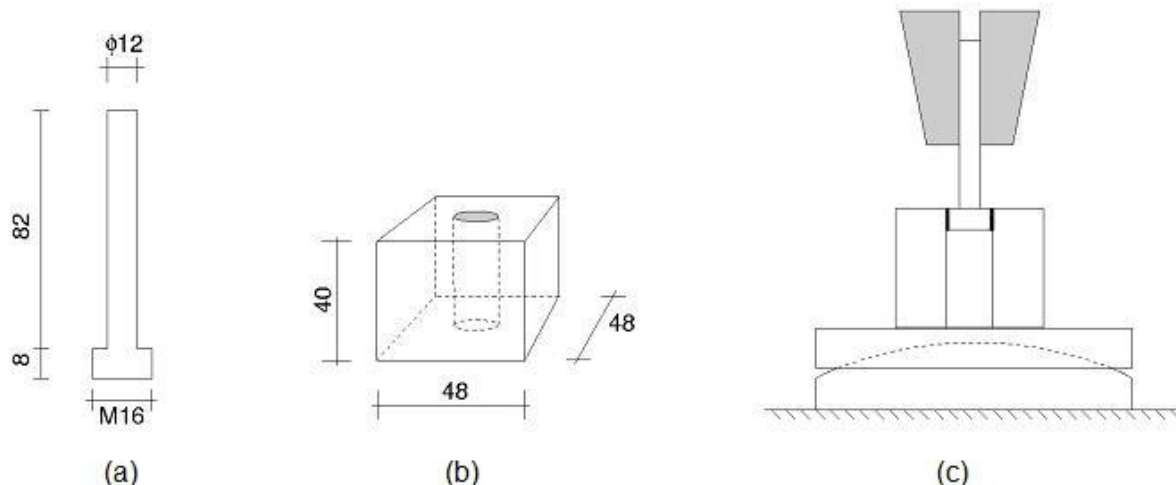


Figura 4 - (a) Barra de aço; (b) Peça em madeira e (c) Esquema do ensaio.
Fonte: Adaptado de Gustafsson e Serrano, 2000.

A Figura 5 representa os resultados obtidos de Gustafsson e Serrano (2000) quanto à influência do tipo de resina aplicado. Verificou-se que a resina EP suportou maiores solicitações do que a PRF e a PUR, sendo que a PRF apresentou ruptura de adesão na face do aço, a PUR ruptura da adesão na madeira e a EP ruptura na interface da madeira com o arrancamento de fibras de madeira.

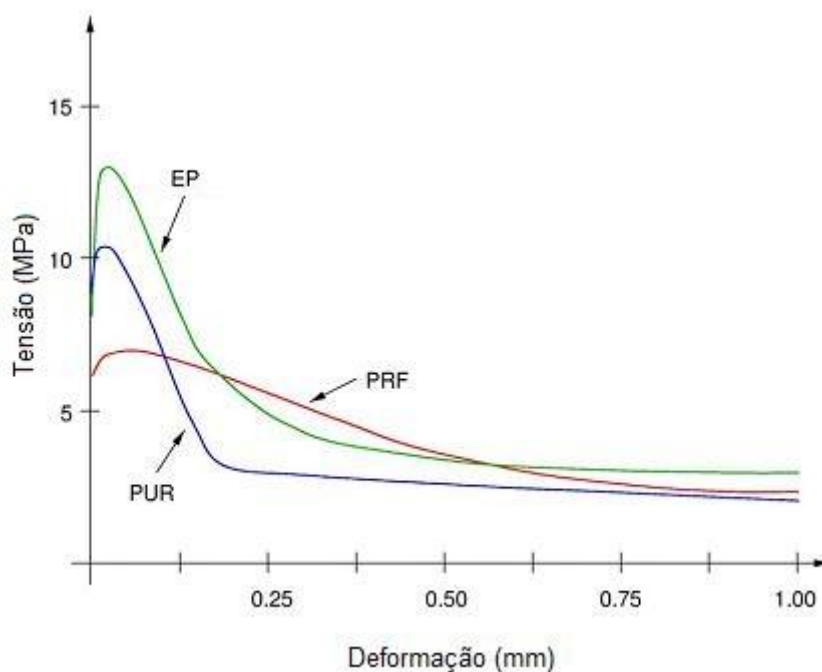


Figura 5 - Influência do tipo de adesivo
Fonte: Adaptado de Gustafsson e Serrano, 2000.

Pigozzo (2004) estudou quatro resinas diferentes, sendo três EP e uma PUR à base de óleo de mamona desenvolvido pelo Instituto de Química de São Carlos – USP na ancoragem de barras de aço em estruturas de madeira. A PUR à base de óleo de mamona apresentou rupturas frágeis de cisalhamento da resina. Os ensaios para as EP revelaram que oitenta por cento das rupturas ocorreram na superfície do furo e do aço, e em apenas uma amostra ocorreu ruptura por cisalhamento da madeira na interface do aço, caracterizando que noventa por cento das falhas de ancoragem deram-se por perda de adesão química e posterior perda de adesão mecânica.

Molina (2008) e Molina, Calil e Carreira (2009) utilizando duas resinas EP (Compound Adesivo e Sikadur 32) e uma resina PUR (Purweld 665) para a ancoragem de barras de aço em madeira, concluíram que as EP são mais adequadas na ancoragem de barras de aço em madeira. Ambas mostraram comportamento dinâmico semelhante, entretanto a resina Sikadur 32 apresentou maior resistência. Verificou-se que os modos de ruptura ocorreram em todos os materiais: aço, madeira e resina.

Conforme Batchelar e McIntosh (1998) as resinas do tipo epóxi de baixa viscosidade são eficientes para ligações com barras de aço coladas, os experimentos que não apresentaram resultados satisfatórios decorreram-se de erros na mistura e aplicação da resina ao redor da barra. Dessa forma, as ligações coladas com barras devem ser produzidas em indústrias especializadas e com alto controle de qualidade, já que os erros não são visivelmente perceptíveis.

4.2 PROPRIEDADES DA MADEIRA

As propriedades da madeira variam conforme a espécie e são determinantes no projeto de estruturas. A NBR 7190 (1997) define os procedimentos para caracterização das espécies e fixa as condições gerais que devem ser seguidas no projeto, execução e controle das estruturas em madeira. O conhecimento da influência das propriedades mecânicas da madeira garante o aproveitamento do material e segurança dos sistemas construtivos.

Ensaio com a espécie *Pinus oocarpa*, densidade aparente de 450 – 550 kg/m³, e *Eucalypto citriodora*, densidade aparente de 950 – 1100 kg/m³, levaram Pigozzo (2004) concluir que em madeiras com 12% de umidade as propriedades mecânicas da madeira são pouco significativas, quando considerado o comportamento da ligação como um todo. A utilização da

resina Sikadur 32 para a produção de ligações com barras coladas, demonstrou que a madeira Pinus foi 5,2% mais resistente que o Eucalipto, já com a resina Compound Injeção a resistência de ancoragem do Eucalipto foi 10,8% maior que o Pinus. Comprovando que a variação da resina estrutural é mais significativa que a variação nos parâmetros mecânicos. Entretanto, para madeiras com 22% de teor de umidade verificou que as propriedades causaram maior interferência nos resultados dos ensaios com resina Compound Injeção. O autor observou que a influência dos parâmetros mecânicos no comportamento das ligações com barras de aço, necessitam de pesquisas direcionadas a avaliar várias espécies de madeira, com resinas e condições de umidade diferentes.

Bengtsson, Kennies e Johannsson (2000) para propor métodos de controle de produção de ligações com barras de aço coladas em madeira, constataram que não existe correlação entre a densidade da madeira e a resistência de ancoragem.

Embora Pigozzo (2004) e Bengtsson, Kennies e Johannsson (2000) apresentarem verificações de que a densidade da madeira não influencia significativamente na resistência de ancoragem, Hiberholt (1988, apud FELIGION at. al, 2003) apresenta a equação (4), que considera o efeito para determinar a força axial de arrancamento das barras de aço coladas.

$$R_{ax,k} = f_{wl} \times \rho_k \times d \times l_g \quad (4)$$

Onde:

$R_{ax,k}$ é a força axial de arrancamento (para $l_g \leq 200$ mm);

f_{wl} é o fator da resina estrutural (para epóxi $f_{wl} = 0,037$);

ρ_k é a densidade característica da madeira;

d é o menor diâmetro entre a barra e o tamanho do furo;

l_g é o comprimento de ancoragem.

4.3 INCLINAÇÃO DA BARRA DE AÇO EM RELAÇÃO ÀS FIBRAS DA MADEIRA

As propriedades mecânicas da madeira dependem da orientação das fibras, de modo que a maior resistência à tração encontra-se na direção paralela às fibras, e a menor resistência à tração é observada na direção normal às fibras.

Com isto, Gustafsson e Serrano (2000) realizaram ensaios experimentais a fim de determinar os modos de ruptura das ligações com barras de aço coladas em peças de madeira, variando a inclinação das barras em relação à orientação das fibras da madeira. Verificou-se que todas as rupturas ocorreram na interface da madeira com o arrancamento de fibras, sendo que a maior quantidade de pedaços foi encontrada na direção 0° .

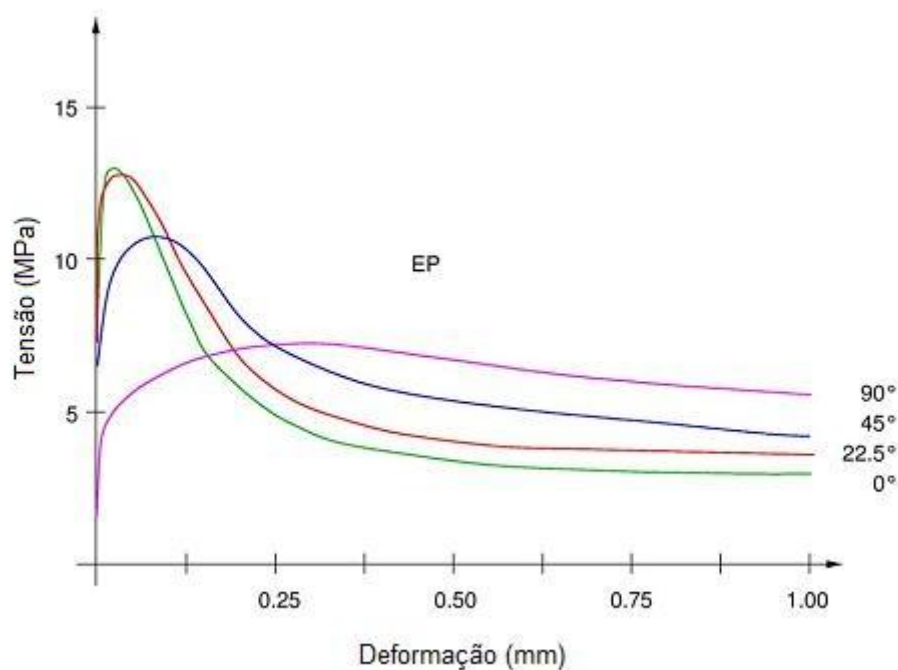


Figura 6 - Influência da inclinação das barras em relação às fibras da madeira
 Fonte: Adaptado de Gustafsson e Serrano, 2000.

A Figura 6 apresenta o diagrama tensão x deformação das barras coladas com utilização de resina epóxi para várias inclinações. Gustafsson e Serrano (2000) verificaram o comportamento elasto-frágil e elasto-plástico da ligação para o ângulo de 0° e 90° , respectivamente.

Pigozzo (2004) avaliou os efeitos sobre a resistência de ancoragem de barras de aço coladas em três direções em relação às fibras, 0° , 45° e 90° . E constatou que a resistência de ancoragem das resinas epóxi na direção perpendicular foi maior que nas direções 45° e 0° , além disso, as maiores variações de resistência ocorreram na direção 0° e menor variação na direção 90° e 45° .

4.5 DIÂMETRO DA BARRA EM RELAÇÃO A DIREÇÃO DAS FIBRAS DA MADEIRA

Conforme Pigozzo (2004) as variações no diâmetro das barras de aço utilizadas como conectores em peças de madeira não apresentou interferência na resistência de ancoragem das barras coladas nas direções de 0°, 45° e 90° em relação às fibras. A área de ancoragem é definida como o perímetro do furo vezes o comprimento do furo. A pesquisa comparou áreas de ancoragem iguais para diâmetros da barra de aço com 6,3 mm, 8,0 mm e 10,0 mm a fim de estudar a influência na resistência da ligação. Os resultados indicaram que áreas de ancoragem iguais em mesmas condições, com barras de diâmetros diferentes, apresentam as mesmas resistências de ancoragem para as três direções. O estudo foi realizado utilizando madeira de *Pinus oocarpa* seco ao ar.

4.4 ESBELTEZ DE ANCORAGEM

Chama-se esbeltez de ancoragem o parâmetro de proporcionalidade entre comprimento de ancoragem e o diâmetro da barra de aço, dado pela equação (5).

$$\lambda = \frac{l_a}{d} \quad (5)$$

Onde:

l_a é o comprimento de ancoragem;

d é o diâmetro da barra de aço;

λ é a esbeltez da ancoragem.

Com o propósito de avaliar ligações com barras de aço coladas perpendicularmente às fibras da madeira, Buchanan e Deng (1996) realizaram experimentos que evidenciaram proporcionalidade entre tensão de ruptura e comprimento de ancoragem. Concluíram que a relação é válida até um determinado comprimento de ancoragem, os acréscimos de comprimento não influenciaram a resistência característica da ligação. Na Figura 7 são

apresentados os resultados de resistência característica de ancoragem em função do comprimento de ancoragem e do diâmetro da barra, utilizando a Equação (1).

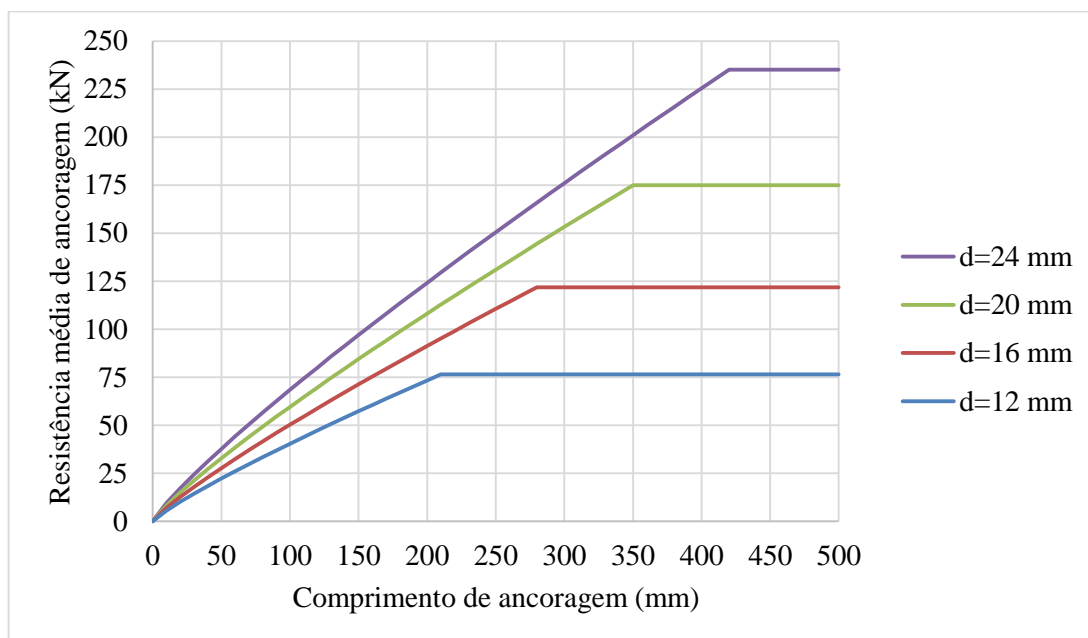


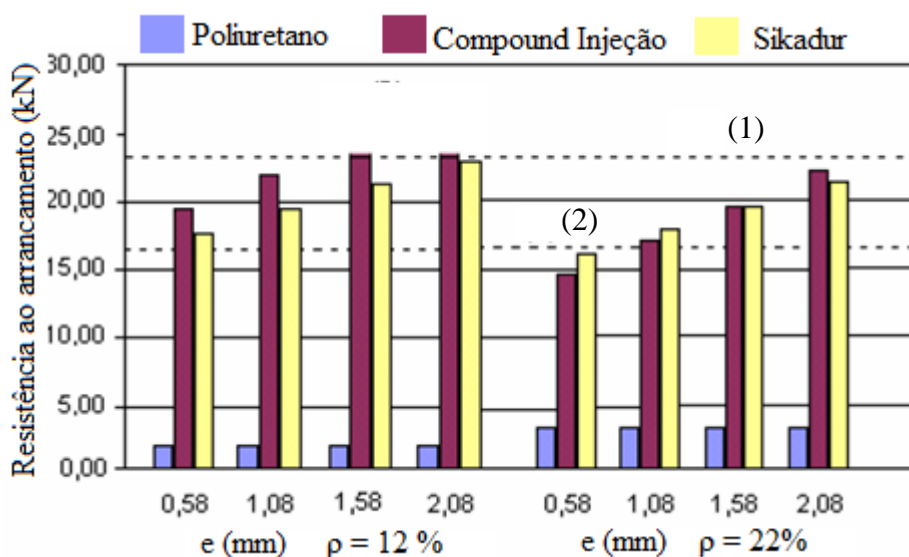
Figura 7 - Relação entre resistência de ancoragem e comprimento de ancoragem
Fonte: Adaptado de Buchanan e Deng, 1996.

De acordo com Buchanan e Moss (1999) o comprimento de ancoragem superior a vinte vezes o diâmetro da barra não apresentou acréscimos significativos na resistência de ancoragem. Ainda, recomendam que a distância mínima entre o centro da barra e a face da peça de madeira não deve ultrapassar 1,5 vezes o diâmetro da barra.

4.6 ESPESSURA DA LINHA DE COLA

Estudos de Buchanan e Moss (1999) comprovaram que a espessura da linha de cola para ligações com barras de aço coladas em madeira laminada colada interferiam na resistência de ancoragem.

Pigozzo (2004) com a finalidade de estudar esta influência para as resinas Sikadur 32, Compound Injeção e Poliuretana, testou peças de madeira com 8,0 cm de profundidade e diâmetros de 8,5 mm, 9,5 mm, 10,5 mm e 11,5 mm. Os resultados experimentais e estatísticos, ilustrados na Figura 8, apontaram um ganho de resistência na ligação conforme o aumento da espessura de linha de cola (e).



**Figura 8 - Valores comparativos da resistência de ancoragem para as três resinas estruturais, variando espessuras da linha de cola e umidade, na madeira *Eucalypto citriodora*. Sendo: (1) Limite de ruptura da barra; (2) Limite de escoamento.
Fonte: Adaptado de Pigozzo, 2004.**

Bengtsson, Kennsies e Johannsson (2000) também realizaram ensaios de arrancamento das barras de aço coladas em madeira variando as resinas estruturais e espessuras de linha de cola em 0,5 mm, 1,0 mm e 2,0 mm. Para a resina fenol resorcinol formoldeído a resistência de ancoragem diminuiu com o aumento da espessura da linha de cola. Os autores afirmam que esta redução deu-se devido à contração da resina após a aplicação. Entretanto, a utilização da resina epóxi e poliuretana apresentaram acréscimos na resistência de ancoragem conforme a espessura da linha de cola aumentava.

4.7 CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO

A forma de realização de ensaio também pode influenciar nos resultados, sendo importante o esquema do ensaio representar as condições reais de solicitação da ligação. Pigozzo (2004) indica que os ensaios podem ser realizados de duas formas distintas, esquema com solicitação de um lado e esquema com solicitação de dois lados, de forma que o segundo proporciona valores maiores de resistência de ancoragem, possivelmente pelo efeito de compressão transversal que surge perpendicularmente ao comprimento de ancoragem da barra, Figura 9.

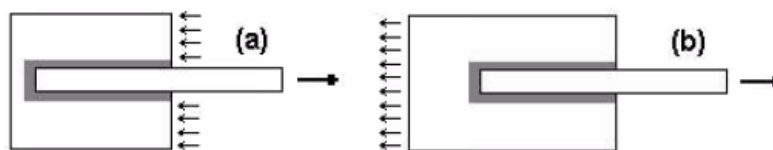


Figura 9 - Formas de solicitações axiais nas barras coladas: (a) esquema com solicitação de um lado, (b) esquema com solicitações de dois lados.

Fonte: Adaptado de Pigozzo, 2004

4.8 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Certamente as ligações com barras de aço coladas em madeira têm se mostrado uma alternativa eficiente se comparada com as ligações comuns como parafusos, chapas metálicas e cavilhas. Sua alta capacidade de transferência de tensões inclusive de momentos fletores, desperta o interesse de engenheiros, arquitetos e pesquisadores sobre os fatores que interferem o desempenho de resistência da ligação.

As pesquisas revelam que a resina do tipo epóxi é a mais recomendável para a colagem da barra de aço na madeira, sendo que a resina Sikadur 32 destaca-se por suportar maiores esforços. A influência da resina estrutural é tão acentuada que a resistência da madeira, e densidade da madeira pouco influenciam na resistência de ancoragem das barras coladas em madeira.

Outro parâmetro determinante é o comprimento de ancoragem. Estudos indicam que acréscimos no tamanho do comprimento de ancoragem superior a vinte vezes o diâmetro da barra não apresenta ganhos consideráveis na resistência, enquanto que o incremento na espessura da linha de cola aumenta a resistência de ancoragem da ligação.

Os pesquisadores concluíram que se coladas na direção perpendicular em relação às fibras, as barras de aço como sistema de ligação em peças de madeira suportam maiores solicitações. No entanto, deve-se atentar ao processo de execução para garantir a eficiência da ligação quanto ao comportamento mecânico.

Quando as barras de aço são coladas na madeira com teor de umidade superior a 22%, o desempenho da ligação fica comprometido, já que ocorrem falhas de adesão da resina na madeira.

Embora os pesquisadores realizem experimentos e análises numéricas para prever o comportamento da barra de aço colada em madeira, a execução e os materiais empregados no

sistema variam conforme o ambiente em que são fabricadas e, portanto, deve-se verificar os parâmetros determinantes da ligação de acordo com a região.

Considerando todos os fatores que influenciam no comportamento das ligações com barras de aço coladas em madeira sugere-se que sempre que possível sejam realizados ensaios em corpos de prova a fim de certificar a resistência das mesmas.

5 METODOLOGIA

5.1 MATERIAIS

Para a fabricação dos corpos de prova utilizou-se a madeira da espécie *Apuleia leiocarpa* (Garapeira), com seção transversal de 7,5 cm x 19,0 cm e 20,0 cm de comprimento.

A furação dos comprimentos de ancoragem no corpo de prova em madeira foi realizada com broca de aço rápido com 30 cm de comprimento (tipo mourão) e diâmetro de 9,5 mm, instaladas em furadeira de bancada.

Foi empregado como conector da ligação, barras de aço Gerdau do tipo CA-50 (Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7480, 2007) com diâmetro nominal de 6,4 mm.

A colagem da barra de aço na madeira foi realizada com a resina estrutural epóxi Sikadur 32 (Sika S.A.), que conforme o fabricante apresenta máxima resistência após sete dias de cura.

Tanto a madeira, quanto as barras de aço utilizadas na pesquisa foram caracterizadas atendendo, respectivamente, as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7190, anexo B (1997) e NBR ISO 6892-1 (2013).

Os ensaios de caracterização dos materiais e arrancamento das barras de aço coladas em madeira, foram efetuados na Máquina Universal de ensaios modelo DL 30000 com capacidade máxima de 300 kN, localizada no Laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Preparo do corpo de prova

A partir de uma viga de madeira da espécie *Apuleia leiocarpa* (Grapeira) foram confeccionados, com serra circular de bancada, vinte corpos de prova com seção transversal de 7,5 cm x 19,0 cm e 20,0 cm de comprimento ao longo das fibras da madeira.

Em cada corpo de prova foram feitos cinco furos de 9,5 mm de diâmetro e comprimentos de ancoragem 4,0 cm, 7,0 cm, 10,0 cm, 13,0 cm e 16,0 cm. A furação foi realizada em furadeira de bancada e com auxílio de régua de nível a fim de garantir a perpendicularidade dos furos (Figura 10). Além disso, o diâmetro dos furos (D) e distância da borda da peça (e) foram efetuados respeitando os limites propostos por Buchanan e Moss (1999) respectivamente, $D = 1,25d$ e $e \geq 1,5d$, onde d é o diâmetro da barra.



Figura 10 - Furação do corpo de prova em furadeira de bancada

Após a furação, barras de aço com 6,4 mm de diâmetro foram coladas na direção perpendicular às fibras da madeira utilizando a resina epóxi Sikadur 32, que foi aplicada no interior dos furos com o auxílio de sacos plásticos, conforme ilustra a Figura 11. As barras de

aço foram introduzidas nos furos com movimentos rotativos da esquerda para direita e vice-versa para eliminar eventuais bolhas de ar na resina.



Figura 11 - Aplicação da resina no interior do furo

Os corpos de prova, já com as barras de aço coladas, permaneceram em repouso durante sete dias até completarem o período de cura indicado pelo fabricante da resina estrutural, Figura 12.



Figura 12 - Corpo de prova para o ensaio de arrancamento de barras coladas

5.2.2 Ensaio de arrancamento

O processo consistiu na aplicação de uma força de tração axial na barra colada em corpo de prova, utilizando a máquina universal de ensaios DL 30000 – EMIC, com o registro de pares de força e deslocamento. Na falta de metodologia específica de ensaio para barras coladas, foram utilizadas as mesmas especificações da norma brasileira NBR ISO 6892 (2013).



Figura 13 - Ensaio de arrancamento das barras de aço coladas em madeira

A Figura 13 apresenta o aparato para a realização do ensaio de arrancamento das barras de aço coladas em madeira, sendo adaptado um dispositivo para fixar o corpo de prova na parte superior da máquina universal de ensaios, configurando o chamado ensaio com solicitação de um único lado (vide Figura 9.a).

Através dos resultados obtidos foi elaborado um diagrama de Força de Arrancamento (kN) x Esbeltez de Ancoragem, tornando possível analisar o comportamento da ligação com barras de aço coladas em madeira da espécie Garapeira, na direção perpendicular às fibras da madeira.

5.2.3 Determinação do teor de umidade e densidade aparente a 12% da madeira Garapeira

Após os ensaios de arrancamento, embalou-se os corpos de prova com filme de PVC (Figura 14), para manter o teor de umidade até que fossem extraídos os corpos de prova de caracterização da madeira (umidade, densidade e compressão paralela às fibras).



Figura 14 - Corpos de prova embalados com filme de PVC

Seguindo as recomendações do anexo B, da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7190 (1997), foram retiradas doze amostras dos corpos de prova embalados, com seção transversal de 3,0 cm x 2,0 cm e 5,0 cm de comprimento ao longo das fibras, extraídos aleatoriamente dos corpos de prova analisados no ensaio de arrancamento.

O teor de umidade em porcentagem (U) foi calculado pela equação (6).

$$U = \frac{m_i - m_s}{m_s} \quad (6)$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas.

m_s é a massa seca da madeira, em gramas.

Para obter a massa inicial da madeira, pesaram-se as amostras em balança com precisão de 0,001g. Em seguida registrou-se a massa seca, colocando-as em estufa com temperatura de aproximadamente 100 °C até que atingissem variações menores que 0,05% da última pesagem.

Para determinar a densidade aparente em g/cm³ (ρ_{ap}) utilizou-se a equação (7).

$$\rho_{ap} = \frac{m_i}{A \times B \times C} \quad (7)$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas.

A é a dimensão da largura do corpo de prova, em centímetros.

B é a dimensão da altura do corpo de prova, em centímetros.

C é a dimensão do comprimento em relação às fibras do corpo de prova, em centímetros.

Após o cálculo da densidade aparente, utilizou-se o gráfico de Kollman para determinar a densidade aparente corrigida a 12% em g/cm³.

5.2.4 Determinação da resistência à compressão paralela às fibras da madeira Garapeira

A determinação da resistência à compressão paralela às fibras foi realizada em doze amostras de madeira com dimensões de 5,0 cm x 5,0 cm x 15,0 cm, extraídos aleatoriamente dos corpos de prova analisados no ensaio de arrancamento.

As amostras foram submetidas a ensaios destrutivos com carregamento monotônico crescente de 10 MPa/min e os resultados de resistência à compressão foram registrados pela máquina universal de ensaios.

Após, analisou-se os resultados considerando a distribuição normal de probabilidade para obter o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras, descrita na equação (8).

$$f_k = f_m \times (1 - 1,645 \times CV) \quad (8)$$

Onde:

f_k é o valor característico;

f_m é o valor médio;

CV é o coeficiente de variação.

Sendo que,

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_m)^2}{n} \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (10)$$

$$CV = \frac{\sigma}{f_m} \quad (11)$$

Onde:

σ^2 é a variância;

x_i é o valor da resistência a compressão paralela às fibras, em que i é o número da amostra;

x_m é o valor da média aritmética da resistência a compressão paralela às fibras da madeira

n é o número de amostras;

σ é o desvio padrão;

f_m é a média aritmética da resistência a compressão paralela às fibras.

5.2.5 Caracterização do aço

As propriedades do aço foram obtidas por meio de ensaios de tração, conforme a norma brasileira NBR ISO 6892 (2013).

Realizou-se ensaios na máquina universal de ensaios, com a aplicação de uma carga axial crescente e contínua de 10 MPa/min até que fosse verificada a ruptura das amostras, totalizando em seis ensaios de tração. Assim, determinou-se a resistência última do aço, para posterior comparação com os resultados obtidos dos ensaios de arrancamento da barra colada em madeira.

6 RESULTADOS

6.1 PROPRIEDADES DA MADEIRA

Os resultados dos ensaios de determinação do teor de umidade e densidade das peças de madeira Garapeira são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados de determinação do teor de umidade e densidade aparente a 12%

| Corpo de prova | Dimensões | | | Massa inicial (g) | Massa seca (g) | Umidade (%) | Densidade ap (kg/m ³) | Densidade aparente corrigida a 12% (Kollmann) |
|----------------|-----------|---------|---------|-------------------|----------------|-------------|-----------------------------------|---|
| | 20 (mm) | 30 (mm) | 50 (mm) | | | | | |
| CP - 1 | 19,85 | 29,00 | 49,55 | 30,496 | 27,125 | 12,43% | 1069,16 | 1070 |
| CP - 2 | 19,75 | 30,05 | 48,50 | 29,774 | 26,276 | 13,31% | 1034,39 | 1030 |
| CP - 3 | 19,75 | 29,95 | 49,35 | 26,272 | 22,907 | 14,69% | 900,00 | 890 |
| CP - 4 | 20,25 | 29,60 | 49,80 | 23,862 | 20,920 | 14,06% | 799,39 | 790 |
| CP - 5 | 19,35 | 29,60 | 48,55 | 23,315 | 20,636 | 12,98% | 838,44 | 840 |
| CP - 6 | 19,75 | 29,40 | 49,00 | 24,061 | 21,236 | 13,30% | 845,67 | 850 |
| CP - 7 | 19,15 | 29,15 | 48,10 | 21,779 | 19,162 | 13,66% | 811,12 | 810 |
| CP - 8 | 19,85 | 29,80 | 48,40 | 25,516 | 21,936 | 16,32% | 891,23 | 870 |
| CP - 9 | 19,70 | 30,00 | 48,30 | 25,256 | 22,368 | 12,91% | 884,77 | 880 |
| CP - 10 | 19,65 | 29,00 | 49,30 | 25,358 | 22,334 | 13,54% | 902,63 | 900 |
| CP - 11 | 19,05 | 29,65 | 47,65 | 23,497 | 20,502 | 14,61% | 873,03 | 860 |
| CP - 12 | 20,25 | 30,25 | 49,70 | 25,754 | 22,456 | 14,69% | 845,94 | 840 |
| Média | | | | | | 13,88% | 891,31 | 865 |

A Tabela 2 mostra os resultados da tensão a compressão paralela às fibras da madeira. Sendo que corpo de prova número 3 (CP- 3) foi desconsiderado dos resultados, pois houve erro na execução do ensaio.

Tabela 2 - Resultados da resistência a compressão paralela às fibras da madeira

| Corpo de prova | Tensão (MPa) |
|-----------------------|--------------|
| CP - 1 | 74,6 |
| CP - 2 | 77,4 |
| CP - 4 | 76,7 |
| CP - 5 | 68,9 |
| CP - 6 | 71,7 |
| CP - 7 | 76,0 |
| CP - 8 | 67,7 |
| CP - 9 | 71,6 |
| CP - 10 | 68,0 |
| CP - 11 | 71,0 |
| CP - 12 | 74,0 |
| CP - 13 | 78,0 |
| Valor médio (MPa) | 72,97 |
| Variância | 12,35 |
| Desvio Padrão | 3,51 |
| Coef. de Variação (%) | 4,8 |
| f_k (MPa) | 67,19 |

O valor característico (f_k) foi obtido através da equação (8), considerando o coeficiente de variação de 0,048.

De acordo com a norma brasileira NBR 7190 (1997), “na caracterização usual das propriedades de resistência de um dado lote de material, os resultados de ensaios realizados com diferentes teores de umidade da madeira, contidos no intervalo entre 10% e 20%, devem

ser apresentados com os valores corrigidos para a umidade padrão de 12%”, conforme a equação 12.

$$f_{12} = f_{u\%} \times \left[1 + \frac{3 \times (U\% - 12)}{100} \right] \quad (12)$$

Onde:

f_{12} é a propriedade de resistência corrigida para a umidade padrão de 12%;

$f_{u\%}$ é a propriedade de resistência da madeira a ser corrigida;

$U\%$ é o teor de umidade da madeira.

Tabela 3 - Resultado das propriedades da madeira

| Nome comum | Nome científico | Teor de umidade aparente (%) | $\rho_{ap,m}^{1)}$ (kg/m ³) | $\rho_{ap,m} 12\%^{2)}$ (kg/m ³) | $f_{c0,m}^{3)}$ (MPa) | $f_{c0,k}^{4)}$ (MPa) | $n^{5)}$ |
|------------|--------------------------|------------------------------|--|---|--------------------------|--------------------------|----------|
| Garapeira | <i>Apuleia leiocarpa</i> | 13,88 | 891 | 865 | 77,08 | 70,98 | 12 |

¹⁾ $\rho_{ap,m}$ é a massa específica aparente média
²⁾ $\rho_{ap,m} 12\%$ é a massa específica aparente média corrigida a 12% de umidade, conforme Kollman
³⁾ $f_{c0,m}$ é a resistência média a compressão paralela às fibras corrigido para a umidade padrão de 12%
⁴⁾ $f_{c0,k}$ é a resistência a compressão paralela às fibras característica, admitindo distribuição normal de probabilidade (Gaussiana) corrigido para a umidade padrão de 12%
⁵⁾ n é o número de amostras

6.2 PROPRIEDADES DO AÇO

Os resultados dos ensaios para determinação da propriedade das barras de aço tipo vergalhão, CA-50 de 6,4 mm, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado de força última de ruptura à tração em barras de aço (kN) e tensão última de ruptura (MPa)

| Corpo de prova CA – 50 (6,4 mm) | Força última de ruptura à tração (kN) | Tensão última de ruptura à tração (MPa) |
|--|--|--|
| CP - A1 | 21,67 | 673,61 |
| CP - A2 | 22,35 | 694,75 |
| CP - A3 | 22,53 | 700,34 |
| CP - A4 | 23,35 | 725,83 |
| CP - A5 | 20,84 | 647,81 |
| CP – A6 | 23,42 | 728,01 |
| Média | 22,36 | 695,06 |
| Variância | 0,82 | 792,19 |
| Desvio padrão | 0,91 | 28,15 |
| Coef. de Variação (%) | 4,0 | 4,0 |

6.3 RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE BARRAS DE AÇO COLADAS EM MADEIRA

As Forças Últimas de Arrancamento (kN) das barras de aço coladas em madeira Garapeira são apresentadas na Tabela 5. Os índices de esbeltez calculados para os comprimentos de ancoragem de 4,0 cm, 7,0 cm, 10,0 cm, 13,0 cm e 16,0 cm são, respectivamente, 6,3, 10,9, 15,6, 20,3 e 25. Os valores omitidos são devido a problemas na furação dos corpos de prova e/ou problemas na execução dos ensaios.

Tabela 5 - Resultado da Força Última de Arrancamento (kN)

| Corpo de prova | (continua) | | | | |
|-----------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| | $\lambda = 6,3$ | $\lambda = 10,9$ | $\lambda = 15,6$ | $\lambda = 20,3$ | $\lambda = 25$ |
| CP - 1 | 12,80 | 20,91 | 21,28 | 21,41 | 21,47 |
| CP - 2 | 12,61 | 20,74 | 21,06 | 21,51 | 21,53 |

| | | | | | (conclusão) |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| CP - 3 | 12,80 | 20,11 | 21,21 | 20,53 | 21,32 |
| CP - 4 | 11,65 | 19,59 | 21,68 | 21,24 | 20,14 |
| CP - 5 | - | 19,15 | 19,27 | 21,09 | 19,97 |
| CP - 6 | 10,17 | 20,92 | 21,32 | 18,71 | 20,52 |
| CP - 7 | 10,92 | 16,42 | 21,70 | 21,37 | 19,75 |
| CP - 8 | 11,39 | 17,92 | 21,27 | 19,11 | 21,02 |
| CP - 9 | 11,41 | 18,99 | 18,66 | 20,31 | 21,28 |
| CP - 10 | 12,14 | 20,89 | 20,82 | 21,19 | 19,93 |
| CP - 11 | 13,60 | 21,35 | 17,88 | 21,64 | 21,13 |
| CP - 12 | 13,72 | 20,44 | 20,40 | 21,14 | 21,45 |
| CP - 13 | 10,94 | 19,24 | 21,29 | 21,64 | 21,58 |
| CP - 14 | 11,83 | 20,61 | 22,52 | 21,29 | 21,64 |
| CP - 15 | 13,68 | 20,97 | 21,41 | 21,12 | 21,43 |
| CP - 16 | 13,54 | 21,50 | 21,80 | 21,21 | 21,81 |
| CP - 17 | 14,48 | 21,98 | 16,46 | 22,09 | 22,00 |
| CP - 18 | 13,21 | 21,25 | 21,49 | 21,16 | 22,10 |
| CP - 19 | 11,94 | 19,43 | 21,38 | 20,68 | 20,81 |
| CP - 20 | 13,69 | 18,89 | 21,41 | - | 21,90 |
| Média | 12,45 | 20,07 | 20,72 | 20,97 | 21,14 |
| Variância | 1,34 | 1,76 | 2,13 | 0,66 | 0,49 |
| Desvio padrão | 1,16 | 1,33 | 1,46 | 0,81 | 0,70 |
| Coef. de Variação (%) | 9,32 | 6,61 | 7,04 | 3,86 | 3,33 |

Dos resultados apresentados na Tabela 5 destacam-se os baixos coeficientes de variação encontrados em todos os casos, em especial nos testes com índice de esbeltez acima de vinte, inferiores até que os testes de caracterização do aço (CV= 4,0%). Pode-se perceber também uma tendência de redução na variabilidade dos resultados a medida que se aumenta o comprimento de ancoragem.

A Figura 15 apresenta a curva (Força Máxima de Arrancamento por Esbeltez de Ancoragem) média experimental obtida dos resultados dos cem testes conduzidos na pesquisa.

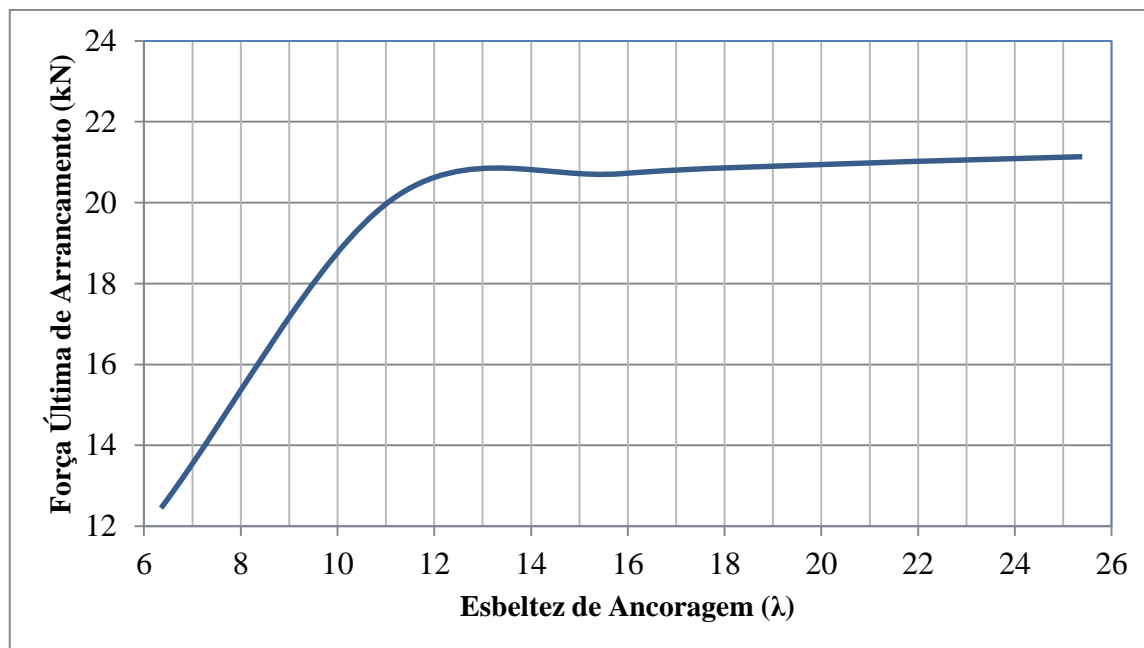


Figura 15 - Força Última Arrancamento (kN) x Esbeltez de Ancoragem (λ)

Os resultados indicam que a Força Última de Arrancamento é proporcional à Esbeltez de Ancoragem, ou seja, tende a ficar constante a partir de treze vezes o diâmetro da barra, valor inferior aos indicados pela bibliografia.

Neste contexto, a ligação com barras de aço coladas com resina Sikadur 32 em peças de madeira Garapeira, apresentaram resultados de desempenho mecânico melhores do que os indicados na literatura internacional. Entretanto, ainda assim deve-se desenvolver estudos direcionados aos outros parâmetros que influenciam a resistência da ligação.

6.4 MODOS DE RUPTURA

Por meio de identificação visual, pode-se verificar quatro modos distintos de ruptura: ruptura de adesão da resina no aço, de adesão mista na madeira e no aço, de adesão da resina na madeira e, de ruptura no aço (Figura 16).



Figura 16 - Modos de ruptura, (a) da adesão no aço, (b) mista da adesão na madeira e no aço, (c) da adesão na madeira e, (d) no aço.

De acordo com os resultados obtidos para os cem corpos de prova ensaiados, fez-se a Tabela 6, mostrando os valores em porcentagens de ocorrência de cada um dos modos de ruptura em relação a esbeltez de ancoragem.

Tabela 6 - Ocorrência dos modos de rupturas

| Modo de ruptura | $\lambda = 6,3$ | $\lambda = 10,9$ | $\lambda = 15,6$ | $\lambda = 20,3$ | $\lambda = 25$ |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| a - ruptura da adesão no aço | 65% | 45% | 5% | 5% | 0% |
| b - ruptura mista da adesão na madeira e no aço | 20% | 30% | 15% | 10% | 5% |
| c - ruptura da adesão na madeira | 15% | 5% | 15% | 10% | 5% |
| d - ruptura no aço | 0% | 20% | 65% | 75% | 90% |

A Tabela 6 deixa evidente que o modo de ruptura da ligação é diretamente influenciado pelo comprimento de ancoragem. No caso do comprimento de ancoragem de 4,0 cm ($\lambda = 6,3$) o modo de ruptura característico foi o de ruptura da adesão no aço (a), já para o comprimento de ancoragem de 7,0 cm ($\lambda = 10,9$) os modos característicos são o (a) e o (b). Para os comprimentos de ancoragem de 10 cm, 13 cm e 16 cm há predominância do modo de ruptura no aço, sempre com porcentagem de ocorrência crescente, para cada um dos diferentes comprimentos de ancoragem.

Confrontando os resultados de resistência última de arrancamento com os modos de ruptura característicos, elaborou-se a Tabela 7 que define o comportamento mecânico das ligações testadas nesse trabalho.

Observando apenas o valor da resistência última média ao arrancamento pode-se concluir que o índice de esbeltez acima do valor treze é suficiente para garantir 90% da resistência máxima, entretanto, observando o modo de ruptura nota-se que o mesmo comprimento de ancoragem proporciona por volta de 50% de ruptura da barra de aço.

Tabela 7 - Resumo das resistências e modo de ruptura de arrancamento de barras coladas

| Dados | $\lambda = 6,3$ | $\lambda = 10,9$ | $\lambda = 15,6$ | $\lambda = 20,3$ | $\lambda = 25$ |
|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| Porcentagem de ocorrência do modo de ruptura no aço | 0% | 20% | 65% | 75% | 90% |
| Resistência última média do aço a tração (kN) | 22,36 | 22,36 | 22,36 | 22,36 | 22,36 |
| Resistência última média ao arrancamento de barras coladas (kN) | 12,45 | 20,07 | 20,72 | 20,97 | 21,14 |
| Porcentagem de resistência ao arrancamento comparada com a resistência média do aço a tração | 55,7% | 89,8% | 92,7% | 93,8% | 94,5% |

O modo de ruptura na barra de aço é desejável por dois principais motivos: primeiro o aço é reconhecidamente um material com baixa dispersão de propriedades mecânicas, fruto do processo industrializado com rigoroso controle de qualidade, contribuindo para que o coeficiente de variação dos ensaios de arrancamento de barras torne-se baixo, com grandeza compatível com o aço e, segundo, pois o aço é um material com comportamento dúctil à tração, favorecendo a segurança das estruturas que fizerem uso desse tipo de ligação.

Dessa forma, para definir um valor limite de esbeltez de ancoragem deve-se atentar para dois dados em conjunto, a porcentagem de resistência ao arrancamento comparada com a resistência média de tração do aço e a porcentagem de ocorrência do modo de ruptura no aço. Assim é possível afirmar que considerando as condições de contorno da pesquisa o valor do Limite de Esbeltez de Ancoragem está compreendida no intervalo de $13 < \lambda < 25$, o que corrobora com os valores encontrados na literatura.

6.5 COMPORTAMENTOS DA RESINA

A resina Sikadur 32 apresentou aumento de temperatura durante o processo de homogeneização e considerável aumento de viscosidade conforme era aplicada no interior dos furos. O que, possivelmente, explica erros de adesão da resina no aço e na madeira. Uma alternativa para evitar tais falhas seria preparar pequenas quantidades da mistura, diminuindo o tempo de manuseio e conseqüentemente a viscosidade.

Por mais que se tenha seguido a metodologia apresentada, verificou-se a incorporação de bolhas de ar na resina, em alguns casos, que geraram falhas de adesão do adesivo no aço e/ou na madeira. Apesar dos resultados demonstrarem que a má colagem de algumas barras não influenciou diretamente na força última de arrancamento, o ocorrido evidencia que a fabricação da ligação com barras de aço coladas deve ser executada por profissionais altamente treinados.

Embora a Sikadur 32 apresente limitações e dificuldade no processo de colagem, a resina mostrou resultados excelentes para a resistência de ancoragem, e, portanto é indicada para a colagem das barras de aço na ligação de madeira.

7 CONCLUSÕES

O programa experimental conduzido nessa pesquisa possibilita tecer as seguintes conclusões:

- O fator esbeltez de ancoragem, definido como o quociente do comprimento de ancoragem pelo diâmetro da barra, exerce considerável influência nas ligações com barras de aço coladas em madeira. Tal influência ocorre, pois interferem os resultados da resistência última de ancoragem, assim como os modos de ruptura, influenciando, por conseguinte no comportamento mecânico (frágil ou dúctil) da ligação.

- Foram identificados quatro modos de rupturas, sendo eles: ruptura de adesão no aço, ruptura de adesão mista na madeira e no aço, ruptura de adesão na madeira e ruptura no aço.

- Há ganho de resistência na ligação com barras de aço coladas conforme aumenta-se o comprimento de ancoragem, no qual após um limite no comprimento a resistência tende a apresentar resultados constantes.

- Comprimentos de ancoragem de 13 vezes o diâmetro da barra são suficientes para garantir 90% da resistência última, considerando a resistência última máxima do aço como o valor limite máximo.

- Comprimentos de ancoragem da ordem de 25 vezes o diâmetro da barra são suficientes para garantir 90% de probabilidade de ocorrência do modo de ruptura caracterizado pela ruptura de tração no aço.

- O valor Limite de Esbeltez de Ancoragem está compreendido no intervalo $13 < \lambda < 25$, o qual corrobora com os valores encontrados na literatura.

- A quantidade de fatores que interferem na resistência de ligações com barras de aço coladas em madeira é extensa e para quantificar seus efeitos devem ser realizadas mais pesquisas sobre o assunto.

- A resina epóxi Sikadur 32 apresentou bons resultados de resistência de ancoragem, para a colagem de barras de aço coladas em madeira.

- O processo de colagem das barras de aço com Sikadur 32, deve ser realizado eliminando-se bolhas de ar, com resina totalmente homogeneizada e ainda com baixa viscosidade, a fim de garantir a trabalhabilidade, aumentando a eficiência de adesão da resina na madeira e no aço.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7190, Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 107, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7480, Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.13, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR ISO 6892-1, Materiais metálicos — Ensaio de Tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 70, 2013.

BARALDI, Lívio T; CALIL, Carlito J. Método de ensaio de ligações de estruturas de madeira por chapas com dentes estampados. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 18, p. 1-23, 2002.

BATCHELAR, Mark. L.; MCINTOSH, Ken.A. Structural joints in glulam. **NZTimber Design Journal**, v. 7, n. 4, p.13-20,1998.

BENGTSSON, Charlotte; KEMMSIES, Martin; JOHANSSON, C. Production control methods for glued-in rods for timber structures. **Proceedings WCTE**, p. 7-4, 2000.

BUCHANAN, Andrew H.; DENG, James X. Strength of epoxied steel rods in glulam timber. **International wood engineering conference**. Christchurch, Nova Zelândia, p. 4-488 – 2-495, 1996.

BUCHANAN Andrew. H; FAIRWEATHER R. H. Seismic design of glulam frame structures. **Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering**, v.26, n.4, p. 415-436, dez, 1993.

BUCHANAN, Andrew. H.; MOSS, P. Design of epoxied steel rods in glulam timber. **Proceeding of Pacific Timber engineering conference**. Rotorua, Nova Zelândia, p. 286 – 293, mar. 1999.

BUCHANAN, Andrew; MOSS, P.; WONG, N. Ductile moment-resisting connections in glulam beams. **NZSEE Conference**. Taupo, New Zealand. 2001.

CORREIA, Juliano. **Avaliação experimental de ligações de peças mistas madeira-concreto e entre peças de madeira com conectores de barra de aço e de concreto**. 2010. 128 f. Dissertação (Magister scientiae) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

FELIGIONI, L. et al. Influence of glue rheology and joint thickness on the strength of bonded-in rods. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 61, n. 4, p. 281-287, jul.2003.

FRAGIACOMO, Massimo; BATCHELAR, Mark. Timber frame moment joints with glued-in steel rods. I: Design. **Journal of Structural Engineering**, v. 138, n. 6, p. 789-801, jun. 2012.

GUSTAFSSON, Per J.; SERRANO, Erik. Predicting the pull-out strength of glued-in rods. **Proceedings of the Sixth World Conference on Timber Engineering**, p.7.4.2000.

MOLINA, Julio. C. **Análise do comportamento dinâmico da ligação formada por barras de aço coladas para tabuleiros mistos de madeira e concreto para pontes**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MOLINA, Julio. C; CALIL, Carlito. J; CARREIRA, Marcelo. R. Pullout Strength of Axially Loaded Steel Rods Bonded in Glulam at a 45° Angle to the Grain. **Materials Research**, v. 12, n. 4, 427-432, 2009.

PIGOZZO, Julio. C. **Estudo e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes**. 2004. 358f. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

STUART, Harris. **Fire resistance of epoxy-grouted steel rod connections in laminated veneer lumber (LVL)**. Tese (Mestrado em Engenharia de Incêndio) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Canterbury, Christchurch, 2004.