

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DIONISIO PALHARINI JUNIOR

**LIGAÇÕES COM BARRAS DE AÇO COLADAS EM MADEIRA – A
INFLUÊNCIA DO SENTIDO DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO
ARRANCAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO
2015

DIONISIO PALHARINI JUNIOR

**LIGAÇÕES COM BARRAS DE AÇO COLADAS EM MADEIRA – A
INFLUÊNCIA DO SENTIDO DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO
ARRANCAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Nunes de Góes

CAMPO MOURÃO
2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

LIGAÇÕES COM BARRAS DE AÇO COLADAS EM MADEIRA – A INFLUÊNCIA DO SENTIDO DAS FIBRAS NA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO

por

Dionisio Palharini Junior

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 9h10min do dia 24 de novembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Nery Knöner

(UTFPR)

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luis Nunes de Góes

(UTFPR)
Orientador

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

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:
Prof. Dr. Leandro Waidemam

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

Aos meus pais Dionisio e Fabiola.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre abençoou e iluminou minhas decisões, me protegeu nos momentos difíceis, sempre me dando força para continuar lutando e batalhando pelos meus sonhos. Obrigado pela realização deste trabalho e por todas as conquistas que o Senhor tem colocado no meu caminho.

Aos meus pais Dionisio e Fabiola, pela educação que deram aos seus filhos, sempre baseada no respeito, na honestidade, na união e principalmente no amor. Agradeço por toda dedicação, por estarem presentes em todos os momentos da minha formação, pela proteção e por todo amor e carinho que sempre me deram. Vocês sempre serão meu maior exemplo e inspiração. Serei eternamente grato a vocês, meus pais.

Ao meu irmão Braulio, pelo companheirismo em todas as horas, pela preocupação, pela bondade, honestidade e principalmente pelo exemplo de profissional e ser humano.

Ao meu irmão Marlon, que apesar da distância, sempre lutou para estar presente em todos os momentos. Tenho muito orgulho de você, por tudo que conquistou, sempre com as próprias mãos. Agradeço pelo seu exemplo de batalha e determinação, não só no esporte, mas na vida.

Agradeço ao orientador, professor, tutor, ao amigo Jorge Luís Nunes de Góes que sempre foi um exemplo na minha formação. Agradeço por todas as oportunidades, pelos conselhos, pela atenção, pelos ensinamentos e por ter tido a oportunidade de aprender um pouquinho de todo seu conhecimento.

A Bruna Bernardi Maia que esteve presente em todos os momentos, me dando força, me incentivando, me inspirando para tentar, a cada dia, ser uma pessoa melhor. Agradeço por todos esses anos de companheirismo, de sorrisos, conselhos, broncas e principalmente alegrias. Sem você, com certeza, não chegaria onde eu cheguei. Obrigado por tudo!!

Aos amigos do APÊ 21, João Negrão, Leonardo Sant e Henrique Jarbas Bilbao (praticamente também morava lá) pela amizade que construímos durante todos esses anos. Obrigado meus amigos por todas as caronas, todos os momentos de felicidade e alegria que passamos durante esses anos. Jamais vou esquecer das derrotas sofridas pelo João Negrão no videogame, dos momentos árdus de estudo

do Leo Sant e de todas as músicas tocadas na bateria vocal com o Henrique Jarbas Bilbao. Obrigado meus irmãos.

Aos amigos, Álvaro, Calió, Fabrício, Jean, Menegon, Tonon, Phineas, Negr, Jarbas, Sant e Gustavo Moura. Obrigado por todos esses anos de amizade, por todos os momentos de alegria que passamos juntos.

Agradeço ao grupo PET e a todos os membros que passaram pelo grupo. Obrigado pelo comprometimento, responsabilidade e ajuda mútua. Obrigado por tudo que vocês me ajudaram a conquistar, principalmente a amizade de cada um.

Ao técnico do laboratório de estruturas, Maiko Sedoski, por toda ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

PALHARINI JUNIOR, D. **Ligações com barras de aço coladas em madeira – a influência do sentido das fibras na resistência ao arrancamento.** 2015. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

As ligações com barras de aço coladas em madeira vêm se tornando populares, principalmente na Europa, por apresentarem alta resistência e rigidez, além de proporcionarem uma excelente aparência estética sendo um dos mais promissores tipos de ligação para industrialização das estruturas de madeira no mundo. Este trabalho busca avaliar o comportamento desse tipo de ligação, de modo a contribuir com o desenvolvimento da tecnologia no Brasil. Foi realizada uma análise experimental comparando as resistências últimas de arrancamento e os modos de ruptura de barras de aço coladas em madeira variando a direção das barras, perpendicular e paralela às fibras da madeira. Foram utilizados nos testes a madeira serrada nativa *Apuleia leiocarpa* (Garapeira), resina epóxi de alta resistência (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), totalizando 75 ensaios de arrancamento de barras. Os resultados dos ensaios indicaram que a força última de arrancamento na direção paralela às fibras é ligeiramente inferior se comparado com a direção perpendicular às fibras, para valores da esbeltez de ancoragem no intervalo $6,35 \leq \lambda < 15,97$. Para valores da esbeltez de ancoragem compreendidos no intervalo $15,97 \leq \lambda \leq 25,39$ a resistência última de arrancamento foi semelhante nas duas direções, uma vez que a ruptura se deu pela resistência à tração da barra de aço. Houveram variações no modo de ruptura característico para o índice de esbeltez de 11,11, indicando que a aderência da resina na madeira nas ligações com barras de aço coladas no sentido perpendicular às fibras é superior se comparado a aderência das barras coladas no sentido paralelo às fibras da madeira.

Palavras-chave: Ligações em madeira. Resina Epóxi. Direção das fibras da madeira. Barras de aço coladas.

ABSTRACT

PALHARINI JUNIOR, D. **Timber connections with glued-in steel rods – the influence of the grain direction in the pull-out strength.** 2015. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

Timber connections with glued-in steel rods are becoming popular, especially in Europe, exhibit high strength and stiffness, and provide an excellent aesthetic appearance is one of the most promising types of connection for manufacturing wooden structures in the world. This paper aims to evaluate the behavior of this type of connection in order to contribute to the development of technology in Brazil. An experimental analysis was performed comparing the pull-out strength and the failure modes with glued-in deformed steel rods parallel and perpendicular to the grain direction of wood. The experimental program was conducted using sawn Brazilian wood (Garapeira), 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 seventy five tests indicated that pull-out strength for rods set parallel to the grain is slightly lower compared with rods set perpendicular to the grain for range of slenderness ratio $\lambda = 6,32 - 15,87$. For range of slenderness ratio $\lambda = 15,87 - 25,39$ the pull-out strength was similar in both directions of the grain and the failure is given by the tensile strength of the steel bar. There were variations in the characteristic failure mode for the slenderness ratio of 11,11, indicating that the adhesion of the resin in the wood for connections with deformed steel bars glued perpendicularly to the grain is higher than glued-in bars parallel to the grain direction.

Keywords: Timber joints. Epoxy resin. Grain direction of wood. Glued-in steel bars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de aplicações para barras de aço coladas	18
Figura 2 - Estrutura espacial em madeira laminada colada com ligação utilizando barras de aço coladas	19
Figura 3 - Modelos de cálculo propostos nos últimos anos.....	19
Figura 4 - Parâmetros que influenciam o comportamento mecânico de barras de aço coladas.....	20
Figura 5 - Colagem das barras de aço nos corpos de prova.....	21
Figura 6 - Força Última Arrancamento (kN) x Esbeltez de Ancoragem (λ).....	22
Figura 7 - Influência do tipo da resina estrutural	23
Figura 8 - Força de ruptura para diferentes diâmetros e comprimentos de ancoragem	25
Figura 9 - Influência da distância entre o furo e a borda do elemento.....	26
Figura 10 - Resistência ao arrancamento comparando-se três resinas estruturais...	27
Figura 11 - Carga de Ruptura (kN) x Espessura da linha de cola (mm).....	28
Figura 12 - Geometria dos corpos de prova.....	29
Figura 13 - Força de arrancamento (kN) x Teor de umidade (%).....	30
Figura 14 - Propriedades geométricas das séries M12, M16 e M20	31
Figura 15 - Valores de Força de Ruptura para amostras com madeira de alta e baixa densidade.....	31
Figura 16 - Modos de ruptura observados por Goto et al. (2014).....	36
Figura 17 - a) ruptura na interface madeira/resina, b) ruptura à tração na madeira, c) ruptura do bloco de madeira por múltiplas barras, d) ruptura por aplicação de força de arrancamento oblíqua.	37
Figura 18 - Métodos para realização dos ensaios de arrancamento das barras	38
Figura 19 - Exemplo de ligação onde a barra de aço atua no sentido paralelo e perpendicular às fibras da madeira	39
Figura 20 – Modelo dos corpos de prova	42
Figura 21 – Confeção dos corpos de prova.....	43
Figura 22 - Ensaio de arrancamento das barras de aço coladas em madeira	44
Figura 23 - Ensaio de caracterização do aço	47
Figura 24 - Força última de arrancamento (kN) x Esbeltez de Ancoragem (λ).....	53

Figura 25 - Comparação entre as médias de força última de arrancamento.....	55
Figura 26 - Modos de ruptura, a) falha de adesão da resina na madeira, b) falha de adesão do aço na resina, c) falha de adesão mista, d) ruptura na madeira, e) ruptura no aço	56
Figura 27 - Comparação dos resultados com equações empíricas desenvolvidas nos últimos anos	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores mínimos da distância entre o furo e a borda do elemento	26
Tabela 2 - Características dos corpos de prova	42
Tabela 3 - Resultado dos ensaios para determinação do teor de umidade e densidade aparente.....	48
Tabela 4 - Resultado dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras da madeira	49
Tabela 5 - Resultado das propriedades da madeira.....	50
Tabela 6 - Resultado de força última de ruptura à tração (kN) e tensão última de ruptura à tração (MPa)	50
Tabela 7 - Resultado da força última de arrancamento (kN) para barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira	52
Tabela 8 - Resultado da Força Última de Arrancamento (kN) para barras de aço coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira retirado de Goto et al. (2014)	53
Tabela 9 - Ocorrência dos modos de ruptura para barras coladas no sentido paralelo às fibras da madeira	57
Tabela 10 - Ocorrência dos modos de ruptura obtidos por Goto et al. 2014 para barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira	57
Tabela 11 - Análise de variância para o índice de esbeltez 6,35	59
Tabela 12 - Análise de variância para o índice de esbeltez 11,11	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 JUSTIFICATIVA	16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 COMPRIMENTO DE ANCORAGEM	21
4.2 RESINA ESTRUTURAL	23
4.3 DIÂMETRO DA BARRA DE AÇO	24
4.4 DISTÂNCIA DO FURO A BORDA	25
4.5 ESPESSURA DA LINHA DE COLA	27
4.6 UMIDADE DA MADEIRA	28
4.7 DENSIDADE DA MADEIRA.....	30
4.8 MODELOS EMPÍRICOS DE CÁLCULO	32
4.9 MODOS DE RUPTURA	35
4.10 MÉTODOS DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	37
4.11 DIREÇÃO DAS FIBRAS DA MADEIRA	38
4.12 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	39
5 METODOLOGIA	41
5.1 MATERIAIS	41
5.2 MÉTODOS	41
5.2.1 Preparação dos corpos de prova	41
5.2.2 Ensaio de arrancamento das barras	43
5.2.3 Determinação do teor de umidade e densidade aparente	44
5.2.4 Determinação da resistência à compressão paralela às fibras	45
5.2.5 Caracterização do aço	47
6 RESULTADOS E ANÁLISES	48
6.1 PROPRIEDADES DA MADEIRA	48
6.2 PROPRIEDADES DO AÇO	50
6.3 RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DAS BARRAS COLADAS NO SENTIDO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA	51

6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM BARRAS COLADAS NO SENTIDO PERPENDICULAR AS FIBRAS MADEIRA.....	53
6.5 MODOS DE RUPTURA	56
6.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	58
6.7 COMPARAÇÃO DO RESULTADOS COM MODELOS EMPÍRICOS	60
7 CONCLUSÕES	62
8 REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DAS PRESSUPOSIÇÕES (ANOVA).....	67

1 INTRODUÇÃO

O uso de elementos estruturais de madeira vem crescendo devido aos avanços promovidos pelas pesquisas no setor. A necessidade de se vencer espaços amplos e submetidos a maiores solicitações faz com que o dimensionamento das estruturas se torne mais complexo, necessitando o aprimoramento e o domínio das técnicas utilizadas em sua concepção.

A demanda por ligações com alta resistência e rigidez promoveu o desenvolvimento de pesquisas acerca da resistência das ligações utilizando barras de aço coladas em madeira. Tais ligações, além de apresentarem alta capacidade de transferência de esforços internos e excelente comportamento em situações de incêndio, também se mostraram atraentes para a indústria por apresentarem uma grande vantagem econômica e arquitetônica em sua utilização.

A tecnologia de conexões com barras de aço coladas em madeira, começou a se desenvolver no final da década de 1970, sendo Riberhold (1977) o pioneiro a estudar o comportamento desse tipo de conector. Seus estudos deram origem as primeiras recomendações técnicas para elaboração de projetos. Desde então, muitos autores propuseram trabalhos no sentido de avaliar a influência dos diversos parâmetros internos e externos, que influenciam o comportamento e o desempenho desse tipo de ligação.

Na década de 1990, um grande número de trabalhos experimentais foram realizados em todo o mundo, e diferentes modelos de cálculo foram propostos. Em 1998, deu-se início ao projeto europeu GIROD (*Glued-in Rods for Timber Structure*), que teve como proposta, dividir grupos de pesquisa para se estudar separadamente os diferentes parâmetros que influenciam o comportamento de ligações utilizando barras de aço coladas em madeira. Inúmeras análises experimentais foram realizadas e diretrizes para o processo de fabricação e controle de qualidade foram propostas, resultando em uma proposta final de implementação no Eurocode 5. Entretanto, os pesquisadores concluíram que o texto proposto não abordou todos os fatores necessários para se criar um modelo de dimensionamento.

A complexidade desse tipo de ligação é devida ao elevado número de parâmetros internos e externos que a compõem, dentre eles, parâmetros geométricos, materiais e condições de carregamento. Dentre os principais fatores

que influenciam o comportamento das ligações com barras de aço coladas em madeira tem-se o comprimento de ancoragem, diâmetro da barra, distância da borda, direção das fibras, tempo e tipo do carregamento, tipo do adesivo, espessura da linha de cola, densidade e umidade da madeira.

Assim sendo, este trabalho busca avaliar experimentalmente a resistência mecânica de ligações com barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira, de modo que os resultados são confrontados com valores obtidos na literatura, afim de verificar se o sentido das fibras da madeira tem influência significativa na resistência mecânica de ligações com barras de aço coladas em madeira de alta densidade.

Para tal avaliação foram realizados ensaios de arrancamento de barras de aço coladas em corpos de prova de madeira da espécie de alta densidade *Apuleia leiocarpa* (Garapeira).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do sentido das fibras da madeira na resistência ao arrancamento para ligações com barras de aço coladas em madeira.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar experimentalmente a resistência última de arrancamento e os modos de ruptura de barras de aço coladas paralelamente às fibras da madeira.
- Comparar os resultados com os valores obtidos na literatura para barras de aço coladas perpendicularmente às fibras da madeira.
- Comparar as equações empíricas desenvolvidas por autores internacionais verificando as que mais se adequam aos resultados.

3 JUSTIFICATIVA

As ligações com barras de aço coladas em madeira vem sendo utilizadas em diversos países pelo mundo, em sua grande maioria países europeus. Contudo, os requisitos de desempenho e normas de execução diferem de país para país, tornando-se um sério obstáculo à industrialização e ao comércio.

Diversas abordagens, modelos de cálculo e projetos, vem sendo estudados desde a década de 1980. Entretanto, comparando-se esses modelos, contradições e discrepâncias são encontradas, especialmente em relação ao tratamento dos parâmetros de forma isolada (Steiger; Widmann; Gehri, 2006).

No Brasil, a falta de critérios de dimensionamento e métodos de ensaios normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), dificulta a industrialização em larga escala por empresas brasileiras.

Sendo assim, é fundamental avaliar o comportamento dos diversos parâmetros que compõem as ligações com barras de aço coladas em madeira, para que desse modo, a evolução da tecnologia e o conhecimento sobre tal ligação, possa dar respaldo para a elaboração de modelos apropriados e normatizados, disseminando seu uso pela indústria mundial.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os conectores são considerados um dos elementos mais importantes nas estruturas de madeira, de modo que a resposta global de uma estrutura também é função do desempenho de suas ligações. As ligações, em geral, têm um custo elevado na totalidade de uma estrutura e em alguns casos, podem custar até um quarto do valor total da estrutura (Silva, 2009). É necessário, portanto, especificar, dimensionar e garantir que a escolha do tipo de ligação seja correta e compatível com o tipo de solicitação imposta, oferecendo resistência, durabilidade e segurança à estrutura.

Kerkhoff (2010) analisa que as ligações constituem uma porção significativa no trabalho de engenharia, sendo uma área em que a criatividade deve ser aplicada.

Diferentes materiais e técnicas de construção exigem diferentes conexões. Assim, quando novos produtos de madeira surgem na engenharia ou produtos existentes tornam-se mais populares, a exigência e requisitos de conexões também devem evoluir. (Kerkhoff, 2010)

Segundo Silva (2009), as ligações podem ser divididas segundo a tecnologia empregue. Ligações por entalhe, também conhecidas como ligações tradicionais, são as ligações nas quais a conexão é feita somente com o uso da própria madeira, seja ela maciça ou composta por derivados. As ligações mecânicas são aquelas em que se recorrem a elementos externos para a composição da ligação. O domínio das ligas metálicas promoveu o desenvolvimento de conectores que vão desde pregos, parafusos, às chapas de dentes estampados. As ligações também podem ser coladas, nas quais o recurso usado são os compostos químicos, que promovem a aderência na interface madeira-madeira, como na Madeira Laminada Colada (MLC), por exemplo. No caso das barras de aço coladas, a ligação se faz na interface madeira-aço, sendo consideradas ligações híbridas, por envolverem três materiais diferentes (madeira, aço e adesivo).

A utilização de barras de aço coladas é uma técnica muito eficiente para ligações em elementos de madeira, seja na restauração ou na construção de novas estruturas. É considerada uma solução esteticamente interessante, pois elimina todos os componentes da ligação que poderiam ser visíveis na peça de madeira, contudo, Aicher, Gustafsson e Wolf (1999), advertem que o uso de forma segura e

econômica, depende do conhecimento e do domínio de todos os parâmetros que influenciam o comportamento desse tipo de ligação e das diferentes situações de trabalho que estão submetidas.

Segundo Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2010) as ligações compostas por barras coladas podem ser amplamente utilizadas em conexões de elementos estruturais madeira-madeira e madeira-aço, embora, esse tipo de conexão seja comumente usada em elementos de fundações, promovendo a ligação madeira-concreto.

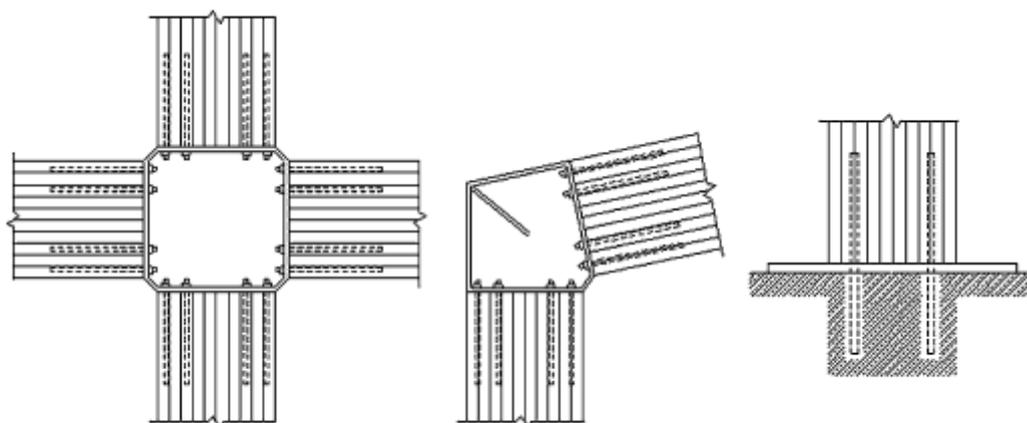


Figura 1 - Exemplos de aplicações para barras de aço coladas
Fonte: Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2010)

A principal vantagem da utilização de barras de aço coladas, é o embutimento das barras no interior da peça de madeira, o que promove uma ótima estética ao elemento, tornando-se uma alternativa para obras com modelos arquitetônicos mais exigentes. Outra vantagem do uso de barras coladas, é que a madeira protege integralmente a conexão contra o fogo e possíveis agentes corrosivos, pelo fato de servir como uma camada protetora, isolando o conector de aço de agentes externos.



Figura 2 - Estrutura espacial em madeira laminada colada com ligação utilizando barras de aço coladas
Fonte: Chans, Cimadevila e Gutiérrez (2011)

Estudos teóricos, e um grande número de experimentos, foram conduzidos nas últimas três décadas, a fim de se investigar o comportamento de ligações com barras de aço coladas em madeira. A maioria dos experimentos foram realizados com barras de aço solicitadas na direção paralela às fibras da madeira, com o objetivo de analisar o comportamento mecânico da ligação (Ling et al., 2014).

A Figura 3 apresenta os avanços em relação aos modelos de cálculo propostos por diferentes pesquisadores nos últimos 25 anos.

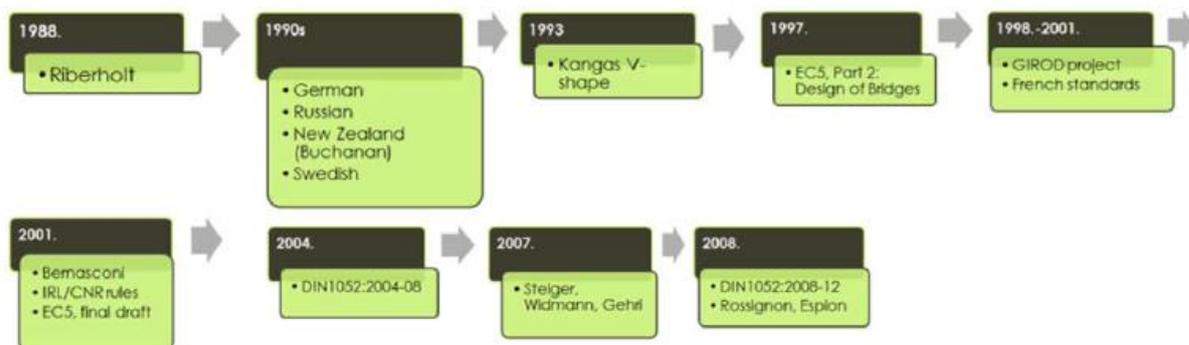


Figura 3 - Modelos de cálculo propostos nos últimos anos
Fonte: Serrano et al. (2013)

Segundo Serrano, Steiger e Lavisci (2008) os parâmetros que influenciam o comportamento das ligações com barras de aço coladas em madeira podem ser agrupados em três grandes grupos: geometria, materiais e condições de carregamento. Dentro de cada grande grupo, existem diversos fatores que podem alterar o comportamento da ligação. A Figura 4 apresenta os fatores considerados.

Dependendo do grau de detalhe na modelação mecânica, diferentes parâmetros influenciam o comportamento da ligação. No entanto, estes parâmetros podem ser influenciados por outros parâmetros, normalmente não incluídos na modelação, tais como as condições de cura do adesivo. Outros parâmetros (duração dos efeitos de carga, os efeitos da umidade e densidade) podem ser incluídos na modelagem, mas normalmente só são explicados por fatores de redução ou de relações empíricas (Serrano, Steiger e Lavisci, 2008).

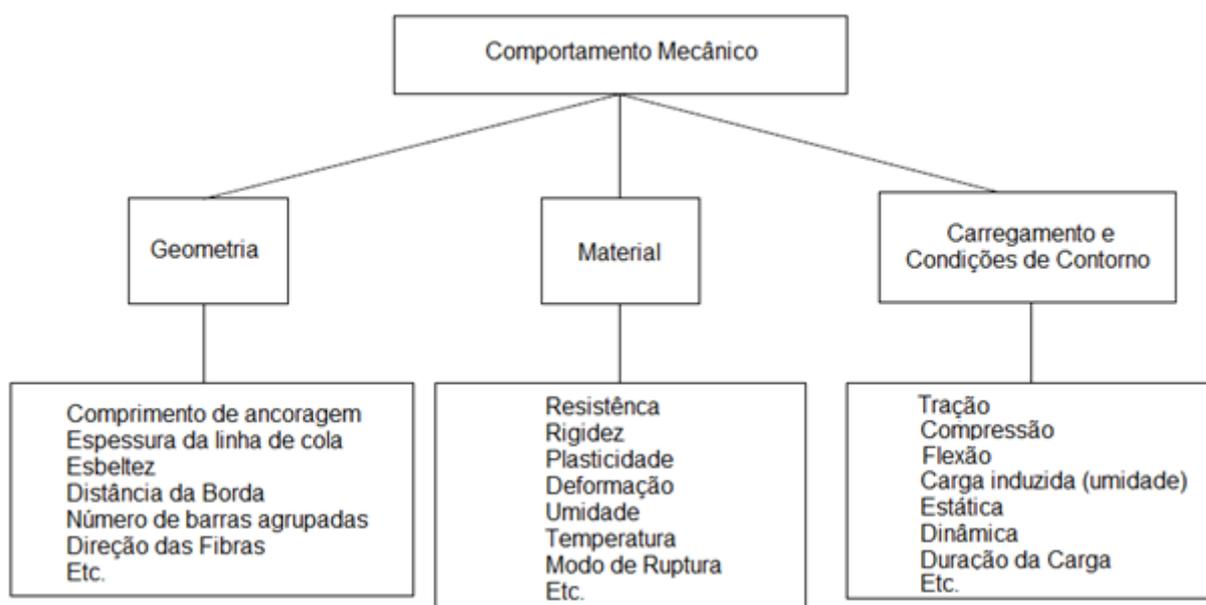


Figura 4 - Parâmetros que influenciam o comportamento mecânico de barras de aço coladas
Fonte: Adaptado de Serrano, Steiger e Lavisci (2008)

Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2010) destacam que a resistência ao arrancamento e o comportamento da aderência de barras coladas foram significativamente influenciados pelos parâmetros: comprimento de ancoragem, diâmetro da barra, distância da borda, direção das fibras, condições de carregamento (método de realização do ensaio), tipo do adesivo, espessura da linha de cola, densidade e umidade.

4.1 COMPRIMENTO DE ANCORAGEM

O comprimento de ancoragem e o diâmetro da barra foram avaliados em diversos estudos como sendo parâmetros dominantes na força última de arrancamento nas ligações com barras de aço coladas em madeira (Steiger; Widmann; Gehri, 2006).

Segundo Chans, Cimadevila e Gutiérrez (2011) o comprimento de ancoragem é sistematicamente utilizado em todos os modelos de cálculo propostos. Na maioria dos modelos, a relação entre o comprimento de ancoragem e a resistência da ligação, é linear, contudo, estudos analíticos sobre a distribuição da tensão de cisalhamento, mostram que na superfície colada, a resistência axial do conjunto é afetada por picos de tensão conforme o comprimento de ancoragem aumenta, mostrando que a relação linear entre a carga e o comprimento de ancoragem não se cumpre.

Goto et al. (2014) com o objetivo de avaliar a influência do comprimento de ancoragem em relação a força última de arrancamento, testou barras de aço (tipo vergalhão) com diâmetro nominal único de 6,3 mm. As barras foram coladas em amostras de madeira serrada da espécie *Apuleia Leiocarpa* (Garapeira) no sentido perpendicular as fibras, utilizando resina estrutural do tipo Epóxi (Sikadur 32). Foram feitos nos corpos de prova, 5 furos com comprimentos de ancoragem 4,0 cm, 7,0 cm, 10,0 cm, 13,0 cm e 16,0 cm (Figura 5).



Figura 5 - Colagem das barras de aço nos corpos de prova
Fonte: Goto et al. (2014)

Os resultados foram expressos em relação à esbeltez de ancoragem, parâmetro expresso pela proporcionalidade entre o comprimento de ancoragem e o diâmetro da barra de aço, dado pela equação (1).

$$\lambda = \frac{l_a}{d} \quad (1)$$

onde: l_a é o comprimento de ancoragem;

d é o diâmetro da barra de aço;

λ é a esbeltez da ancoragem.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos por Goto et al. (2014). Os resultados apresentados apontam ganhos de resistência na ligação conforme aumentou-se o comprimento de ancoragem. Após o comprimento de ancoragem atingir o valor de 13 vezes o diâmetro da barra, a força última de arrancamento mostrou-se constante, apresentando uma aparente linearidade na ligação, proposta por diversos autores em seus modelos de cálculo.

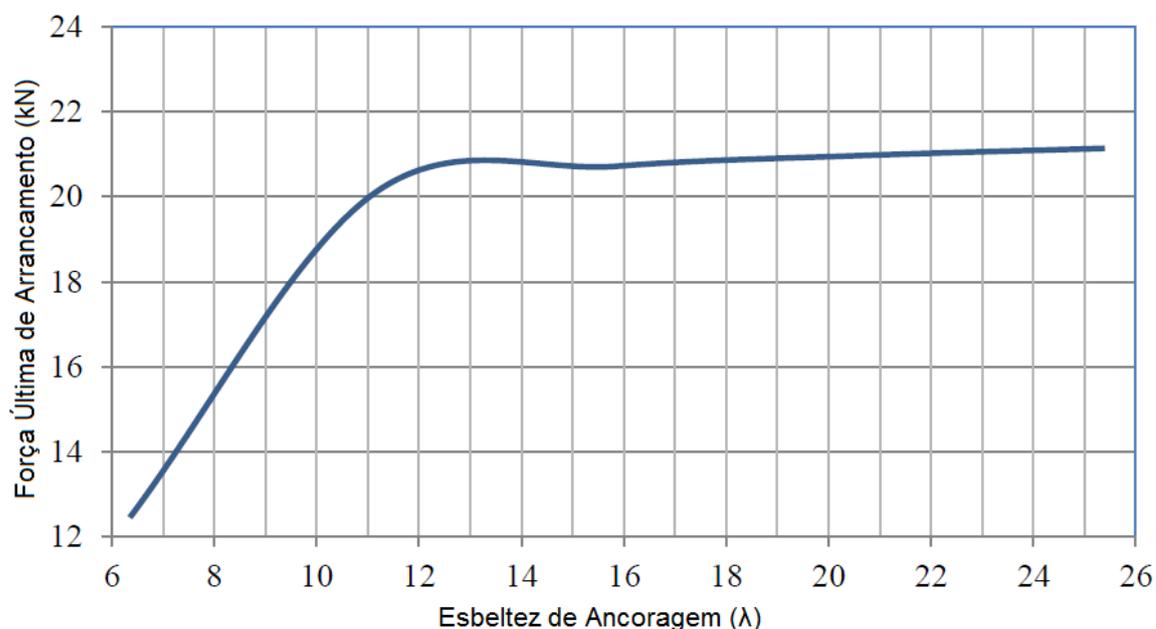


Figura 6 - Força Última Arrancamento (kN) x Esbeltez de Ancoragem (λ)
Fonte: Goto et al. (2014)

4.2 RESINA ESTRUTURAL

As resinas estruturais são responsáveis por transferir o carregamento da barra para o elemento de madeira através da coesão química na interface aço-madeira. Diferentes tipos de resinas são utilizadas para conectar barras de aço em madeira. Entre os tipos mais utilizados estão fenol-resorcinol formaldeídos (PRF), poliuretanas (PUR) e as epóxi (EP) (Rossignon; Espion, 2008).

Com o objetivo de verificar o desempenho ao cisalhamento das barras de aço coladas em madeira, Gustafsson e Serrano (2000), realizaram ensaios em amostras de madeira laminada colada C35 e C24, com diferentes densidades. As barras foram coladas no centro da seção na direção paralela às fibras. Após a cura da resina, realizaram-se ensaios de arrancamento da barra de aço colada para PUR, PRF e EP.

Os resultados obtidos por Gustafsson e Serrano (2000) mostram que a EP foi a resina mais eficiente (Figura 7).

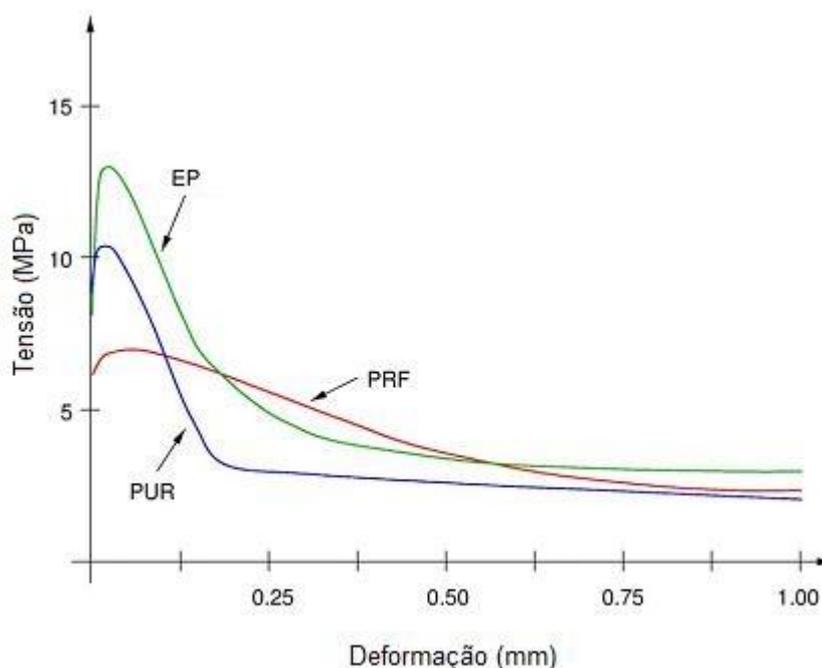


Figura 7 - Influência do tipo da resina estrutural
Fonte: Adaptado de Gustafsson e Serrano (2000)

De acordo com O'Neill et al. (2014) numa série de estudos, foi determinado que resinas do tipo epóxi (EP), possuem maior resistência que as resinas fenol-

resorcinol formaldeídos (PRF) e poliuretanas (PUR), sendo mais adequadas para aplicações de barras de aço coladas em madeira.

Entretanto, Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2010) ressaltam que apesar dos adesivos terem comportamentos diferentes, e a resina epóxi ser a mais utilizada, a escolha do adesivo depende do método utilizado para produzir a ligação. Os principais parâmetros de adesão são: as partes aderentes, o diâmetro do furo (espessura da linha de cola) e as propriedades do adesivo (viscosidade por exemplo).

4.3 DIÂMETRO DA BARRA DE AÇO

Segundo Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2010), a influência do diâmetro da barra de aço é um parâmetro difícil de ser definido devido às diferentes abordagens propostas pelos pesquisadores, entretanto, diversos estudos mostram que há uma relação de dependência entre a força de arrancamento e o diâmetro da barra de aço.

Com o objetivo de avaliar a influência do diâmetro da barra na resistência ao arrancamento em ligações com barras de aço coladas em madeira, Chans, Cimadevila e Gutiérrez (2011) compararam barras de aço roscadas com diâmetros de 10mm e 12mm coladas em madeira de alta densidade. Foram confeccionados setenta corpos de prova, variando-se apenas o comprimento de ancoragem. A Figura 8 mostra os resultados obtidos.

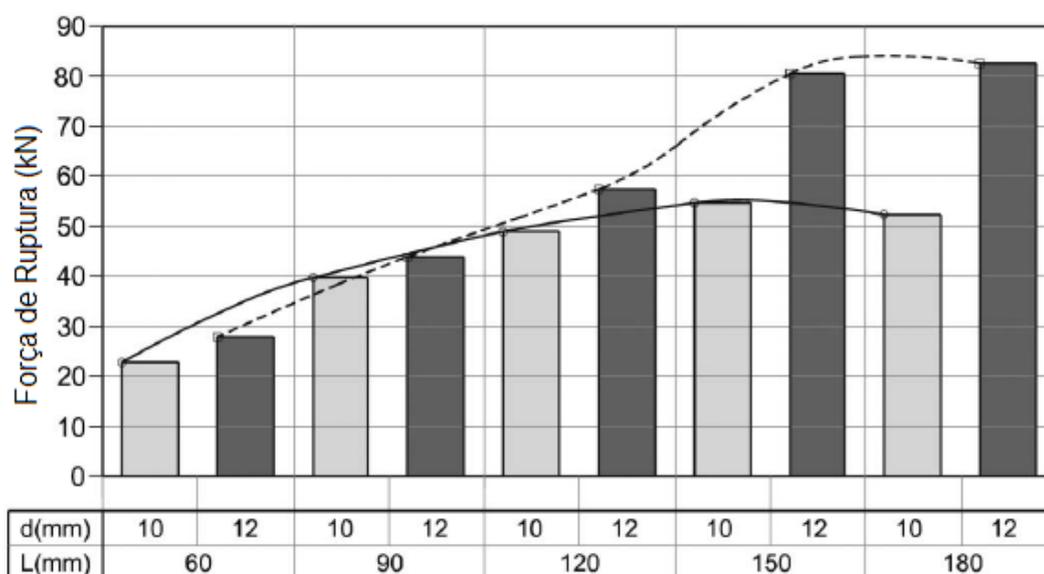


Figura 8 - Força de ruptura para diferentes diâmetros e comprimentos de ancoragem
Fonte: Adaptado de Chans, Cimadevila e Gutiérrez (2011)

Os resultados apontam que para as barras coladas a um mesmo comprimento de ancoragem, em todos os casos, obteve-se maiores valores de carga de ruptura com o aumento do diâmetro da barra. O ganho de resistência da ordem de 17%, é devido ao aumento da área de contato com a resina, provocado pelo aumento no diâmetro do furo.

4.4 DISTÂNCIA DO FURO A BORDA

Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2010) apontam que um possível modo de ruptura de ligações com barras de aço coladas em madeira está relacionado com a distância da barra a borda do elemento de madeira.

Buchanan e Moss (1999) recomendam que a distância mínima entre o centro da barra e a borda da peça de madeira não deve ser menor que 1,5 vezes o diâmetro da barra de aço. A Tabela 1 apresenta valores para distância mínima do furo a borda propostos por diferentes modelos de cálculo.

Tabela 1 - Valores mínimos da distância entre o furo e a borda do elemento

Barras coladas paralelamente às fibras	prEN 1995:2001	DIN 1052:2004-2008	STEP1	French Professional Guide
Distância entre barras	4 d	5 d	2 d	3 d
Distância entre as barras	2,5 d	2,5 d	1,5 d	2,5 d

d = diâmetro da barra

Fonte: Adaptado de Steiger, Widmann e Gehri (2006)

Estudos realizados por Steiger, Widmann e Gehri (2006) apontam que ligações com distâncias inferiores a 2,3 vezes o diâmetro da barra, tiveram uma diminuição significativa na resistência ao arrancamento (Figura 9). Tais valores devem ser evitados, pois podem ocasionar uma ruptura prematura na madeira, resultando em baixos valores de resistência ao arrancamento.

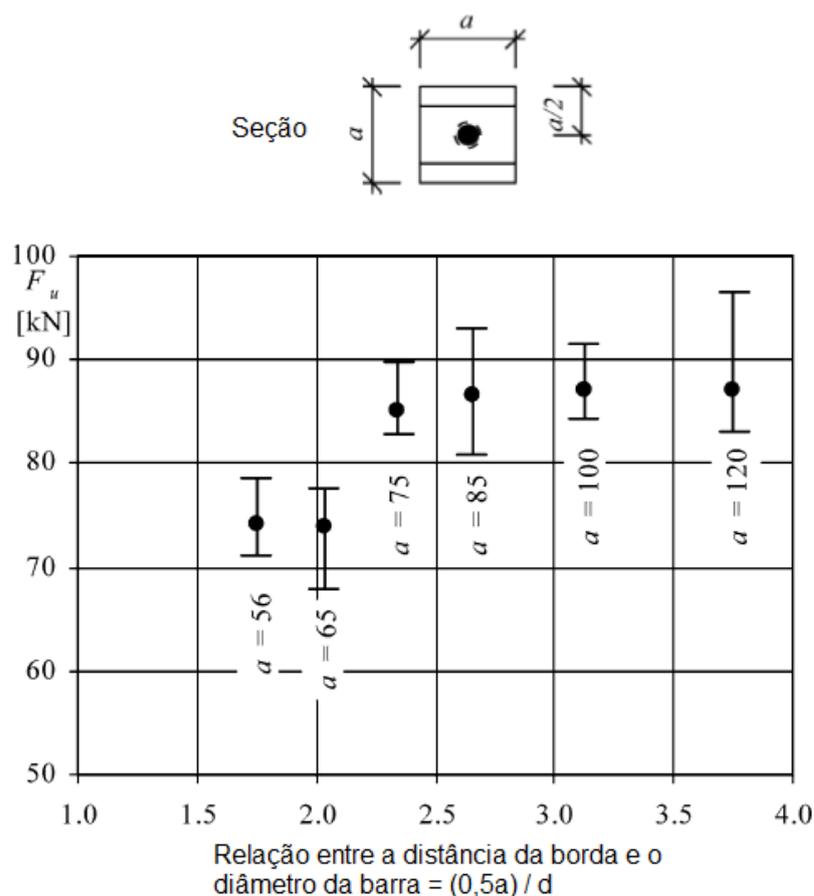


Figura 9 - Influência da distância entre o furo e a borda do elemento
 Fonte: Adaptado de Steiger, Widmann e Gehri (2006)

4.5 ESPESSURA DA LINHA DE COLA

Estudos experimentais e estatísticos de Pigozzo (2004) apontam um ganho de resistência na ligação conforme o aumento da espessura da linha de cola. Os ensaios foram realizados utilizando as resinas Sikadur 32, Compound Injeção e Poliuretano, variando-se também o teor de umidade da madeira. A Figura 10 mostra os resultados obtidos.

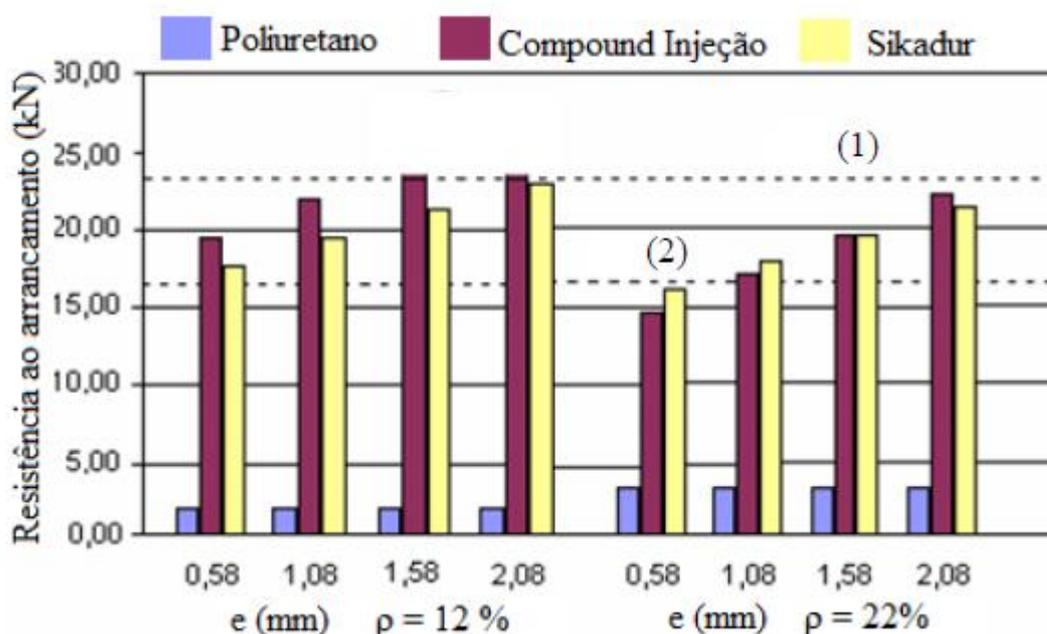


Figura 10 - Resistência ao arrancamento comparando-se três resinas estruturais
Fonte: Adaptado de Pigozzo (2004)

De acordo com Ling et al. (2014), a espessura da linha de cola é um parâmetro importante no desempenho e projeto de ligações com barras de aço coladas em madeira. Tal parâmetro permite otimizar a transferência de tensões da barra de aço para o elemento de madeira. Estudos experimentais realizados por Ling et al. (2014) apontam uma relação aproximadamente linear entre a resistência ao arrancamento e a espessura da linha de cola, tal relação é apresentada na Figura 11.

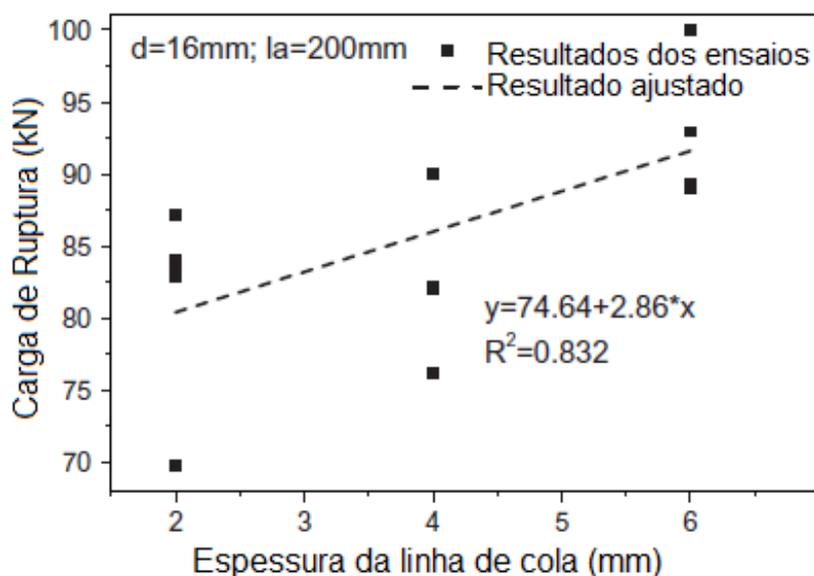


Figura 11 - Carga de Ruptura (kN) x Espessura da linha de cola (mm)
 Fonte: Adaptado de Ling et al. (2014)

4.6 UMIDADE DA MADEIRA

Com o propósito de verificar a influência da variação do teor de umidade da madeira em ligações com barras coladas, Broughton e Hutchinson (2000) avaliaram a resistência ao arrancamento de barras de aço tipo vergalhão e barras reforçadas com fibra de vidro (FRP) coladas em duas espécies diferentes de madeira, *Welsh Ash* e *Oak Timber*, limitadas às umidades de 10%, 22% e 38%.

Para a colagem das barras, foram utilizadas resinas do tipo epóxi, Rotafix Timberset e Sikadur 31PBA. O diâmetro das barras, a espessura da linha de cola e o comprimento de ancoragem, foram mantidos constantes durante todo o experimento (Figura 12).

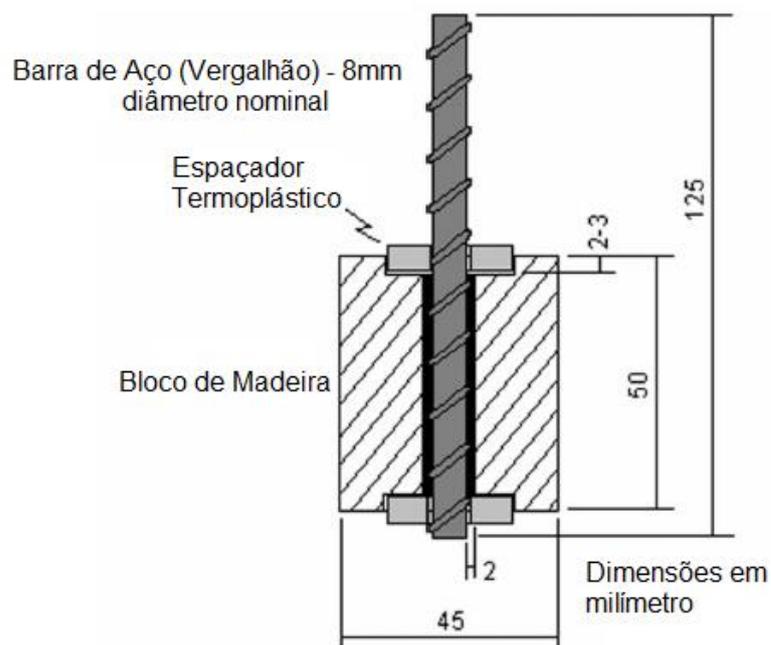


Figura 12 - Geometria dos corpos de prova
Fonte: Adaptado de Broughton e Hutchinson (2000)

Os resultados apontaram que a maior parte dos corpos de prova tanto de *Welsh Ash* como *Oak Timber*, independentemente do tipo de resina ou tipo de barra utilizada, tiveram reduções nas resistências ao arrancamento, quando submetidos ao teor de umidade acima de 22% no momento da colagem. Reduções significativas da ordem de 60 a 65% na resistência ao arrancamento foram observadas para todas as amostras com teor de umidade acima de 30%. A Figura 13 mostra os resultados obtidos por Broughton e Hutchinson (2000).

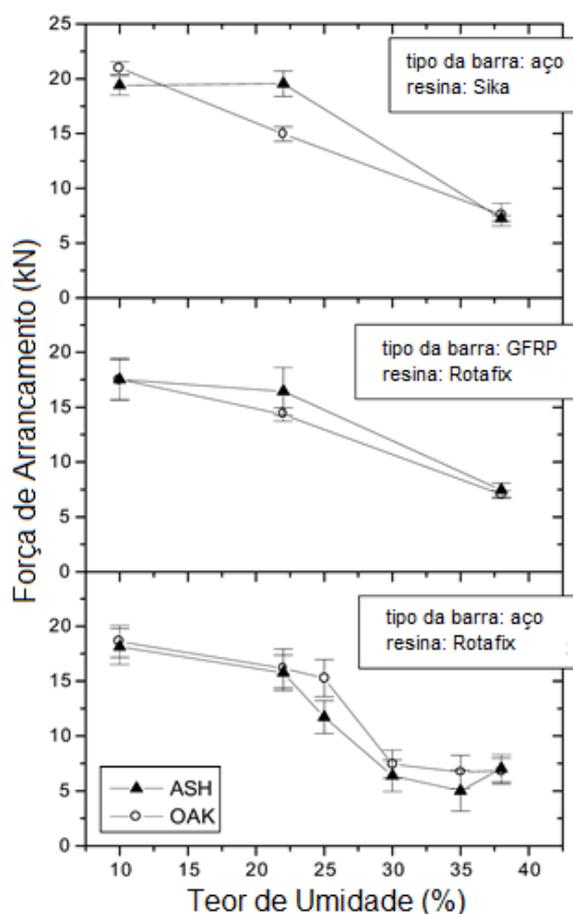


Figura 13 - Força de arrancamento (kN) x Teor de umidade (%)
 Fonte: Adaptado de Broughton e Hutchinson (2000)

4.7 DENSIDADE DA MADEIRA

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

Entretanto, Steiger, Widmann e Gehri (2006) realizaram ensaios com diferentes séries de corpos de prova de madeira laminada colada (*Norway Spruce*) M12, M16 e M20. A diferenciação na densidade dos corpos de prova foi dada pela quantidade e espessura das lâminas da madeira utilizadas para confeccionar os corpos de prova. As propriedades geométricas das séries de corpos de prova são apresentadas na Figura 14.

Series	$d-d_h$ [mm]	a [mm]	ℓ_v [mm]	ℓ [mm]	$\lambda = \ell/d_h$	ℓ_{tot} [mm]
M12	12-14	55	60	105	7.5	580
				140	10	650
				175	12.5	720
				210	15	780
M16	16-18	75	80	140	7.78	700
				175	9.72	780
				220	12.2	880
				270	15	970
M20	20-22	95	100	175	7.96	980
				220	10.0	1070
				275	12.5	1180
				330	15	1240

Figura 14 - Propriedades geométricas das séries M12, M16 e M20
Fonte: Adaptado de Steiger, Widmann e Gehri (2006)

O valor médio da resistência ao arrancamento de barras coladas em madeiras com alta densidade, foi significativamente mais elevado do que as amostras com barras coladas em madeira de baixa densidade conforme apresentado na Figura 15.

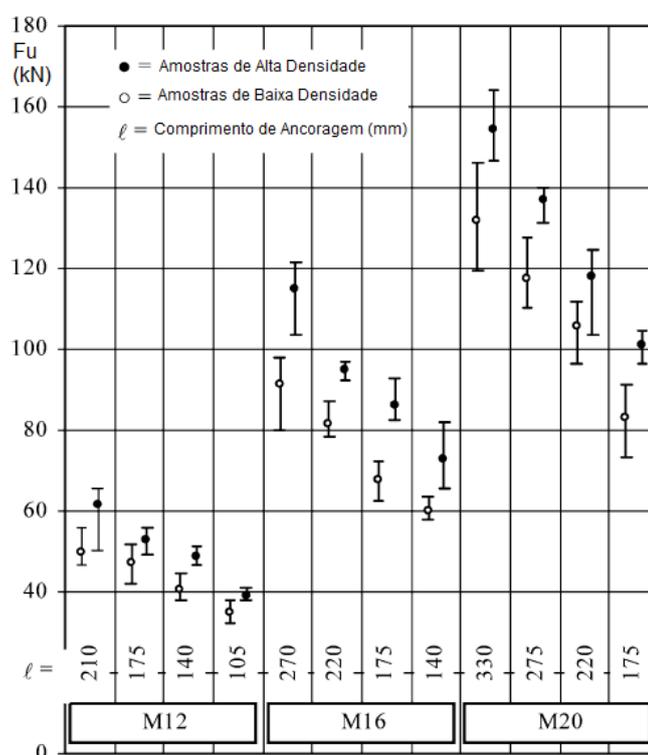


Figura 15 - Valores de Força de Ruptura para amostras com madeira de alta e baixa densidade
Fonte: Adaptado de Steiger, Widmann e Gehri (2006)

De acordo com Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2010), as opiniões diferem a respeito da influência da densidade na resistência ao arrancamento de barras

coladas. Do ponto de vista teórico a influência da densidade da madeira na resistência ao arrancamento é, na maioria das vezes, considerada como um fator secundário por diversos autores, contudo, a relação entre a densidade e a resistência ao arrancamento existe, embora seja difícil de ser definida.

4.8 MODELOS EMPÍRICOS DE CÁLCULO

Diversos programas de pesquisa realizados nos últimos anos, principalmente na Europa, têm contribuído para que padrões de abordagem sejam conduzidos afim de se conhecer todos os parâmetros que influenciam o comportamento das ligações com barras de aço coladas em madeira. Esses padrões permitem o uso de forma mais confiável desse tipo de conexão (Rossignon; Espion, 2008).

Segundo Serrano et al. (2013) as principais equações empíricas para o cálculo da força de arrancamento de uma única barra de aço colada em madeira conhecidas nos últimos anos são:

Riberholt, 1988:

$$R_{ax,k} = f_{w1} \cdot \rho_c \cdot d \cdot l_g \quad (2)$$

Buchanan e Townsend, 1990:

$$R_{ax,k} = 9,2 \cdot d \cdot l_g \cdot (r_d)^2 \cdot (r_e)^{0,5} \quad (3)$$

Buchanan & Deng para EPX, 1990:

$$Q_k = 8,16 \cdot k_b \cdot k_e \cdot k_m \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0,86} \cdot \left(\frac{d}{20}\right)^{1,62} \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{e}{d}\right)^{0,5} \quad (4)$$

Swedish guidelines, 1992:

$$F_{t,k} = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_{v3} \quad (5)$$

Russian Standards, década de 1990:

$$T = R_{sh} \cdot \pi \cdot (d + 0,005) \cdot l \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (6)$$

Eurocode 5, 1997:

$$R_{ax,k} = \pi \cdot d_{equ} \cdot l_a \cdot f_{v,k} \quad (7)$$

French rules (de acordo com Riberholt), 1999:

$$P_{f,k} = 85f_{v,k} \cdot d \cdot (l_c)^{0,5} \quad (8)$$

French rules (para EPX Mastafix), 1999:

$$P_{f,k} = 104f_{v,k} \cdot d \cdot (l_c)^{0,45} \quad (9)$$

Eurocode 5, 2001:

$$R_{ax,k} = \pi \cdot d_{equ} \cdot l_a \cdot f_{v,\alpha,k} \quad (10)$$

Feligioni, 2002:

$$R_{ax,k} = \pi \cdot l_g \cdot (f_{v,k} \cdot d_{equ} + k \cdot (d + e) \cdot e) \quad (11)$$

Eurocode 5, 2003:

$$R_{ax,k} = \pi \cdot d_{equ} \cdot l_a \cdot f_{ax,k} \cdot (\tan\omega/\omega) \quad (12)$$

GIROD, 2003:

$$P_f = \tau_f \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot (\tan\omega/\omega) \quad (13)$$

Steiger, Widmann, Gehri, 2007:

$$F_{ax,mean} = f_{v,0,mean} \cdot \pi \cdot d_h \cdot l \quad (14)$$

New Zealand Design Guide, 2007:

$$Q_k = 6,73 \cdot k_b \cdot k_e \cdot k_m \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0,86} \cdot \left(\frac{d}{20}\right)^{1,62} \cdot \left(\frac{e}{d}\right)^{0,5} \quad (15)$$

Rosignon, Espion, 2008:

$$F_{ax,mean} = \pi \cdot d_h \cdot l_a \cdot f_{v,0,mean} \quad (16)$$

DIN, 2010, CNR DT 206/2007:

$$R_{ax,d} = \pi \cdot d \cdot l_{ad} \cdot f_{k1,d} \quad (17)$$

Yeboah, 2013:

$$P_{u,mean,k} = \pi \cdot d_h \cdot l_a \cdot f_{v,mean} \quad (18)$$

Onde:

$R_{ax,k}/Q_k/ F_{t,k}/ T/ P_{f,k}/ P_f$ = Força de arrancamento característica [N], [kN]

$F_{ax,mean}/ P_{u,mean,k}$ = Força de arrancamento média [N], [kN];

$l/l_g/l_{ad}/l_a/l_b/l_c$ = comprimento de colagem, comprimento de ancoragem [mm];

d = diâmetro nominal da barra [mm];

d_h/h = diâmetro do furo [mm];

d_{equ} = diâmetro equivalente [mm];

e = distância da borda [mm];

$k_b/k_m/k_e/k_1/k_2$ = fator do tipo de barra / fator para a umidade da madeira / fator para o tipo de resina epóxi / coeficiente devido a distribuição irregular de tensões / fator de redução devido a distribuição irregular das forças entre várias barras;

ω = relação de rigidez da ligação;

τ_f = força de cisalhamento na interface de colagem [N/mm²];

$f_{v3}/f_{v,k}/R_{sh}/f_{ax,k}/f_{k1,k}$ = parâmetro de resistência / resistência ao cisalhamento característica da madeira / resistência ao cisalhamento de cálculo da madeira perpendicular às fibras / resistência ao cisalhamento característica da madeira no ângulo entre a barra e fibra / valor característico da resistência da linha de cola [N/mm²];

$f_{v,0,mean}/f_{v,mean}$ = resistência nominal de uma única barra carregada axialmente e colada na direção paralela às fibras [N/mm²].

De acordo com Serrano et al. (2013) pode se concluir que a força de arrancamento de barras de aço coladas em madeira depende principalmente camada na interface madeira/resina e o parâmetro de resistência ao cisalhamento que é influenciado por processos mecânicos e propriedades geométricas dos três materiais (aço, madeira e resina), sendo que, em um modelo de cálculo geral e simplificado a força de arrancamento característica pode ser resumida como:

$$R_{ax,d} = \pi \cdot d \cdot l \cdot f_{v,k} \quad (19)$$

Onde:

$R_{ax,d}$ = força de arrancamento característica;

d = diâmetro;

l = comprimento de ancoragem;

$f_{v,k}$ = Resistência ao cisalhamento da madeira.

4.9 MODOS DE RUPTURA

Segundo Goto et al. (2014), os modos de ruptura observados em barras de aço coladas em madeira de alta densidade da espécie *Apuleia Leiocarpa* (Garapeira) foram de ruptura na adesão do aço, ruptura mista da adesão na madeira e no aço, ruptura da adesão na madeira e ruptura do aço. Não foram observadas rupturas na madeira (Figura 16).



Figura 16 - Modos de ruptura observados por Goto et al. (2014)

Fonte: Goto et al. (2014)

Gardelle e Morlier (2006), apontam quatro modos de ruptura diferentes dos observados por Goto et al. (2014), contudo, para que esses modos de ruptura ocorram, a barra, a resina e a interface barra/resina devem ter resistência superior a resistência da madeira (Figura 17). O modo mais significativo é a ruptura por cisalhamento na interface entre a resina e a madeira, esse modo é caracterizado pela aparência visível de fibras da madeira aderidas na superfície do adesivo. O segundo modo ocorre pela ruptura à tração na madeira imediatamente atrás da extremidade da barra colada, este modo ocorre predominantemente em barras coladas perpendicularmente às fibras da madeira. O terceiro modo ocorre pela ruptura de um bloco de madeira ocasionado pela colagem de múltiplas barras. O último modo é comumente observado em análises experimentais e pode ocorrer pela aplicação de uma força de arrancamento oblíqua.

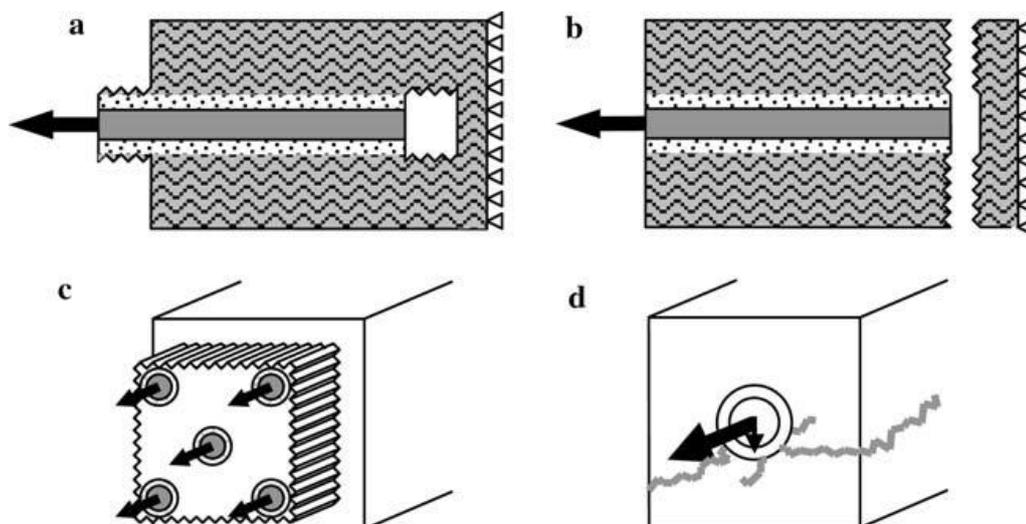


Figura 17 - a) ruptura na interface madeira/resina, b) ruptura à tração na madeira, c) ruptura do bloco de madeira por múltiplas barras, d) ruptura por aplicação de força de arrancamento oblíqua.

Fonte: Gardelle e Morlier (2006)

4.10 MÉTODOS DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

De acordo com Serrano, Steiger e Lavisci (2008) o tipo do carregamento e o método de realização do ensaio podem ter influência significativa na resistência das ligações com barras de aço coladas em madeira. Dentre os fatores relacionados ao tipo de carregamento, pode-se destacar, a direção do carregamento em relação a barra de aço, a duração dos carregamentos estáticos, além do número de ciclos de carga, frequência e amplitude para os carregamentos dinâmicos.

Os métodos de realização dos ensaios podem ser de várias maneiras (Figura 18). O método de duplo arrancamento (*pull-pull*), em geral, é utilizado para barras coladas no sentido paralelo às fibras da madeira. Para as barras coladas perpendicularmente às fibras, três diferentes ensaios podem ser realizados. O método de arrancamento na viga (*pull-beam*) é o mais próximo da situação prática, todavia, exige uma grande quantidade de madeira para ser realizado, inviabilizando em muitos casos a realização do experimento. O método de arrancamento – compressão (*pull-compression*) é o que menos se aproxima da situação prática pois a resistência ao arrancamento pode ser influenciada por tensões excessivas de compressão perpendiculares às fibras da madeira na área onde são realizadas as transferências de esforços. O método de arrancamento – “estaca” (*pull-pile*

foundation) é o mais recomendado, de modo que, os esforços são distribuídos com maior eficiência, não havendo interferência na região da ligação (Tlustochowicz; Serrano; Steiger, 2010).

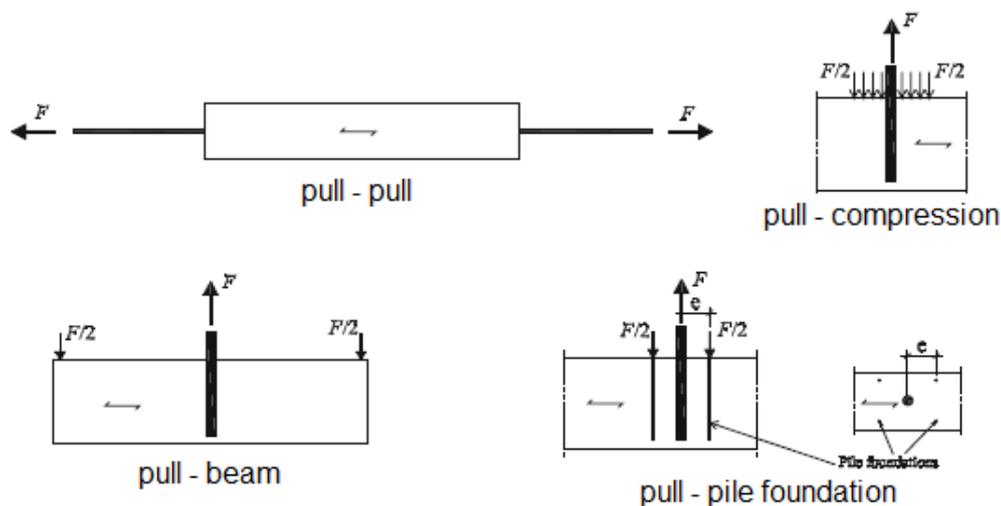


Figura 18 - Métodos para realização dos ensaios de arrancamento das barras
Fonte: Adaptado de Serrano, Steiger e Lavisci (2008)

4.11 DIREÇÃO DAS FIBRAS DA MADEIRA

As ligações entre diferentes partes de uma estrutura resultam na frequente coexistência das barras aço coladas tanto paralelamente quanto perpendicularmente às fibras da madeira, como é o caso das ligações entre viga-pilar (Figura 19). A anisotropia da madeira exige a avaliação do impacto da direção das fibras da madeira na colagem das barras, bem como sua resistência.

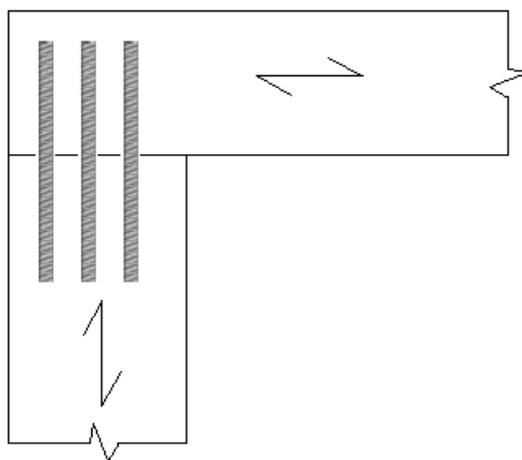


Figura 19 - Exemplo de ligação onde a barra de aço atua no sentido paralelo e perpendicular às fibras da madeira

De acordo com Steiger, Widmann e Gehri (2006), comparando-se barras de aço com mesmo diâmetro e comprimento de ancoragem coladas paralelamente e perpendicularmente às fibras da madeira, as barras coladas perpendicularmente às fibras apresentam força de arrancamento de 20 a 50% maior que aquelas coladas na direção paralela às fibras.

Tlustochowicz, Serrano e Steiger (2010) apontam que as conclusões obtidas por diversos autores nos últimos anos divergem, de forma que, a falta de consistência nos resultados, aponta a necessidade de se realizar maiores estudos acerca do comportamento desse parâmetro.

4.12 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O comprimento de ancoragem é tratado como um parâmetro dominante na resistência ao arrancamento de barras de aço coladas em madeira, sendo sistematicamente utilizado em todos os modelos de cálculo propostos. Estudos apontam que acréscimos na resistência da ligação são obtidos com comprimentos de ancoragem até vinte vezes o diâmetro da barra, após esse tamanho, não são detectados acréscimos significativos na resistência.

A resina estrutural mais indicada para ancoragem de barras de aço em madeira é a do tipo Epóxi. Pesquisadores indicam que a resina do tipo Epóxi foi a

que se mostrou mais eficiente se comparada com as outras resinas estruturais comumente utilizadas nas ligações com barras de aço coladas em madeira.

O aumento do diâmetro da barra de aço também é um parâmetro responsável por aumentar a resistência da ligação. O acréscimo na resistência é devido ao aumento da área de contato da barra com a resina estrutural.

A distância mínima recomendada do furo a borda é de 2,5 vezes o diâmetro da barra, para barras coladas paralelamente às fibras, não sendo admitido distâncias inferiores a 1,5 vezes o diâmetro da barra.

A espessura da linha de cola também é um parâmetro dominante nas ligações com barras de aço coladas em madeira. O aumento na espessura da linha de cola é responsável por um aumento significativo na resistência da ligação.

Barras de aço coladas em madeira com umidade superior a 22%, apresentam perdas significativas na resistência da ligação. A diminuição da resistência é devido a perda de adesão da resina na madeira.

Apesar de alguns estudos apontarem a não relação da densidade da madeira com o desempenho da ligação ou a dificuldade de se definir essa relação, outros estudos apontam que a resistência ao arrancamento de barras coladas em madeiras de alta densidade é superior se comparada a madeiras de baixa densidade.

O método de realização dos ensaios é um parâmetro importante para se definir o desempenho da ligação. Os métodos mais utilizados são os de duplo arrancamento (pull-pull), arrancamento na viga (pull-beam), arrancamento-compressão (pull-compression) e arrancamento-“estaca” (pull- pile foundation).

Embora existam divergências entre os resultados obtidos pelos pesquisadores, estudos apontam que, em geral, barras de aço coladas perpendicularmente às fibras apresentam resistência ao arrancamento superior àquelas coladas no sentido paralelo às fibras.

5 METODOLOGIA

A análise experimental foi realizada com o objetivo de avaliar a resistência última de arrancamento para barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira, para que, posteriormente, os valores encontrados fossem confrontados com valores obtidos em recente pesquisa realizada por Goto et al. (2014), onde tais valores são relativos à resistência última de arrancamento de barras de aço no sentido perpendicular às fibras da madeira.

A variação no comprimento de ancoragem das barras de aço nos corpos de prova foi feita para que todos os parâmetros se tornassem idênticos aos da pesquisa realizada por Goto et al. (2014), de modo que, a única variação entre os dois experimentos foi o sentido de ancoragem das barras de aço em relação às fibras da madeira.

Assim sendo, foi possível analisar a influência do sentido das fibras da madeira de forma isolada, garantindo-se que nenhum outro parâmetro influenciou as respostas do experimento.

5.1 MATERIAIS

Os corpos de prova foram fabricados com madeira de alta densidade da espécie *Apuleia Leiocarpa* (Garapeira).

A barra de aço utilizada foi do tipo vergalhão (CA-50) com diâmetro nominal único de 6,4 mm.

A resina estrutural utilizada para colagem das barras de aço foi do tipo epóxi Sikadur 32 fluído (Sika S.A.), que de acordo com o fabricante apresenta cura final em sete dias.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 Preparação dos corpos de prova

Para realização dos ensaios de arrancamento foram confeccionados quinze corpos de prova (Figura 20) a partir de uma única viga de madeira da espécie

Apuleia Leiocarpa (Grapeira). Os corpos de prova foram feitos com seção transversal de 7,5 cm x 20,0 cm e 19,0 cm de comprimento. Posteriormente, foram feitos cinco furos em furadeira de bancada com brocas de aço rápido com diâmetro único de 9,5 mm, afim de se manter constante a espessura da linha de cola e comprimentos de ancoragem diferentes 4,0 cm, 7,0 cm, 10,0 cm, 13,0 cm e 16,0 cm, sendo os mesmos comprimentos de ancoragem realizados por Goto et al. (2014).

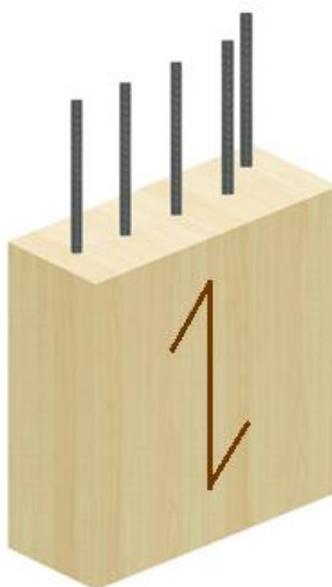


Figura 20 – Modelo dos corpos de prova

A Tabela 2 apresenta as características dos corpos de prova, onde \emptyset é o diâmetro da barra, D é o diâmetro do furo e os indicadores 1, 2, 3, 4 e 5 são os comprimentos de ancoragem.

Tabela 2 - Características dos corpos de prova

\emptyset	D	1	2	3	4	5
6,4 mm	9,5 mm	4,0 cm	7,0 cm	10,0 cm	13,0 cm	16,0 cm

Após a furação, foi realizado o procedimento de colagem das barras de aço no sentido paralelo às fibras.

Primeiramente foi realizada uma limpeza nos furos com o uso de jatos de ar comprimido, garantindo a remoção dos fragmentos de madeira oriundos do processo de furação. Logo após a limpeza, a resina estrutural foi aplicada nos furos com o

auxílio de sacos plásticos, semelhante a uma bisnaga, para que todo o furo seja preenchido com a resina. Após a aplicação da resina, as barras de aço foram introduzidas fazendo-se movimentos no sentido horário e anti-horário e vice-versa a fim de eliminar eventuais bolhas de ar na resina.

Os corpos de prova, já com as barras de aço coladas, ficaram em repouso durante sete dias até atingirem a máxima resistência indicada pelo fabricante da resina (Figura 21).



Figura 21 – Confecção dos corpos de prova

5.2.2 Ensaio de arrancamento das barras

Os ensaios de arrancamento foram realizados na máquina universal de ensaios DL 30000 – EMIC, cujo processo foi feito com a aplicação de uma força axial de tração nas barras de aço dos corpos de prova. O aparelho registrou a força máxima de arrancamento para cada ensaio retornando um gráfico de força por tempo em segundos. A Figura 22 mostra o método de realização do ensaio de arrancamento, também conhecido como ensaio com solicitação de um único lado (pull-compression).

Através dos resultados obtidos, elaborou-se um gráfico de Força de arrancamento (kN) x Esbeltez de ancoragem no sentido paralelo as fibras da madeira, a fim de se verificar, se há uma variação significativa na resistência ao arrancamento de barras de aço coladas em madeira da espécie Garapeira,

comparando-se os resultados obtidos com os resultados encontrados por Goto et. al (2014) para o sentido perpendicular as fibras da madeira, segundo os mesmos parâmetros de análise.



Figura 22 - Ensaio de arrancamento das barras de aço coladas em madeira

5.2.3 Determinação do teor de umidade e densidade aparente

Seguindo as recomendações da ABNT NBR 7190 (1997), foram extraídos aleatoriamente dos corpos de prova, doze amostras com seção transversal de 3,0 cm x 2,0 cm e 5,0 cm de comprimento ao longo das fibras.

O teor de umidade em porcentagem (U) foi calculado pela equação (20)

$$U = \frac{m_i - m_s}{m_s} \quad (20)$$

Onde:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

m_s é a massa seca da madeira, em gramas.

A massa inicial da madeira foi obtida pesando-se as amostras em balança de precisão. A massa seca da madeira foi obtida colocando as amostras em estufa com temperatura aproximada de 100 °C até que atingissem variações menores que 0,05% da última pesagem.

A densidade aparente em g/cm³ foi calculada pela equação (21)

$$\rho_{ap} = \frac{m_i}{A \cdot B \cdot C} \quad (21)$$

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 do corpo de prova em relação às fibras da madeira, em centímetros;

Após o cálculo da densidade aparente, o diagrama de Kollman foi utilizado para determinar a densidade aparente corrigida a 12%.

5.2.4 Determinação da resistência à compressão paralela às fibras

A determinação da resistência à compressão paralela às fibras para caracterização da madeira foi realizada conforme as recomendações da ABNT NBR 7190 (1997). Foram extraídas 13 amostras com seção transversal de 5,0 cm x 5,0 cm por 15 cm de comprimento. As amostras foram extraídas aleatoriamente dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

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

Após a obtenção dos resultados do ensaio de resistência à compressão das amostras, o valor característico foi obtido pela equação (22) considerando a curva normal de probabilidade.

$$f_k = f_m \cdot \left(1 - 1,645 \cdot \frac{CV}{100}\right) \quad (22)$$

Onde:

f_k é o valor característico;

f_m é o valor médio;

CV é o coeficiente de variação em %.

Sendo que,

$$CV = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_m)^2}{(n-1)}}}{x_m} \cdot 100 \quad (23)$$

Onde:

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

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

n é o número de amostras.

5.2.5 Caracterização do aço

As propriedades do aço foram obtidas por meio de ensaios de tração conforme as recomendações da ABNT NBR ISO 6892 (2013). O método consiste na aplicação de uma carga axial crescente e contínua até que ocorra ruptura do corpo de prova.

Foram realizados seis ensaios de tração (Figura 23), de modo que os valores obtidos, são comparados com os valores obtidos nos ensaios de arrancamento das barras de aço coladas em madeira.



Figura 23 - Ensaio de caracterização do aço

6 RESULTADOS E ANÁLISES

6.1 PROPRIEDADES DA MADEIRA

Os resultados dos ensaios para determinação do teor de umidade, densidade aparente e densidade aparente corrigida a 12% são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado dos ensaios para determinação do teor de umidade e densidade aparente

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

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras da madeira são mostrados na Tabela 4. O corpo de prova 3 (CP-3) foi desconsiderado pois houve erro na execução do ensaio, sendo assim, o total de corpos de prova ensaiados foram doze.

Tabela 4 - Resultado dos ensaios de resistência à 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
Média (MPa)	72,97
Variância	12,35
Desvio Padrão	3,51
Coef. De Variação (%)	4,8%
fk (MPa)	67,19

Considerando a condição-padrão de referência abordada pela NBR 7190 (1997), os resultados de ensaios realizados com diferentes teores de umidade da madeira, contidos no intervalo entre 10% e 20%, devem ser apresentados com valores corrigidos para umidade padrão de 12%, conforme a equação (24).

$$f_{12} = f_{u\%} \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot (U\% - 12)}{100} \right] \quad (24)$$

Onde:

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

$f_{U\%}$ é a resistência da madeira ensaiada a ser corrigida;

U% é o teor de umidade da madeira.

A Tabela 5 apresenta as propriedades da madeira Garapeira utilizada na elaboração dos corpos de prova para posterior ensaio de arrancamento das barras de aço coladas do sentido paralelo às fibras da madeira.

Tabela 5 - 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)	$f_{ck,m}^{4)}$ (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) $f_{ck,m}$ 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 das barras de aço do tipo vergalhão CA-50, com diâmetro de 6,4 mm, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado de força última de ruptura à tração (kN) e tensão última de ruptura à tração (MPa)

(continua)

Corpo de prova	Força última de ruptura à tração (kN)	Tensão última de ruptura à tração (MPa)
CP - 1	21,67	673,61
CP - 2	22,35	694,75
CP - 3	22,53	700,34

(conclusão)

Corpo de prova	Força última de ruptura à tração (kN)	Tensão última de ruptura à tração (MPa)
CP - 4	23,35	725,83
CP - 5	20,84	647,81
CP - 6	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%
Fk	20,73	644,34

6.3 RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DAS BARRAS COLADAS NO SENTIDO PARALELO ÀS FIBRAS DA MADEIRA

Os resultados dos ensaios de força última de arrancamento (kN) das barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira são apresentados na Tabela 7. A variação do comprimento de ancoragem foi realizada para que os parâmetros de análise fossem os mesmos da pesquisa realizada por Goto et al. (2014), para que pudesse ser avaliado somente a influência da direção das fibras da madeira na resistência ao arrancamento das barras de aço.

Os resultados foram expressos em relação à esbeltez de ancoragem, parâmetro expresso pela proporcionalidade entre o comprimento de ancoragem e o diâmetro da barra de aço, dado pela equação (25).

$$\lambda = \frac{L_a}{d} \quad (25)$$

onde: L_a é o comprimento de ancoragem;

d é o diâmetro da barra de aço;

λ é a esbeltez da ancoragem.

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 6,4, 11,1, 15,9,

20,6 e 25,4. O valor omitido na Tabela 7 foi devido a problemas na furação do corpo de prova.

Tabela 7 - Resultado da força última de arrancamento (kN) para barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira

Corpo de prova	$\lambda = 6,35$	$\lambda = 11,11$	$\lambda = 15,87$	$\lambda = 20,63$	$\lambda = 25,39$
CP - 1	11,61	15,62	20,90	20,69	20,27
CP - 2	14,33	20,49	20,47	-	20,47
CP - 3	15,29	19,69	20,78	20,55	21,24
CP - 4	14,86	20,56	20,72	20,47	21,10
CP - 5	12,65	14,62	20,75	19,55	20,52
CP - 6	13,15	17,93	20,70	20,73	20,93
CP - 9	12,08	16,40	19,40	20,64	20,85
CP - 10	11,87	18,41	21,70	20,83	20,92
CP - 12	14,63	18,01	20,36	20,91	21,24
CP - 14	12,63	18,71	20,49	20,32	20,87
CP - 15	11,98	20,58	21,05	20,67	21,41
CP - 16	14,11	20,45	20,60	21,15	20,89
CP - 18	13,42	18,17	18,16	20,90	21,13
CP - 19	13,53	20,46	20,42	21,13	20,38
CP - 20	10,72	14,80	20,04	20,19	20,66
Média	13,12	18,33	20,44	20,62	20,86
Variância	1,80	4,52	0,64	0,17	0,12
Desvio padrão	1,34	2,13	0,80	0,41	0,34
Coef. de Variação (%)	10,22	11,60	3,92	2,00	1,63

Dos resultados apresentados na Tabela 7 destacam-se os baixos coeficientes de variação encontrados (de 1,63% a 11,60%), em alguns casos inferiores aos resultados de caracterização do aço (4,0%). Pode-se perceber também uma tendência de redução na variabilidade dos resultados à medida que o comprimento de ancoragem supera vinte vezes o diâmetro da barra. Esse fenômeno pode ser explicado pelos modos de ruptura da ligação, para índices de esbeltez inferiores a 11,11 a ruptura característica ocorre na adesão entre a resina e a madeira, já para índices de esbeltez superiores a 20,63 a ruptura característica ocorre na barra de aço.

A Figura 24 apresenta a curva plotada com a média aritmética da resistência experimental (Força Máxima de Arrancamento por Esbeltez de Ancoragem) obtida dos resultados dos 74 testes conduzidos na pesquisa.

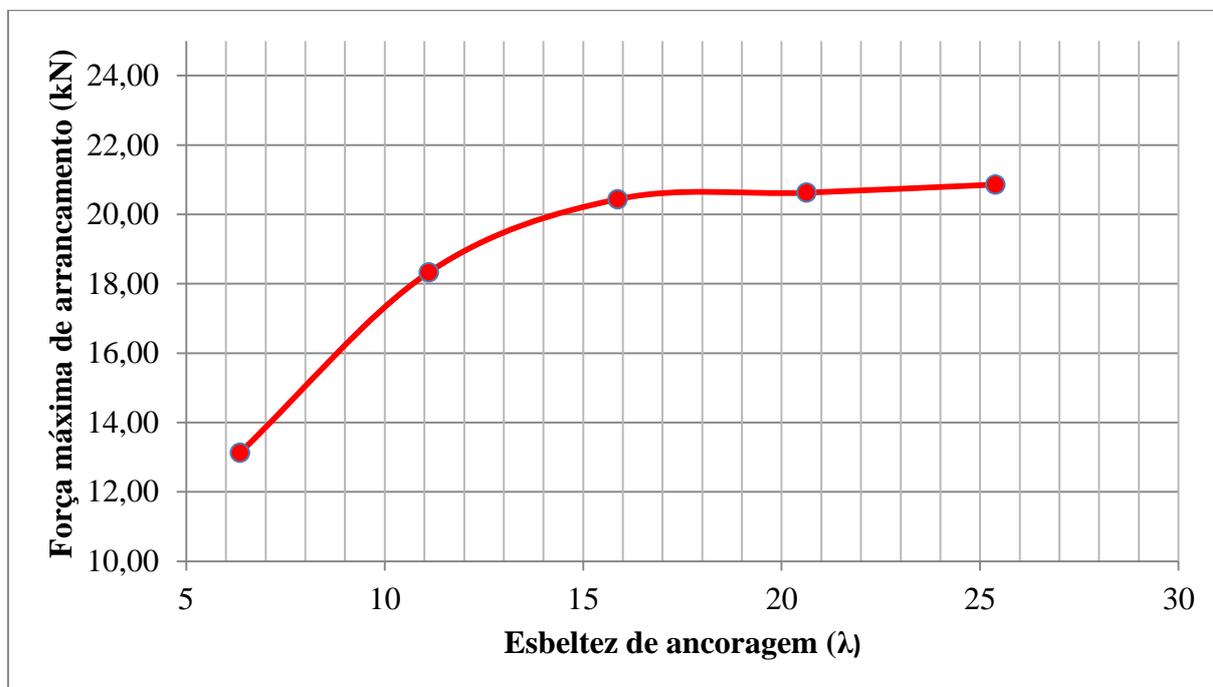


Figura 24 - Força última de arrancamento (kN) x Esbeltez de Ancoragem (λ)

6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM BARRAS COLADAS NO SENTIDO PERPENDICULAR AS FIBRAS MADEIRA

Os resultados da força última de arrancamento (kN) para barras de aço coladas perpendicularmente às fibras da madeira obtidos em recente pesquisa realizada por Goto et al. (2014) são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado da Força Última de Arrancamento (kN) para barras de aço coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira retirado de Goto et al. (2014)

(continua)

Corpo de prova	λ = 6,35	λ = 11,11	λ = 15,87	λ = 20,63	λ = 25,39
CP - 1	12,80	20,91	21,28	21,41	21,47
CP - 2	12,61	20,74	21,06	21,51	21,53
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

Corpo de prova	(conclusão)				
	$\lambda = 6,35$	$\lambda = 11,11$	$\lambda = 15,87$	$\lambda = 20,63$	$\lambda = 25,39$
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	1,42	1,85	2,24	2,30	0,52
Desvio padrão	1,19	1,36	1,50	1,52	0,72
Coef. de Variação (%)	9,57	6,78	7,23	7,33	3,41

Da mesma forma como os resultados apresentados na Tabela 7, os ensaios com barras de aço coladas perpendicularmente às fibras da madeira destacam-se pelos baixos coeficientes de variação (de 3,41% a 9,57%). Semelhante às barras de aço coladas na direção paralela às fibras da madeira, percebe-se uma tendência de redução na variabilidade dos resultados à medida que o comprimento de ancoragem supera vinte vezes o diâmetro da barra.

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos nas duas séries de ensaios. A curva vermelha corresponde aos resultados médios obtidos nos ensaios com barras de aço coladas na direção paralela às fibras da madeira. A curva azul corresponde aos resultados médios dos ensaios obtidos por Goto et al. (2014) com barras de aço coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira.

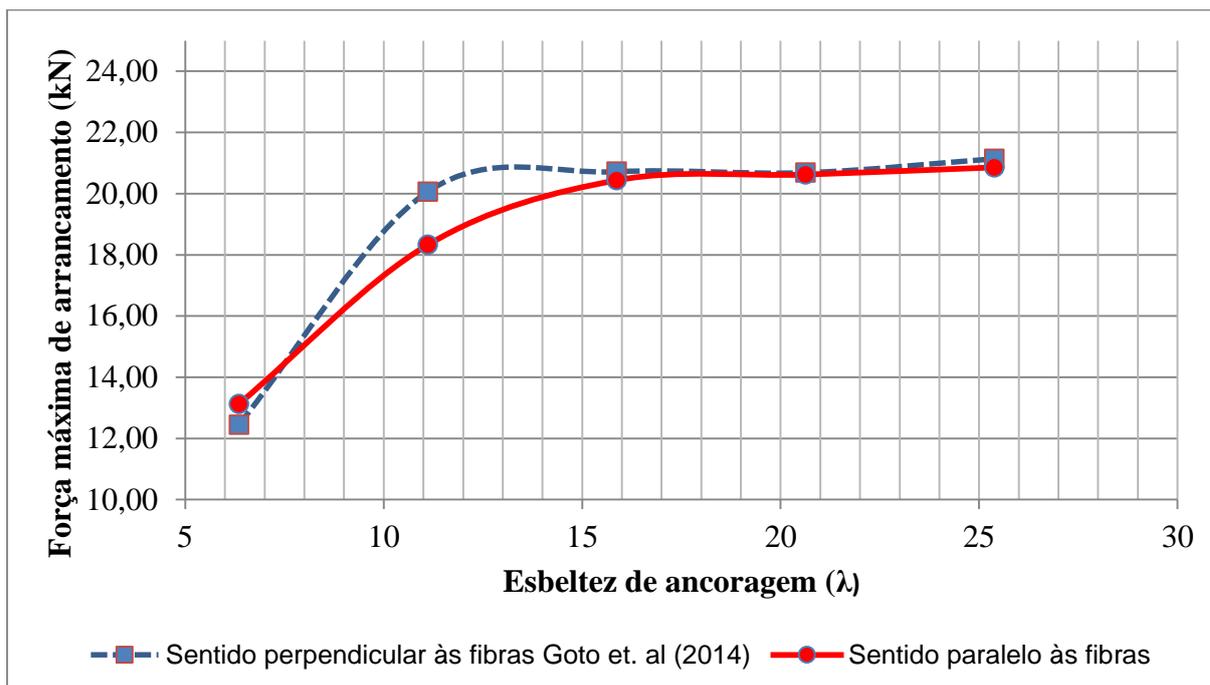


Figura 25 - Comparação entre as médias de força última de arrancamento

A partir do índice de esbelteza igual a 15,87, independente da direção das fibras da madeira, percebe-se uma estabilização do valor médio da força última de arrancamento (20,79 kN) sendo próximo do valor médio de ruptura da barra de aço (22,36 kN).

No intervalo entre 7,50 e 15,87, observou-se uma tendência dos valores da força última de arrancamento na direção paralela as fibras da madeira serem inferiores aos valores de força última de arrancamento na direção perpendicular às fibras da madeira. Esse fenômeno ficaria melhor caracterizado com uma quantidade maior de ensaios com índices de esbelteza no intervalo de 6,35 a 15,87, onde foram observadas as maiores diferenças na força última de arrancamento das barras de aço.

Os resultados encontrados na presente pesquisa corroboram com as indicações da bibliografia, ficando evidente que a resistência ao arrancamento de barras de aço coladas na direção perpendicular às fibras da madeira é maior que na direção paralela às fibras da madeira. Apesar disso, as diferenças nas médias da resistência ao arrancamento encontradas, considerando os parâmetros abordados nessa pesquisa, foram de no máximo 8,67%, valores inferiores aos indicados por Steiger, Widmann e Gehri (2006), onde os autores sugerem diferenças na resistência ao arrancamento da ordem de 20 a 50%.

6.5 MODOS DE RUPTURA

Após a realização dos ensaios de arrancamento das barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira, verificou-se, por meio de análise visual, cinco modos distintos de ruptura: falha de adesão do aço na resina epóxi, falha de adesão da resina epóxi na madeira, falha de adesão mista da resina epóxi (madeira e aço), ruptura na barra de aço e ruptura da madeira (Figura 26).



Figura 26 - Modos de ruptura, a) falha de adesão da resina na madeira, b) falha de adesão do aço na resina, c) falha de adesão mista, d) ruptura na madeira, e) ruptura no aço

A Tabela 9 apresenta os valores em porcentagem da ocorrência de cada um dos modos de ruptura em relação a esbeltez de ancoragem para barras coladas no sentido paralelo às fibras da madeira. Do mesmo modo, a Tabela 10 apresenta os valores obtidos nos ensaios realizados por Goto et al. (2014) para o sentido perpendicular às fibras da madeira.

Tabela 9 - Ocorrência dos modos de ruptura para barras coladas no sentido paralelo às fibras da madeira

Modos de Ruptura	$\lambda = 6,35$	$\lambda = 11,11$	$\lambda = 15,87$	$\lambda = 20,63$	$\lambda = 25,39$
Falha de adesão do aço na resina	7%	13%	7%	0%	0%
Falha de adesão da resina na madeira	53%	80%	13%	7%	0%
Falha de adesão mista da resina (madeira e aço)	20%	0%	0%	0%	7%
Ruptura no aço	0%	7%	80%	93%	93%
Ruptura na madeira	20%	0%	0%	0%	0%

Tabela 10 - Ocorrência dos modos de ruptura obtidos por Goto et al. 2014 para barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira

Modos de Ruptura	$\lambda = 6,35$	$\lambda = 11,11$	$\lambda = 15,87$	$\lambda = 20,63$	$\lambda = 25,39$
Falha de adesão do aço na resina	65%	45%	5%	5%	0%
Falha de adesão da resina na madeira	15%	5%	15%	10%	5%
Falha de adesão mista da resina (madeira e aço)	20%	30%	15%	10%	5%
Ruptura no aço	0%	20%	65%	75%	90%

Nas ligações com barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira a tendência de ruptura ocorre na interface madeira-resina para índices de esbeltez iguais ou inferiores a 11,11. Tal modo de ruptura pode estar relacionado com um possível “deslizamento” da resina nas fibras da madeira, de modo que a aderência entre os dois materiais foi menor que a aderência entre a resina e o aço, possivelmente pelo índice de esbeltez ser insuficiente para garantir a completa aderência da resina na madeira. A partir do índice de esbeltez 15,87 o modo de ruptura característico passa a ser a ruptura da barra de aço, limitando a força última de arrancamento da barra ao valor próximo da resistência à tração do aço.

De modo contrário, avaliando os resultados obtidos por Goto et al. (2014) para o sentido perpendicular às fibras da madeira, observa-se a tendência de ruptura na interface resina-aço para índices de esbeltez iguais ou inferiores a 11,11. Nesse caso, o “deslizamento” ocorreu entre a resina e o aço, diferente das barras coladas no sentido paralelo às fibras da madeira. Possivelmente, a aderência entre o aço e a resina foi menor que a aderência entre a resina e a madeira, comprovando que o sentido das fibras favoreceu na aderência entre a resina e a madeira. A partir do índice de esbeltez 15,87 o modo de ruptura característico também passa a ser a ruptura da barra de aço.

Ensaio realizados na direção paralela às fibras da madeira, em geral, tendem a apresentar o modo de ruptura na madeira, entretanto, devido

principalmente a alta resistência ao cisalhamento e a alta densidade da madeira utilizada na pesquisa, observou-se a pouca ocorrência desse modo de ruptura.

6.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de variância (ANOVA) é um teste estatístico que visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias de diferentes grupos, também chamados tratamentos. Em uma ANOVA, calculam-se dois componentes de variância, se a variância calculada usando a média entre grupos for maior do que a calculada usando os dados pertencentes a cada grupo individual, isso pode indicar que existe uma diferença significativa entre os grupos.

A análise foi realizada para os índices de esbeltez 6,35 e 11,11, valores nos quais foram observadas as maiores diferenças nas médias de força última de arrancamento das barras. As Tabelas 11 e 12 foram obtidas com auxílio do suplemento “Análise de Dados” do Excel e por se tratar de um único fator (influência da direção das fibras) os valores foram calculados pela entrada “Anova: fator único”. Os grupos considerados para a presente análise foram: barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira e barras de aço coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira (Goto et al. 2014).

Considerando as hipóteses:

H_0 : As médias para barras coladas no sentido paralelo às fibras madeira e barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira são estatisticamente iguais. ($H_0: \sigma_{parf} = \sigma_{perf}$)

H_1 : As médias para barras coladas no sentido paralelo às fibras madeira e barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira são estatisticamente diferentes. ($H_1: \sigma_{parf} \neq \sigma_{perf}$)

Segundo Mucelin (2006), o que reforça a validade da decisão pela hipótese de que médias sejam ou não estatisticamente diferentes, é a verificação das suposições do modelo. Uma análise de variância só deve ser aplicada a um conjunto de observações se forem satisfeitas as pressuposições de independência dos erros, normalidade dos erros e variância constante dos erros (homocedastícia).

A análise de variância foi feita separadamente para os índices de esbeltez 6,35, 11,11, referente às barras de aço com diâmetro nominal de 6,4 mm e comprimentos de ancoragem 4,0 cm, 7,0 cm, a um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Onde:

PARF – barras coladas no sentido paralelo às fibras da madeira

PERF – barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira (Goto et al. 2014)

As Tabelas 11 e 12 mostram as análises de variância obtidas pelo suplemento “Análise de Dados” do Excel calculadas a partir da entrada “Anova: fator único”.

A validação das pressuposições de independência, normalidade e variância constante dos erros para os índices de esbeltez analisados são apresentadas no Apêndice A.

Tabela 11 - Análise de variância para o índice de esbeltez 6,35

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
6,35 (PARF)	15	196,860	13,124	1,797		
6,35 (PERF)	19	236,520	12,448	1,421		

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,826	1	3,826	2,413	0,130	7,499
Dentro dos grupos	50,736	32	1,586			
Total	54,562	33				

Para um índice de esbeltez de 6,35 a um nível α de significância de 5%, com valor-P $> \alpha$ e o $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$, a hipótese H_0 pode ser considerada verdadeira, portanto, as médias de resistência ao arrancamento para barras coladas no sentido paralelo às fibras madeira e barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira são consideradas estatisticamente iguais.

Tabela 12 - Análise de variância para o índice de esbeltez 11,11

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
11,11 (PARF)	15	274,900	18,327	4,522		
11,11 (PERF)	20	401,301	20,065	1,852		

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F calculado	valor-P	F crítico
Entre grupos	25,902	1	25,902	8,678	0,006	7,471
Dentro dos grupos	98,497	33	2,985			
Total	124,400	34				

Para um índice de esbeltez de 11,11 a um nível α de significância de 5%, com valor-P $< \alpha$ e o $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$, rejeita-se a hipótese H_0 , portanto, as médias de resistência ao arrancamento para barras coladas no sentido paralelo às fibras madeira e barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira são consideradas estatisticamente diferentes.

A análise de variância confirma a hipótese de que a direção das fibras da madeira influencia os valores da força última de arrancamento de barras de aço coladas em madeira para o índice de esbeltez de 11,11, mostrando que as médias de força última de arrancamento para barras coladas no sentido paralelo às fibras madeira e barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira são estatisticamente diferentes.

6.7 COMPARAÇÃO DO RESULTADOS COM MODELOS EMPÍRICOS

Os valores médios de força última de arrancamento obtidos experimentalmente na presente pesquisa, foram comparados com equações empíricas desenvolvidas por diversos pesquisadores nos últimos anos para que se possa analisar quais equações mais se aproximam dos valores obtidos segundo os parâmetros analisados nesta pesquisa.

A alta complexidade deste tipo de ligação faz com que os autores direcionem suas pesquisas e os parâmetros de estudo, de modo que, algumas equações não puderam ser comparadas por ter sua utilização limitada pelos parâmetros estudados pelos pesquisadores, como por exemplo, limites para o comprimento de ancoragem, para esbeltez de ancoragem, para o diâmetro da barra e etc.

A Figura 27 apresenta os modelos empíricos que mais se aproximaram dos valores de força média última de arrancamento obtidos nessa pesquisa, utilizando barras de aço de 6,4 mm coladas com resina epóxi Sikadur 32 no sentido paralelo às fibras da madeira *Apuleia Leiocarpa* (Garapeira).

Os valores das curvas mostradas na Figura 27 foram limitados pela resistência média à tração do aço utilizado no experimento.

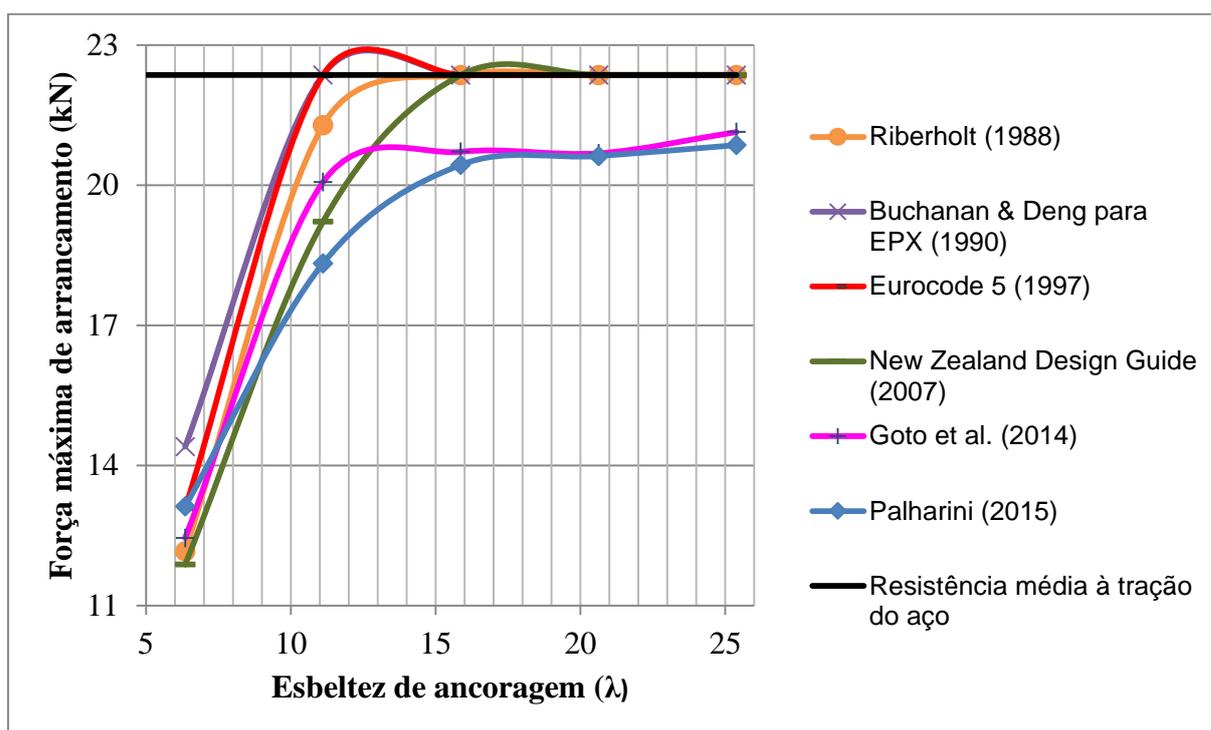


Figura 27 - Comparação dos resultados com equações empíricas desenvolvidas nos últimos anos

A Figura 27 mostra que os valores obtidos experimentalmente por Goto et al. (2014) para barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira foram mais próximos dos valores obtidos empiricamente.

Para comprimentos de ancoragem superiores a nove vezes o diâmetro da barra, todos os valores empíricos foram superiores aos valores obtidos experimentalmente para barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira segundo os parâmetros adotados na presente pesquisa, assim sendo, a utilização destes valores empíricos não seria recomendada para ligações segundo os parâmetros adotados na presente pesquisa.

7 CONCLUSÕES

- Para índices de esbeltez compreendidos no intervalo de 6,32 a 15,87, a resistência ao arrancamento de barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira foram inferiores a resistência ao arrancamento de barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira.

- Para índices de esbeltez iguais ou superiores a 15,87, a resistência ao arrancamento de barras de aço coladas em madeira, independente do sentido das fibras, foi por escoamento do aço, caracterizando-se como ruptura dúctil.

- Foram identificados cinco modos de ruptura para barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras: Falha de adesão do aço na resina, falha de adesão da resina na madeira, falha de adesão mista da resina (madeira e aço), ruptura no aço, ruptura na madeira.

- Para barras de aço coladas no sentido paralelo às fibras da madeira e índice de esbeltez igual ou inferior a 11,11, o modo de ruptura característico foi a falha de adesão da resina na madeira. De modo contrário, para barras coladas do sentido perpendicular as fibras da madeira, sob as mesmas condições, o modo de ruptura característico foi a falha de adesão da resina no aço.

- A direção das fibras da madeira teve influência direta nos modos de ruptura das barras para índices de esbeltez inferiores a 15,87.

- A aderência da resina na madeira nas ligações com barras de aço coladas no sentido perpendicular às fibras é superior se comparado a aderência das barras coladas no sentido paralelo às fibras da madeira.

- Para índices de esbeltez iguais ou superiores a 15,87, o modo de ruptura característico foi a ruptura do aço, independente do sentido das fibras da madeira.

- Observou-se a pouca ocorrência do modo de ruptura na madeira devido a alta resistência ao cisalhamento e alta densidade da madeira *Apuleia leiocarpa* (Garapeira) utilizada na pesquisa.

- A análise de variância ANOVA comprova que para o índice de esbeltez de 11,11, as médias de resistência ao arrancamento para barras coladas no sentido paralelo às fibras madeira e barras coladas no sentido perpendicular às fibras da madeira são consideradas estatisticamente diferentes.

- Não é recomendada a utilização dos modelos empíricos analisados nesta pesquisa para a avaliação da resistência das ligações estudadas neste trabalho, pois, segundo os parâmetros adotados no presente estudo, os valores de resistência obtidos empiricamente foram superiores aos valores de resistência obtidos experimentalmente para comprimentos de ancoragem superiores a nove vezes o diâmetro da barra.

- Caso o interesse seja estudar a influência da direção das fibras, devem ser realizados maiores estudos para índices de esbeltez compreendidos no intervalo entre 6,32 e 15,87, onde foram observadas as maiores diferenças na resistência ao arrancamento.

SUGESTÃO PARA NOVAS PESQUISAS

- Avaliar a influência do sentido das fibras para ligações com barras de aço coladas em madeira para comprimentos de ancoragem inferiores a 16 vezes o diâmetro da barra, no qual foram observadas as maiores diferenças na resistência ao arrancamento.

- Avaliar os modos de ruptura para barras coladas no sentido paralelo e perpendicular às fibras da madeira, variando o tipo e a densidade da madeira, para que se possa verificar se a direção das fibras tem influência direta na aderência da resina na madeira e qual seria essa relação.

8 REFERÊNCIAS

AICHER, S.; WOLF, M.; GUSTAFSSON P. J. Load displacement and bond strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter. **1st RILEM Symposium on Timber Engineering**. 1999. Estocolmo, Suécia.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013), NBR ISO 6892 - Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente, Rio de Janeiro, 2013, p. 70.

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

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

BROUGHTON J. G.; HUTCHINSON A.R. Effect of timber moisture content on bonded-in rods. **Construction and Building Materials**, n.15, p. 17 – 25, 2001.

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, 1999.

CHANS, Otero D.; CIMADEVILA, Estévez J.; GUTIÉRREZ, Martin E. Strength of joints with epoxy-glued threaded steel rods in tali timber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 23, n. 4, 453-458, 2011.

GARDELLE, Vincent; MORLIER, Pierre. Geometric parameters which affect the short term resistance of an axially loaded glued-in rod. **Materials and Structures**, n. 40, p. 127-138, 2006.

GOTO, Amanda S.; AVANCINI, Giovane; SCHWANZ, Marcos V.; PALHARINI JUNIOR, Dionisio; RIBEIRO, Alécia B.; GÓES, Jorge L. N. Avaliação da influência do comprimento de ancoragem para ligações com barras de aço coladas em madeira. **XXXVI Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural**. Montevideu, Uruguai, 2014.

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.

KERKHOFF, Joel. Bonded-in Steel Rods. **Connection of Steel to Dissimilar Building Materials**, 2010. University of British Columbia, Canada, 2010.
LING, Zibhin et al. Pull-out strength and bond behaviour of axially loaded rebar glued-in glulam. **Construction and Building Materials**, n. 65, p. 440–449, 2014.

MUCELIN, Carlos A. **Estatística elementar e experimental aplicada às tecnologias**. 2. Ed. Medianeira. 2006

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.

ROSSIGNON A.; ESPION B. Experimental assessment of the pull-out strength of single rods bonded in glulam parallel to the grain. **Holz Roh Werkst**, n. 66, p. 419 – 432, 2008.

SERRANO, Erick et al. Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards. **International Council for Research and Innovation in Building and Construction**, 2013.

SERRANO, Erick; STEIGER R.; LAVISCI P. Glued-in rods. **Cost Action E34 – Bonding of Timber**, n.1, p. 37-45, 2008.

SILVA, Ruben F. P. **Cálculo ao fogo de Ligações de Madeira**. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

STEIGER, R.; GEHRI E; WIDMANN, R. Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain. **Materials and Structures**, n. 40, p. 69-78, 2006.

TLUSTOCHOWICZ, Gabriela; SERRANO, Erick; STEIGER, René. State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. **Materials and Structures**, n. 44, p. 997-1020, 2010.

WIDMANN, R.; STEIGER, R.; GEHRI E. Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam perpendicular to the grain. **Materials and Structures**, n. 40, p. 827-838, 2007.

APÊNDICE A – VALIDAÇÃO DAS PRESSUPOSIÇÕES (ANOVA)

Para o índice de esbeltez 6,35:

i) Suposição de que os erros são variáveis aleatórias independentes

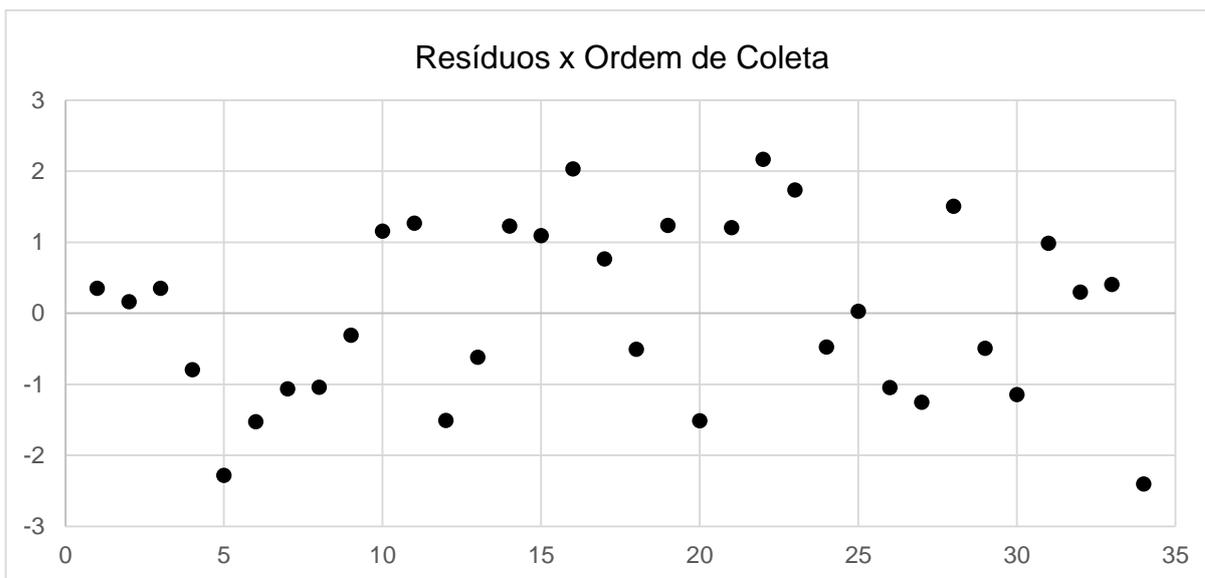


Figura A.1 - Resíduos x Ordem de Coleta

A Figura A.1 indica que para os tratamentos em estudo, os erros são independentes, posto que a disposição no gráfico apresenta-se aleatória, ou seja, não seguem uma tendência de disposição tal como linear ou curva.

ii) Suposição de que os erros possuem distribuição normal

Para a verificação da normalidade dos erros foi utilizado o software Action fazendo-se uso do Teste de Anderson-Darling.

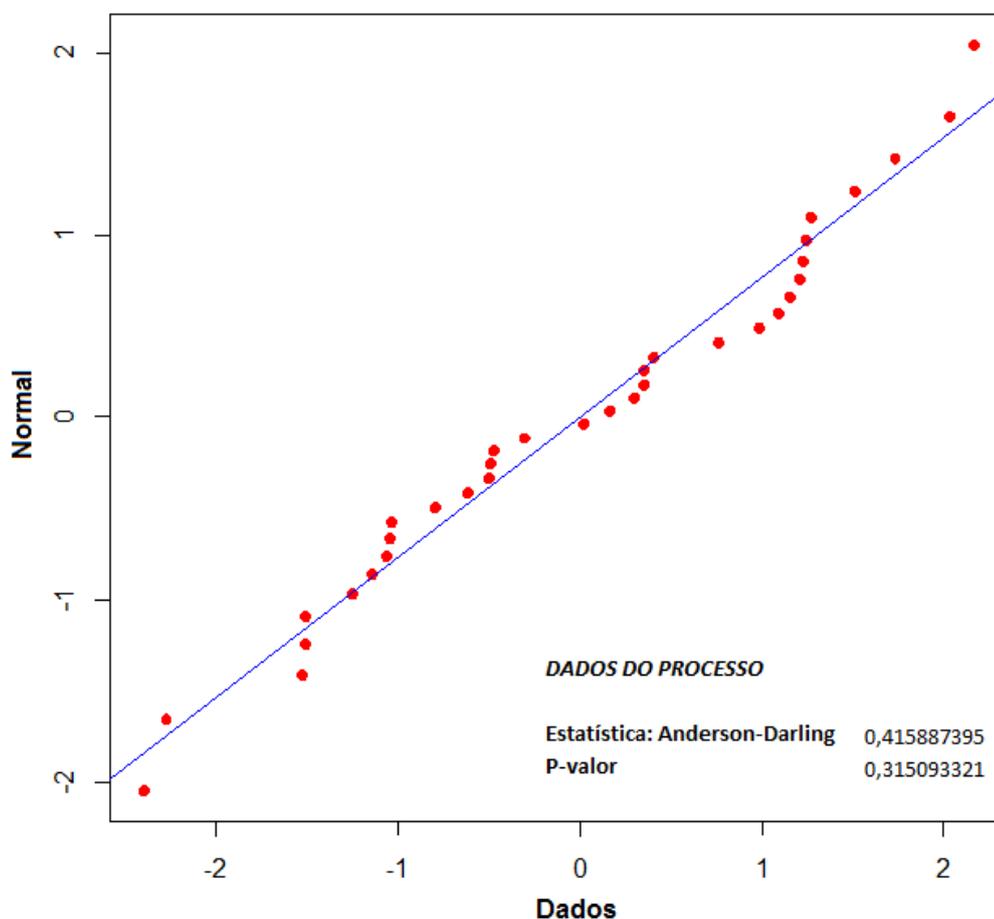


Figura A.2 - Normalidade dos erros obtidos pelo Teste de Anderson-Darling

A Figura A.2 mostra que o P-valor obtido a partir do Teste de Anderson-Darling é de aproximadamente 0,315. Tal valor é maior que o nível de significância de 5%. Toda vez que o P-valor do teste é maior ou igual o nível de significância admite-se que os erros têm distribuição normal.

iii) Suposição de que os erros são homocedásticos (variância constante)

Para verificação da homocedasticidade da variância foi utilizado o software Action fazendo-se uso do Teste de Barlett.

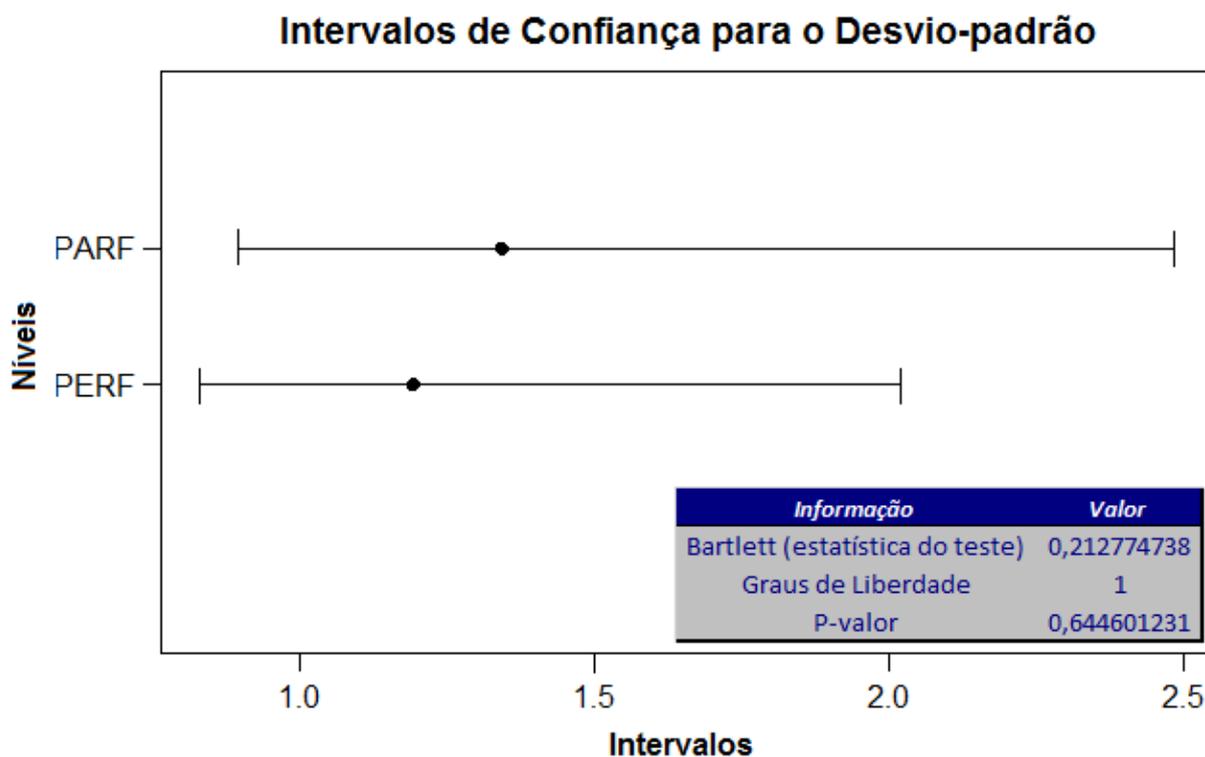


Figura A.3 - Homocedasticidade da variância

A Figura A.3 mostra que o P-valor obtido pelo Teste de Barlett é de aproximadamente 0,645. Tal valor é maior que o nível de significância de 5%. Toda vez que o P-valor do teste é maior ou igual o nível de significância admite-se que os erros são homocedásticos.

Como todas as suposições foram verificadas, ou seja, os erros são independentes, possuem distribuição normal e são homocedásticos, a hipótese considerada pelo teste F pode ser considerada válida.

Para o índice de esbeltez de 11,11:

i) Suposição de que os erros são variáveis aleatórias independentes

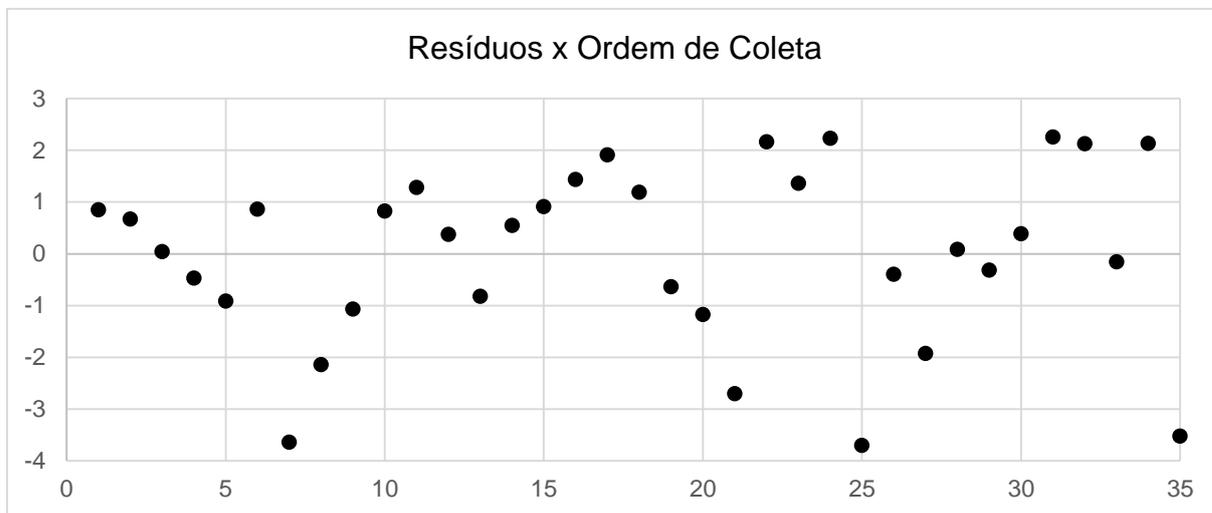


Figura A.4 - Resíduos x Ordem de Coleta

A Figura A.4 indica que para os tratamentos em estudo, os erros são independentes, posto que a disposição no gráfico apresenta-se aleatória, ou seja, não seguem uma tendência de disposição tal como linear ou curva.

ii) Suposição de que os erros possuem distribuição normal

Para a verificação da normalidade dos erros foi utilizado o software Action fazendo-se uso do Teste de Anderson-Darling.

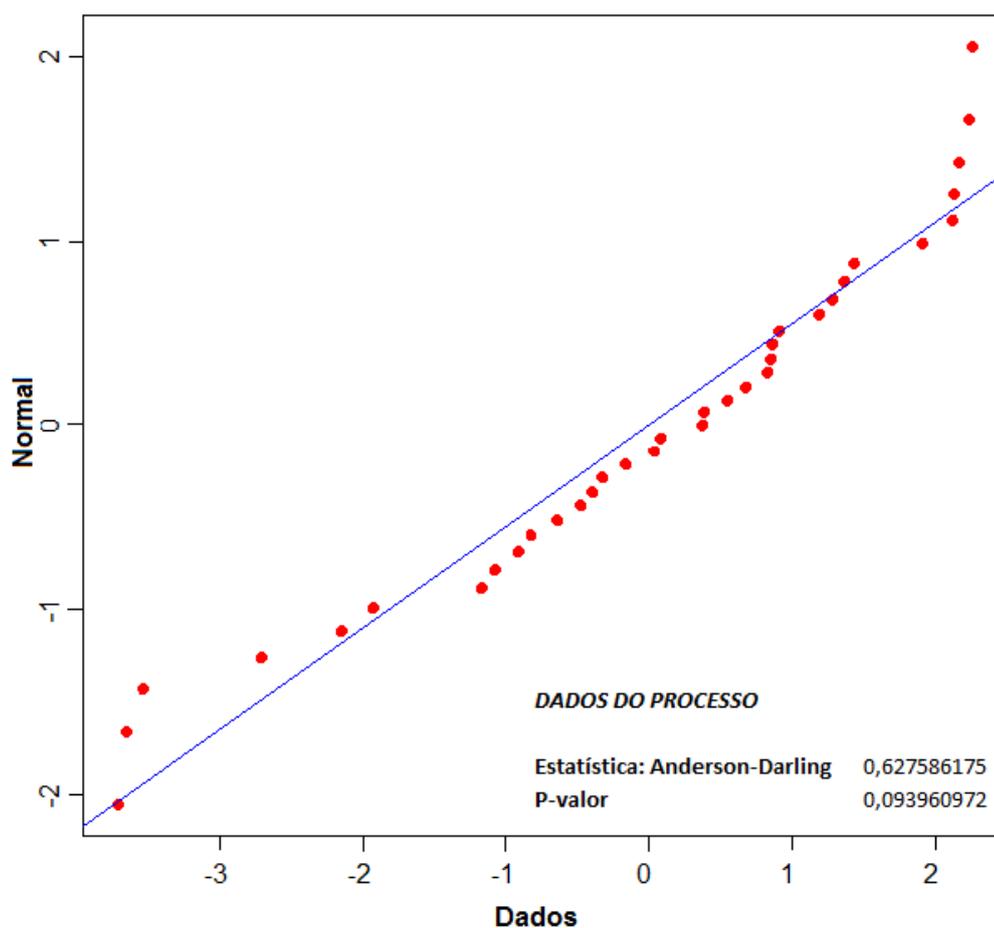


Figura A.5 - Normalidade dos erros obtidos pelo Teste de Anderson-Darling

A Figura A.5 mostra que o P-valor obtido a partir do Teste de Anderson-Darling é de aproximadamente 0,094. Tal valor é maior que o nível de significância de 5%. Toda vez que o P-valor do teste é maior ou igual o nível de significância admite-se que os erros têm distribuição normal.

iii) Suposição de que os erros são homocedásticos (variância constante)

Para verificação da homocedasticidade da variância foi utilizado o software Action fazendo-se uso do Teste de Barlett.

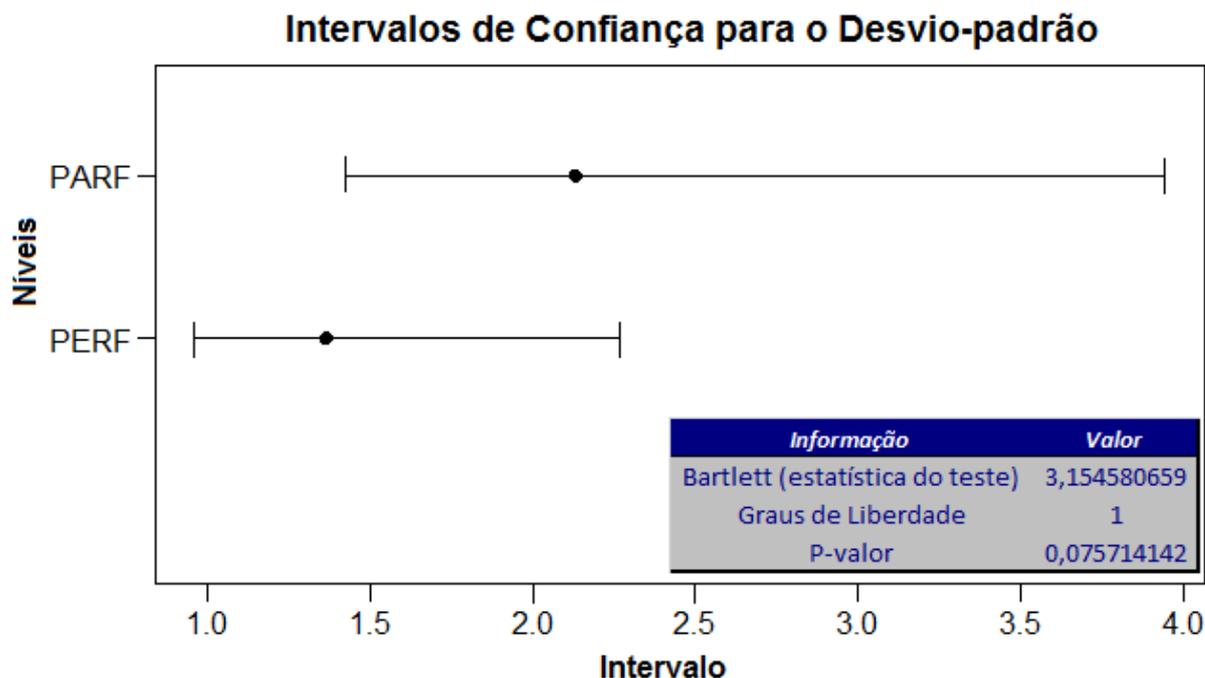


Figura A.6 - Homocedasticidade da variância

A Figura A.6 mostra que o P-valor obtido pelo Teste de Barlett é de aproximadamente 0,076. Tal valor é maior que o nível de significância de 5%. Toda vez que o P-valor do teste é maior ou igual o nível de significância admite-se que os erros são homocedásticos.

Como todas as suposições foram verificadas, ou seja, os erros são independentes, possuem distribuição normal e são homocedásticos, a hipótese considerada pelo teste F pode ser considerada válida.